**С. Я. Семененко, М. Н. Лытов, А. Н. Чушкин,
С. С. Марченко, Е. И. Чушкина**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ С МОДУЛЕМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ВОДЫ

Волгоград∗ ФНЦ агроэкологии РАН ∗2018

УДК 631.67.03+631.674.6
Д79

Семененко С. Я., Лытов М. Н., Чушкин А. Н.,. Марченко С. С, Чушкина Е. И. Проектирование систем капельного орошения с модулем электрохимической активации воды. – Волгоград: ФНЦ агроэкологии РАН, 2018. – 183 с.

В монографии раскрывается проблематика проектирования систем капельного орошения, оснащенных модулем электрохимической подготовки оросительной воды. Рассматриваются вопросы, связанные с необходимостью учета динамики релаксации электрохимически активированной воды в процессе движения от модуля электрохимической подготовки к капельным водовыпускам, обосновывается алгоритм решения компромиссной задачи расчета конструктивных параметров системы капельного орошения, предложена методика определения прогнозных значений показателей состояния электрохимически активированной воды на основе комплексного моделирования процессов релаксации и динамики ее перемещения в системе напорных водоводов капельного орошения. Ряд технических задач по разработке узловых модулей системы капельного орошения с функцией электрохимической подготовки оросительной воды решены на уровне изобретений. Монография ориентирована на использование профильными специалистами аграрного производства и проектных организаций, а также будет полезна научным сотрудникам, аспирантам и студентам высших учебных заведений.

Semenenko S. Ya., Lytov M. N., Chushkin A. N., Marchenko S. S., Chushkina Ye. I. Designing of systems of drip irrigation equipped with module for electrochemical water activation. – Volgograd: FSC of agroecology RAS, 2018. – 183 p.

The monograph reveals the problem of designing drip irrigation systems equipped with the module for electrochemical treatment of irrigation water, the necessity of considering the dynamics of relaxation of electrochemically activated water in the process of moving from module for electrochemical treatment to drip outlets is taken into account, an algorithm for solving a compromise problem of calculating the design parameters of the drip irrigation system is substantiated, methods for determining the predicted values of the indicators of the state of electrochemically activated water on the basis of comprehensive simulations of the relaxation processes and the dynamics of its movement in the system of pressure water conduits for drip irrigation is suggested. A number of production goals for the development of node module of drip irrigation system with the function of electrochemical treatment of the irrigation water are developed at the level of inventions. The monograph is intended for the use of specialists of agrarian production and design, is of advantage for researchers, graduate students and students of higher educational institutions.

Рецензенты – **Н. В. Тютюма**, доктор сельскохозяйственных наук, профессор РАН;
В. С. Бочарников, доктор технических наук

ISBN 978-5-9909841-9-6

© С. Я. Семененко, М. Н. Лытов, А. Н. Чушкин, С. С. Марченко, Е. И. Чушкина, 2018
© ФНЦ агроэкологии РАН, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Решение проблемы повышения продуктивности сельскохозяйственных культур с сохранением экологического равновесия агроландшафтов является приоритетным направлением современной аграрной науки. Общая направленность инновационного развития современных агротехнологий состоит в повышении эффективности, а, следовательно, экономии используемых оборотных средств, включая токсичные составляющие пестицидов и агрохимикатов, а также в разработке принципиально новых биофизических приемов воздействия на агрофитоценозы. Одним из таких методов, отвечающих самым современным требованиям к экологической безопасности производства и ресурсосбережению, является использование электрохимически активированной воды. Сегодня активно ведутся научные исследования, получены данные, подтверждающие эффективность использования электрохимически активированной воды для подавления патогенной микрофлоры, активации обменных процессов и стимуляции роста растений. Электрохимической активации подвергаются как вода в чистом виде, так и ее растворы с различными химическими веществами. Другим способом применения электрохимически активированной является ее использование для приготовления растворов. В частности, при поливе сельскохозяйственных культур актуальны вопросы приготовления и использования растворов минеральных удобрений на основе электрохимически активированной воды.

Сегодня можно считать доказанным, что наиболее результативное, комплексное воздействие на сельскохозяйственные фитоценозы обеспечивается при использовании электрохимически активированной воды для полива сельскохозяйственных культур капельным способом. Одной из ключевых задач проектирования систем капельного орошения является расчет конструктивных параметров поливных модулей. Типизированная схема компоновки поливного модуля современной системы капельного орошения включает распределительный трубопровод и поливные капельные линии с интегрированными капельными водовыпусками. При этом, как с

позиции рационального использования компонентов системы, так и для удобства выполнения агротехнических мероприятий, целесообразно проектировать поливные участки прямоугольной или квадратной формы. В этом случае, поливные трубопроводы располагают перпендикулярно распределителю, а поливной модуль характеризуется двумя линейными параметрами: протяженностью распределительного трубопровода и протяженностью поливного трубопровода с интегрированными капельницами.

Классический расчет поливного модуля системы капельного орошения заключается в совокупном определении протяженности и соотношения длины распределительного и поливного трубопроводов, диаметров распределительного и поливных трубопроводов, шага раскладки и подсоединения поливных трубопроводов к распределительному, расстояния между капельными водовыпусками и производительности капельниц. Главным агротехническим требованием при этом является возможность обеспечения заданной равномерности подачи оросительной воды разноудаленными капельными водовыпусками. Современные требования к равномерности распределения оросительной воды по поливному участку довольно жесткие и, как правило, ограничиваются диапазоном в 5 % от поливной нормы или производительности капельных водовыпусков. Исходя из требований равномерности, и с учетом напорно-расходных характеристик капельных водовыпусков, определяют допустимые потери напора. Особенностью расчета систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды является необходимость учета закономерностей релаксации, т. е. изменения активационного потенциала электрохимически обработанной воды в процессе перемещения от установки – активатора к капельным водовыпускам.

Таким образом, концептуально новым положением при проектировании систем капельного орошения с модулем электрохимической активации является положение о необходимости определения допустимых параметров конструктивных элементов поливного модуля с учетом разницы уровней активации электрохимически обработанной воды на первом, наименее удаленном от установки – активатора, и последнем, наиболее удаленном от установки-активатора капельном водовыпуске. Указываемая разница активационных уровней электрохимически обработанной воды принимается в качестве нового критерия, дополняющего тре-

бования к конструкциям капельного орошения.

Материалы монографии последовательно освещают проблематику проектирования систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды, включая теоретическое обоснование конструкции и алгоритма проектирования дооборудованных систем капельного орошения, теоретическое обоснование модели параметров состояния электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений в системе капельного орошения, закономерности релаксации электрохимически активированной воды и приготовленных на ее основе растворов в открытых и закрытых системах с полимерной оболочкой, обобщенную модель релаксации электрохимически активированной воды и приготовленных на ее основе растворов. Монография включает примеры практических расчетов поливных модулей капельного орошения с использованием типизированных конструктивных параметров поливной и распределительной сети, а также результаты количественной оценки показателей хозяйственной и экономической эффективности применения систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды.

1. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫХ ВОДНЫХ СРЕД В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

1.1. Народно-хозяйственное значение и область применения феномена электрохимической активации

Начало активной разработки проблематики применения уникальных свойств электрохимически активированной воды и приготовленных на ее основе растворов в России связана с работами В. М. Бахира, который еще в 1972 г. впервые обратил внимание на то, что анолит и католит, полученный в диафрагменном электрохимическом реакторе из слабоминерализованной воды, очень сильно отличаются по физико-химическим параметрам и реакционной способности от моделей католита и анолита, приготовленных путем растворения в воде химических реагентов, вид и количество которых определены в соответствии с законами классического электролиза [7, 8, 106]. Дальнейшие исследования показали, что различия в свойствах только что полученных католита и анолита разбавленных водно-солевых растворов от химических моделей-аналогов (растворов стабильных щелочей или кислот) не являются постоянными, стабильными во времени [106]. По прошествии некоторого времени (время релаксации) свойства и реакционная способность анолита и католита, самопроизвольно изменяясь, становятся равными соответствующим параметрам их химических моделей, т. е. в конечном итоге законы электролиза строго выполняются, но не сразу, а лишь по прошествии достаточного длительного времени в общем случае от десятков минут до десятков и даже сотен часов [7, 8, 88, 106].

Обнаруженные значительные различия в реакционной способности и физико-химических параметрах дали В. М. Бахиру основание назвать анолит и католит в период времени их релаксации активированными или, иначе, электрохимическими растворами (водой) и сформулировать основные принципы технологии элек-

трохимической активации [7, 8, 11, 88, 106]. Им же было дано определение электрохимической активации как технологии – это получение и последующие использование электрохимически активированной воды либо в процессах ее очистки от нежелательных компонентов, либо в различных технологических процессах в качестве реагента или реакционной среды с целью управления сложными физико-химическими реакциями, экономии энергии, времени и материалов, повышения качества конечного продукта, уменьшения образования отходов [106].

С начала 90-х годов XX в. в области исследований феномена электрохимической активации и разработки различных технологических процессов с использованием электрохимически активированных сред лидерство занимает ОАО "НПО ЭКРАН" и ВНИИИМТ МЗ РФ [8]. Широкую известность в России и за рубежом получили установки СТЭЛ, которые обеспечивают экологически чистыми стерилизующими и дезинфицирующими растворами медицинские и детские учреждения, предприятия коммунального хозяйства, пищевой промышленности, плавательные бассейны [8, 106].

Другой значимой областью применения метода электрохимической активации, активно развивающейся и в настоящее время, является очистка сточных вод. Например, в работах [28] исследуется возможность применения электрохимически активированных растворов "анолит" для решения проблемы обесцвечивания сточных вод текстильной, бумажной и лакокрасочной промышленности. Анолит предлагается использовать взамен дорогостоящих химических окислителей, таких как хлор, гипохлорит натрия, пероксид водорода, которые, помимо технологических сложностей, загрязняют окружающую среду. В качестве раствора для приготовления анолита использовалась обыкновенная поваренная соль, обеспечивающая в процессе активации образование ряда метастабильных веществ, способствующих не только обесцвечиванию, но и расщеплению высокотоксичных соединений органических красителей. В опытах [26] исследовалась эффективность способа электрохимической очистки стоков, содержащих сульфиды, в электролизере с растворимым железным анодом. Исследования подтвердили возможность осаждения растворенных в воде сульфидов за счет образования нерастворимого соединения – сульфида железа. Исследованиями [121] отмечено, что традиционно применяемые методы дезинфекции сточных вод (хлорирование, озонирование, ультрафиолетовое обеззараживание)

имеют существенные недостатки. Анолит нейтральный сочетает положительные свойства известных оксидантов – хлора, ультрафиолета и озона, и устраняет отрицательные моменты, присущие каждому из названных реагентов в отдельности, т. е. исключено образование побочных продуктов хлорирования и озонирования. В тоже время анолит обладает высокими бактерицидными, фунгицидными, спороцидными, вирулоцидными эффектами, а также низкой коррозионной и деструктивной активностью по отношению к изделиям из различных материалов. В работах [120] приводятся убедительные доказательства повышения качества питьевой воды за счет направленного регулирования ее окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) и водородного показателя (pH) способом электрохимической активации.

Активно развивающимся направлением использования феномена электрохимической активации воды и разбавленных водных растворов является сельское хозяйство. Сегодня активно дискутируются проблемы использования электрохимически активированных растворов для лечения паразитарных дерматитов у сельскохозяйственных животных, для лечения маститов молочного стада, эффективной обработки раневых поверхностей, борьбы с сальмонеллезом у молодняка крупного рогатого скота и др. [86, 114]. Группой исследователей [68, 69] предложен способ получения зеленых кормов путем стимуляции замачивания и проращивания семян пшеницы с использованием электроактивированных растворов. Указывается, что действие католита обусловлено его активными частицами, которыми могут быть различные ионы (OH^-), ионрадикалы, растворенный водород в атомарном и молекулярном виде, способствующие повышению пропускаемости мембран клеток. Другим перспективным направлением использования метода электрохимической активации является применение электроактивированных растворов для консервирования зеленных кормов [70].

Обсуждаются перспективные направления применения метода электрохимической активации в пищевой промышленности [25]. В частности, описаны различные способы обработки электрохимически активированными растворами мяса и его полуфабрикатов [71]. В качестве средств обработки использовали электрохимически активированные растворы различных солей неорганических кислот с концентрацией от 10 до 50 г/л. Исследованиями установлено, что обработка мясного фарша с использованием электрохи-

мически активированных растворов способствовало сохранению сухого вещества на 0,9 абс. процента, белка на 0, 78 абс. процента. В работах [72] обсуждаются результаты исследований по использованию омагниченных и электроактивированных растворов на качественные показатели мяса при хранении его в охлажденном состоянии. Показано, что высокая антиоксидантная активность применяемых растворов обусловлена снижением активных форм кислорода за счет уменьшения пероксидного окисления липидов, что и способствует сохранению высоких качеств мяса.

Опытами [101, 104] получены убедительные доказательства возможность применения электрохимически активированных жидких сред для фитосанитарного оздоровления семенного материала сельскохозяйственных культур. Экспериментальные исследования включали варианты с обработкой семян зерновых и овощных культур анолитом и католитом с различными уровнями активации. Полученные результаты подтвердили статистически значимую закономерность подавления развития патогенной семенной микрофлоры при использовании электрохимически активированных сред как с отрицательным, так и с положительным ОВП. В развитие исследований была проведена оценка эффективности применения электрохимически активированной воды вместо инсектицидов при возделывании картофеля [95]. Опыт показал, что хотя заселенность взрослыми особями колорадского жука не изменяется, но вредоносность его личинок существенно снижается. При этом полностью исключается экологический вред, наносимый посевам и окружающей среде применяемыми ядами.

В опытах лаборатории семеноведения Сибирского ботанического сада Томского университета [71] были получены данные, убедительно свидетельствующие о влиянии обработанной в электролизере воды на процесс формирования регенеративных органов цветочных культур. В частности, в результате применения смеси католита и анолита при подготовке семенного материала цветочных культур впоследствии существенно увеличивался размер соцветия, а в ряде случаев возрастало количество элементов соцветия. В опытах [110] была доказана перспективность применения электрохимически активированной воды для обработки посевного материала ярового ячменя, в результате чего всхожесть повышалась до 96,3 %, а энергия прорастания, – до 90,4 %.

Положительные результаты целого ряда других исследова-

ний [1, 12, 13, 36, 65, 70, 71-73, 98, 102, 109, 111, 117, 123] подтверждают перспективы применения электрохимически активированной воды или водных растворов при возделывания сельскохозяйственных культур для обработки семян, опрыскивания посевов и при проведении вегетационных поливов.

Таким образом, феномен электрохимически активированной воды и водных растворов находит самое широкое применение в народном хозяйстве. В тоже время отмечаются и объективно существующие проблемы развития технологий, основанных на применении методов электрохимической активации. Одна их ключевых проблем применения этого феномена непосредственно связана с самой природой электрохимической активации, определяющейся метастабильным состоянием активированных растворов и динамичным изменением его свойств с течением времени.

1.2. Проблемы применения электрохимически активированных водных сред в сельском хозяйстве

Ретроспективный анализ научных исследований по проблеме применения электрохимически активированной воды или активированных водных растворов в сельскохозяйственном производстве показал отсутствие какой бы то ни было системы в обосновании оптимальных активационных параметров [114]. В определенной мере это объясняется механизмом биологического действия электрохимически активированной воды, который, в общем случае, можно разделить на "санирующий" и "стимулирующий".

Механизм "санирующего" действия в этом случае состоит в контролируемом формировании критических изменений параметров состояния водных сред в живых организмах [88]. При этом за счет использования метода электрохимической активации в заданном режиме может изменяться, например, ОВП раствора или pH водной среды. Создавая таким образом условия, несовместимые с нормальным протеканием важнейших жизненных процессов патогенных микроорганизмов, можно проводить фитооздоровление посевов. Проблема здесь состоит в том, что разные микроорганизмы, да и более крупные вредители имеют исключительно индивидуальные диапазоны адаптации по величине ОВП или pH водной среды. Например, у бактерий с высоким уровнем устойчивости к кислым средам (pH = 2-3) существенно ингибирует-

ся репродуктивная способность ОВП меньше +400 мВ. А микроорганизмы, культивируемые на щелочных средах, погибают при создании ОВП выше –50 мВ.

Механизм "стимулирующего" действия электрохимически активированной воды или активированных водных растворов заключается в ее электронодонорной или электроноакцепторной активности [88]. Действие электрохимически активированной воды или активированных водных растворов на живые организмы проявляется в "навязывании" их биохимическим комплексам различных уровней ОВП. Здесь проблема состоит в строго индивидуальной реакции живых организмов на преобладание окисленных или восстановленных форм вещества. Более того, эта реакция строго индивидуальная не только для различных видов, но и зависит среды, в которой находятся живые организмы, от их внутреннего состояния, фазы развития и многих других факторов.

Указанные особенности определяют возможность существования различных оптимумов уровней активации воды или водных растворов в той или иной мере эффективных для разных биогеоценозов. На практике это подтверждается результатами целого ряда исследований [15, 42, 55, 65, 71, 95, 115, 116].

В работе О. В. Харченко [66, 110, 111] по ключевым показателям, – энергии прорастания и всхожесть семян зерновых и бобовых культур, – определялась эффективность использования для замачивания электрохимически активированной воды с разными уровнями активации. На контроле семена замачивали в водопроводной воде (pH 7,3-7,5, ОВП – +250…+282) мВ). В качестве вариантов опыта применяли католит с pH 10,5-1,5 и ОВП–410…–797 мВ, анолит кислый с pH 3,5-4,5 и ОВП +900…+1042 мВ, анолит нейтральный, с pH 6,2-6,4 и ОВП +375…+784, смесь анолита и католита с совокупным pH 10,5-10,8 и ОВП –85…–87 мВ. Исследованиями доказана возможность повышения энергии прорастания семян ячменя на 65 %, семян озимой пшеницы на 56 %, арбуза на 61,0, дыни на 19,5, кабачка на 35,0 % при использовании для замачивания электрохимически активированных сред.

В работах С. Я. Семененко, М. Н. Белицкой, С. М. Лихолетова [101] приводятся сведения о положительных результатах экспериментальных исследований эффективности предпосевной обработки семян озимой пшеницы электрохимически активированной водой. Для обработки семян использовали католит с pH в

пределах 9,4-10,0 и ОВП –300…–400 мВ, а также анолит с pH 6,3-6,5 и ОВП +500…+600 мВ. Контролем служила природная вода с pH 7,3-7,5 и ОВП +250…+280)мВ. Расход рабочей жидкости составлял 8 л на 1 т семян. До начала посевной кампании в лабораторных условиях оценивали влияние анолита и католита на семенную инфекцию. Среди заселяющих зерно озимой пшеницы патогенов доминировали грибы родов *Helminthosporium* и *Alternaria*. Наиболее эффективным в плане подавления этих патогенов оказался анолит с ОВП +600 мВ. Как показали наблюдения, применение электрохимически активированной воды для предпосевной обработки семян оказывает позитивное влияние на фитосанитарное состояние посевов озимой пшеницы в течение всего вегетационного периода.

В исследованиях [95] опытами предусматривалось проведение обработок электрохимически активированной водой посадочного материала и посадок картофеля. Опыты проводились как с использованием анолита, так и с использованием католита при разных уровнях начальной активации. На всех вариантах было отмечено статистически достоверное влияние обработок электрохимически активированной водой на активность и вредоносность личинок колорадского жука. На лучшем варианте, где посадки картофеля обрабатывали анолитом с уровнем ОВП +500 мВ, число активных личинок колорадского жука было более, чем в 20 раз меньше контрольного варианта, где вегетационных обработок посадок картофеля не проводилось.

Исследованиями О. А. Пасько [70], в программу которых входило изучение метаболизма в семенах амаранта при воздействии электрохимически активированной водой, были изучены механизмы внутренних изменений биологических и физиологических состояний развивающихся растительных организмов под влиянием электрон-донорной или электрон-акцепторной активности электрохимически активированных сред. Было установлено, что замачивание семян амаранта в католите с уровнем ОВП –860 мВ и pH = 10,4 порождает в результате контакта с клеточной мембраной протондвижущую силу, ориентированную вовне клетки. Возникновение этой силы с достаточным порогом воздействия запускает активацию ферментов, способствующих росту и делению клеток.

Обобщение приведенных выше результатов исследований свидетельствует о существовании вполне определенных оптиму-

мов активации для разных растительных видов. Более того, оптимальные параметры активированных водных сред, применяющихся в сельскохозяйственном производстве, зависят от поставленной цели и технологии применения. Как показывает опыт, диапазон разброса оптимальных параметров активированных водных сред, в зависимости от этих факторов чрезвычайно широк и охватывает почти весь диапазон технических возможностей современных установок-активаторов. В связи с этим особую актуальность приобретает проблема сохранения электрохимически активированных водных сред.

Известно, что после завершения электролизной обработки воды или различных водных растворов физико-химические параметры выработанных продуктов – католита и анолита – непрерывно изменяются, пока не достигнут равновесных значений, определяемых концентрациями стабильных продуктов электролиза [8, 88]. В первую очередь это касается таких показателей, как ОВП или pH водной среды, однако, преобразования касаются и химического состава раствора.

В работах ряда исследователей [88, 86, 122] указывается, что восстановление pH воды, прошедшей катодную обработку (католита) занимает всего несколько часов и протекает существенно более динамично, чем релаксация ОВП. Наиболее вероятной причиной данного явления называется поглощение католитом углекислого газа из воздуха, компенсирующего щелочную среду электрохимически обработанной воды и в меньшей степени определяющей величину ОВП. В тоже время, усиление контакта электрохимически активированных водных сред с воздухом, например, методом барботирования, существенно усиливает динамику релаксации ОВП. Авторы объясняли это активизацией окисления растворенных в католите восстановителей свободным кислородом воздуха.

Другой обсуждаемой особенностью релаксации электрохимически активированной воды или разбавленных водных растворов является значительно большая динамика восстановления физико-химических свойств активированных католитов в сравнении с анолитами. Например, в опытах Г. А. Шрамко [122] исследовалась возможность сохранения католита и анолита в темной стеклянной бутыли с пластмассовой пробкой. Было установлено, что в неполные двое суток ОВП католита изменялся в диапазоне 800 мВ, от

–600 мВ на выходе из электролизера до +200 мВ. При этом отрицательные значения ОВП сохранялись не более 17 ч, а в течении 40 ч его значения восстанавливались до исходного уровня. Наблюдения за анолитом в сходных условиях показало изменение ОВП с +800 до +500 мВ в течение 45 ч.

Большинство исследователей подтверждают, что со временем физико-химические параметры католита и анолита восстанавливаются до равновесного уровня и их биологическая активность уменьшается [9, 14, 88, 122]. Указывается, что это создает объективные трудности их применения в сельскохозяйственном производстве. С целью консервации процессов восстановления физико-химических параметров электрохимически активированных водных сред было предложено использовать различные минеральные и даже органические вещества (например, нейтральные соли или глицин). Указывалось, что в результате такой консервации период релаксации электрохимически активированной воды может увеличиваться в несколько раз [88]. Еще одним из способов консервации электрохимически активированных водных сред является замораживание [8]. В частности, указывается на возможность быстрого замораживания католита и его хранения в таком состоянии длительное время. Последующее размораживание замороженного католита показало сохранение одного из ключевых параметров-характеристик активированных сред – окислительно-восстановительного потенциала. Следует признать, что указанные способы сохранения активационных потенциалов электрохимически обработанной воды и приготовленных на ее основе растворов либо трудно реализуемы, либо критически изменяют химический состав конечного продукта, в связи с чем могут весьма ограниченно применяться в сельскохозяйственном производстве.

Таким образом, эффективное применение электрохимически активированных сред в сельском хозяйстве связано с необходимостью обеспечения и сохранения вполне определенных параметров их активации. Современные методы и способы сохранения активационных параметров в силу своих технологических особенностей могут применяться лишь для ограниченных объемов электроактивированных сред. В тоже время в большей части литературных источников описываются лишь общие особенности релаксации электрохимически активированных водных сред и наблюдается существенный дефицит данных количественной

оценки закономерностей восстановления их физико-химических параметров. Это является одной из ключевых причин преимущественного развития технологий применения католита или анолита в режиме реального времени и проблем применения электрохимически активированных сред в сложных агротехнологиях, требующих сохранения или надежного прогнозирования активационных параметров на длительный период.

1.3. Анализ тенденций развития систем капельного орошения и опыт их использования для полива электрохимически активированной водой

В засушливых условиях юга России капельное орошение уже получило достаточно широкое распространение и площади возделывания сельскохозяйственных культур, орошаемых таким способом продолжают неуклонно увеличиваться. Активное продвижение и распространение капельного орошения в России и в мире, связано как с успехами в решении технических задач и совершенствования конструкции, так и рядом неоспоримых преимуществ, присущих этому способу полива [5, 22, 30, 37, 41]. Анализ наиболее активно обсуждаемых преимуществ капельного орошения позволяет их классифицировать в три основные группы:

повышение технологичности. Сюда можно отнести и новые возможности проведения агротехнических операций во время полива, автоматизацию и снижение трудозатрат, собственно, на полив, и повышение фитосанитарной чистоты посевов, позволяющей оптимизировать агротехнику культуры;

ресурсосбережение. Это и, в первую очередь, снижение затрат оросительной воды, и сокращение расходования агрохимикатов, а также пестицидов в результате их локального внесения в прикорневую зону растений, и снижение энергозатрат за счет проведения комбинированных, увлажнительных и подкормочных поливов;

снижение экологических рисков за счет предотвращения ирригационной эрозии, вторичного засоления из-за повышения уровня минерализованных грунтовых воды, за счет снижения объемов загрязнения токсичными остатками пестицидов и агрохимикатов.

Таким образом, современный уровень развития техники капельного орошения позволяет характеризовать этот способ как высокотехнологичный, водо- и ресурсосберегающий, а также и

эколого-ориентированный. По мнению [22, 40, 62, 93, 98, 99] дальнейшее развитие систем капельного орошения должно идти в направлении ликвидации недостатков, присущих, как и всем остальным, этому способу полива, а также более эффективного использования указанных выше преимуществ. Одним из перспективных путей развития современных систем капельного орошения [93, 98, 99] является реализация технической возможности использования для полива электрохимически активированной воды, что существенно усиливает экологические преимущества этого способа полива, повышает продуктивность возделываемых культур и способствует экономии расходуемых ресурсов.

Освоение возможности капельного полива сельскохозяйственных культур водой с измененным ОВП и управляемым pH тесно связано с изобретательской деятельностью В. Г. Абезина, А. Л. Конюшкова, работами В. В. Карпунина, С. Я. Семененко, А. Л. Сальникова, Е. И. Чушкиной и др. [74-84]. Принципиальное решение возможности полива сельскохозяйственных культур электрохимически активированной водой было найдено учеными Поволжского НИИ эколого-мелиоративных технологий, на что в 2003 г. был получен первый патент РФ на изобретение [74].

Согласно изобретению, агротехнологический комплекс подготовки оросительной воды или питательного раствора и его подачи в систему капельного орошения, конструктивно, наряду с емкостью для подготовки питательного раствора, фильтром, питательным наполнителем и высоконапорными гидроциклонами, снабжен диафрагменными электролизерами, коммуникационной сетью, запорными элементами в виде вентилей и средствами управления технологическим процессом в виде последовательно смонтированных в гидравлической сети трехходовых кранов. Указывается, что изобретение позволяет повысить производительность узла водоподготовки и увеличить функциональные возможности системы капельного орошения.

Следующие несколько лет работа велась в направлении совершенствования одного из ключевых компонентов системы – установки для электрохимической активации оросительной воды [76, 77]. Были разработаны несколько, принципиально отличающихся конструкций проточных электроактиваторов для системы капельного орошения. Конструкция предложенного электроактиватора включает корпус, разделенный перегородками на анодные

и катодные камеры. В диэлектрическом корпусе размещены соответствующие электроды катодной и анодной камер, снабженные водопроводящим трубопроводом и патрубками для раздельного отвода обработанной воды с отрицательным и положительным потенциалом. Патрубки для отвода воды снабжены вентилями для изменения величины расхода активированной воды. Катодные и анодные камеры разделены полупроницаемыми перегородками в виде гофр. Гофры ориентированы в вертикальной плоскости. Высота гофр равна расстоянию между анодом и катодом. Использование электроактиватора позволило повысить биологическую активность оросительной воды и способствовало существенному росту урожайности сельскохозяйственных культур за счет изменения потенциала оросительной воды.

Другая разработка [77] конструктивно включает коллекторные головки с подводящим и отводящими патрубками, которые смонтированы на катодной цилиндрической камере, имеющей канавки на внутренней поверхности. Анод выполнен в виде стержня, на наружной поверхности которого имеются канавки. Между выступами катода и анода установлена полупроницаемая диафрагма. Катодная камера выполнена разъемной с Т-образными эластичными уплотнительными прокладками. В результате проведенных конструктивных преобразований авторам удалось добиться снижения потребляемой энергии для получения заданного потенциала активации.

Следующим этапом стала комплексная разработка инновационных конструкций систем капельного орошения, в которых реализуется возможность полива водой с измененным ОВП и регулируемым pH [80, 82]. Разработанные системы, наряду с водоисточником, насосной станцией, фильтром, бассейном-отстойником и оросительной сетью, включают модуль активации оросительной воды. Согласно одной из предложенных разработок модуль активации воды включает генератор постоянного тока, диафрагменный электролизер и переключатель потенциала электродов. Электролизер включает коаксиально расположенные электроды, полупроницаемую диафрагму между ними. Электроды установлены в диэлектрическом кожухе. Наружный электрод выполнен в виде отрезка трубы из нержавеющей стали, стойкой к электрохимической коррозии. На концах трубы выполнена резьба для соединения с подводящим и отводящим трубопроводами. Оросительная сеть состоит

из магистральных и поливных трубопроводов. Поливные трубопроводы оборудованы саморегулирующимися водовыпусками и инъекторами-активаторами, состоящими из конического кожуха с водовыпускными отверстиями. Водовыпускные отверстия направлены параллельно поверхности земли. Во внутренней полости кожуха установлен конический шнек-активатор, закрепленный на цилиндрическом стержне. Шнек-активатор имеет коническую входную часть. Конический кожух сопряжен с подводящим патрубком с помощью диффузора. Такая конструкция позволяет проводить полив водой с заданным активационным потенциалом.

Другая перспективная конструкция системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды была разработана для плодово-ягодных и лесных питомников [82]. Система капельного орошения для плодово-ягодных и лесных питомников представлена совокупностью гидравлически соединенных между собой водоисточником, насосной станцией, фильтром, измерительной и запорной оросительной сетью, и отличается от известных конструкций тем, что насосы насосной станции соединены с водонапорной башней-отстойннком, гидравлически соединенной с модулем электроактивации воды, включающий генератор постоянного тока или выпрямитель при работе от сети и проточный электроактиватор, за которым через присоединительные трубопроводы установлен гидроподкормщик, а распределительная сеть соединена с поливными трубопроводами, оборудованными инъекторами-дозаторами-капельницами. Практическая апробация предложенной системы показала возможность существенного повышения качества посадочного материала для плодовых и лесных культур.

В настоящее время активно осваиваются эффективные способы использования преимуществ конструкций капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды. Так, по результатам исследований [79], был предложен способ возделывания сельхозкультур при капельном орошении. Способ, в частности, включает раскладку поливного трубопровода, посев семян сельхозкультуры в точках размещения водовыпусков и вегетационные поливы. Первый полив посевов в соответствии с предложенной технологией производится поливной водой – анолитом – с потенциалом +600…+700 мВ. Далее при снижении влажности почвы производят повторный полив католитом элек-

троактивированной водой с потенциалом –150…–300 мВ. Последующие поливы выполняют для поддержания влажности не менее 70-80 % НВ, периодически чередуя анолит с потенциалом +500…+600 мВ и католит с потенциалом –150...–200 мВ. Указывается, что предложенный способ позволяет улучшить качество сельскохозяйственной продукции и увеличить урожайность.

Другими учеными [83] был предложен перспективный способ возделывания овощных и бахчевых культур, предполагающий использование для полива оросительной воды с электрохимически модифицированным ОВП. Указывается, что предлагаемый способ обеспечивает получение стабильных урожаев в засушливых условиях и на бедных землях при ограниченных севооборотах, снижение антропогенной нагрузки на почву, экономию посевного материала и удобрений, повышение потребительских свойств плодов возделываемых культур.

В работах [105, 116] указывается на эффективность разработанной технологии капельного орошения томатов с применением электрохимически активированной воды. Было установлено, что применение электрохимически активированной воды оказывает существенное влияние на весь ход роста и развития томатов, а также, опосредовано, на водопотребление и использование водных ресурсов. Введение приема электрохимической активации оросительной воды с каждым пятым вегетационным поливом при поочередном применении анолита и католита в равных пропорциях (анолит, 25 % – природная оросительная вода, 50 % – католит, 25 %) обеспечивает сохранение уровня продуктивности томатов не ниже 90 т/га без использования фунгицидов. Использование технологии поочередного введения анолита и католита в пропорции 1:4 (анолит, 10 % – природная оросительная вода, 50 % – католит, 40 %) с каждым четвертым или каждым третьим вегетационным поливом позволяет отказаться от использования препаратов группы фунгицидов с возможностью одновременного повышения урожайности томатов на 8,1-8,2 %. Кроме того, использование электрохимически активированной воды при капельном орошении томатов позволяет повысить эффективность использования водных ресурсов и снизить их расход на формирование единицы урожая до 58,1-59,4 $м^3$/т.

Обобщение результатов проведенных исследований убедительно показывает перспективность развития инновационных тех-

нологий, основанных на использовании феномена электрохимической активации воды и слабых водных растворов. Сегодня уже получены убедительные доказательства эффективности использования электрохимически активированной воды в ряде отраслей народного хозяйства и, в т. ч при производстве сельхозпродукции. Показана эффективность применения электрохимически активированных растворов при лечении животных и в кормопроизводстве, для фитосанитарного оздоровления посевов зерновых и овощных культур, для обработки семян сельскохозяйственных культур и клубней картофеля, для приготовления высокоактивных стимуляторов роста и при использовании современных технологий фертигации. Последние разработки показывают перспективы использования электрохимически активированной воды для полива сельскохозяйственных культур. В частности, указывается на возможность снижения доз и номенклатуры применяемых пестицидов и, соответственно, экологизации орошаемого земледелия; на улучшение структуры и качества производимой продукции; на возможность существенного повышения общей продуктивности посевов. В тоже время отмечаются и объективно существующие проблемы развития технологий, основанных на применении методов электрохимической активации. Одна из ключевых проблем применения этого феномена непосредственно связана с самой природой электрохимической активации, определяющейся метастабильным состоянием активированных растворов и динамичным изменением (релаксацией) его свойств с течением времени. Отмечается, что динамика релаксации электрохимически активированной воды зависит от свойств окружающей среды и неодинакова для систем со свободным и ограниченным доступом воздуха. Вероятно, с этим связано и то, что успешная апробация идеи применения электрохимически активированной воды для полива сельскохозяйственных культур была реализована только с использованием систем капельного орошения, конструкции которых представляют собой систему закрытых водоводов.

Анализ результатов большинства исследований показывает, что эффективное применение электрохимически активированных сред в сельском хозяйстве, связано с необходимостью обеспечения и сохранения вполне определенных параметров их активации. Современные методы и способы сохранения активационных параметров в силу своих технологических особенностей могут применяться лишь для ограниченных объемов электроактивиро-

ванных сред. В тоже время в большей части литературных источников описываются лишь общие особенности релаксации электрохимически активированных водных сред и наблюдается существенный дефицит данных количественной оценки закономерностей восстановления их физико-химических параметров. Это является одной из ключевых причин преимущественного развития технологий применения католита или анолита в режиме реального времени и проблем применения электрохимически активированных сред в сложных агротехнологиях, требующих сохранения или надежного прогнозирования активационных параметров на длительный период. К таким сложным технологиям следует отнести и технологию капельного орошения сельскохозяйственных культур электрохимически активированной водой.

Сегодня системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды прошли довольно серьезный путь развития от идеи, включая поэтапное техническое совершенствование конструкций отдельных узлов и системы в целом, до практической реализации с разработкой регламентов применения электрохимически активированной оросительной воды при проведении вегетационных поливов. Наряду с разработкой эффективных конструктивных решений отсутствуют адаптированные алгоритмы и методы проектирования систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды. Причем из-за введения дополнительных требований, определяющих необходимость сохранения активационных потенциалов электроактивированной воды в пределах оптимального диапазона, адаптация методов проектирования касается не только узла электрохимической обработки оросительной воды, но всей системы в целом.

2. КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМ КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ С МОДУЛЕМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ОРОСИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

2.1. Конструктивные особенности систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды

Целевыми функциями современных конструкций систем капельного орошения являются:

доставка и подача оросительной воды в прикорневую зону растений возделываемых культур;

дозированное внесение растворов минеральных удобрений в соответствии с биологическими потребностями возделываемых культур;

дозированное внесение системных средств защиты растений с поливной водой.

К целевым функциям конструкций систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды, кроме указанных, следует отнести:

направленное изменение свойств оросительной воды при помощи электроактивационной установки, доставка и подача оросительной воды с измененными, заданными агротехническими условиями, параметрами pH и ОВП непосредственно в прикорневую зону растений;

дозированное внесение, приготовленных на основе электрохимически активированной воды, растворов минеральных удобрений.

Необходимость последовательной реализации новых функций систем капельного орошения с сохранением качественных и количественных характеристик основных целевых функций определяет требования и исходные данные для создания конструкции системы капельного орошения с модулем электрохимически активированной воды.

Типизированная схема современных систем капельного орошения, представлена на рис. 2.1. Основными конструктивны-

ми элементами таких систем являются:

комплекс водозабора и подачи оросительной воды;

комплекс водоподготовки (КВ);

водоподводящий комплекс;

поливные модули капельного орошения, включая поливные трубопроводы со встроенными капельницами.

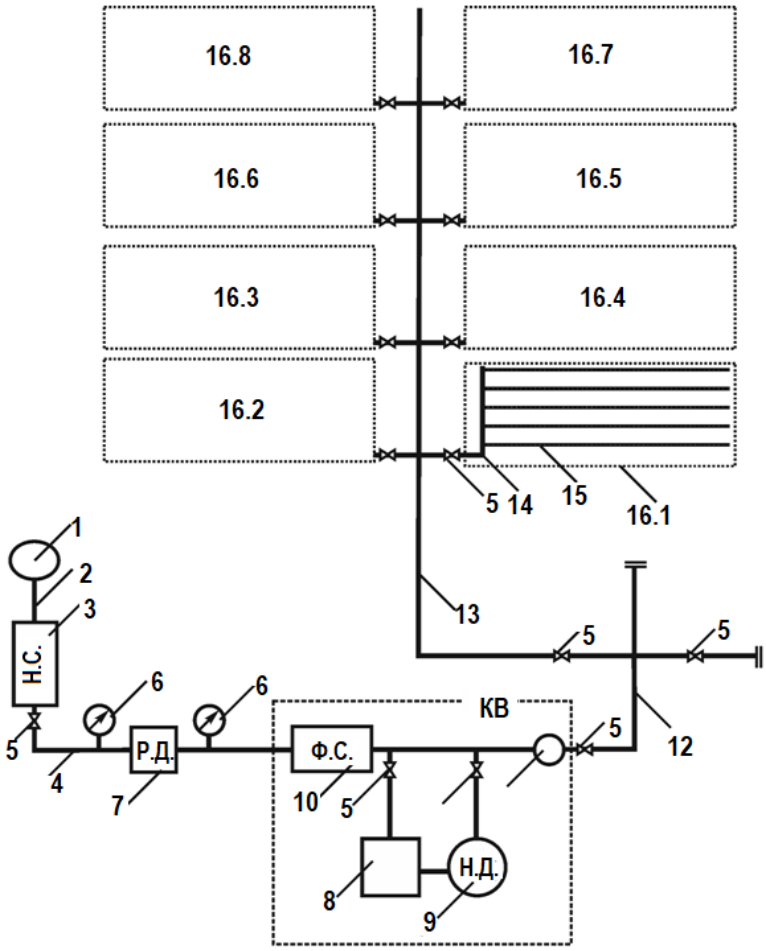

Рис. 2.1. Обобщенная схема современных конструкций систем капельного орошения:

1 – водоисточник; 2 – всасывающая линия; 3 – насосная станция; 4 – напорная линия; 5 – запорный вентиль; 6 – манометр; 7 – регулятор давления; 8 – емкость для приготовления питательного раствора; 9 – насос-дозатор; 10 – фильтростанция; 11 – счетчик-водомер; 12 – магистральный трубопровод, 13 – распределитель 1-го порядка, 14 – распределитель последнего порядка, 15 – поливной трубопровод с капельницами; 16.1-16.8 – поливные модули системы капельного орошения

Все указанные элементы между собой гидравлически соединены.

Комплекс водозабора и подачи оросительной воды в систему капельного орошения выполняется по типизированной схеме. В качестве источника воды для полива сельскохозяйственных культур могут быть использованы водоподводящие сооружения центральной оросительной сети, естественные открытые водоемы, искусственные открытые водоемы, подземные воды. Качество воды из источника должно соответствовать требованиям, предъявляемым к поливной воде. Оборудование комплекса водозабора и подачи оросительной воды в систему капельного орошения компонуется в зависимости от типа водоисточника и

включает объективно-ситуационные конструкции водозаборных сооружений, насос, регулятор давления и контрольно-измерительную арматуру. Насос системы капельного орошения может иметь электрический или механический привод и обеспечивает на выходе заданный рабочий напор. Для поддержания постоянного напора на выходе из рассматриваемого узла систему целесообразно комплектовать автоматизированными регуляторами давления с мембранной конструкцией компенсации перепадов напора. Для организации визуального или автоматизированного контроля работы комплекса водозабора и подачи оросительной воды устанавливается датчик давления.

Конструктивные узлы КВ целесообразно размещать на единой площадке, включая: фильтрующую станцию, узел подготовки и подачи питательной смеси, контрольно-измерительную и запорную арматуру.

Фильтрующая станция системы капельного орошения, в зависимости от качества воды, подаваемой из водоисточника, может выполняться по одно- или многоступенчатой схеме, включая фильтр тонкой очистки, песчано-гравийный фильтр, фильтр грубой очистки. Фильтр тонкой очитки конструктивно выполняется с сетчатым фильтрующим элементом, который легко извлекается для манипуляций по очистке и промывке. Фильтр грубой очистки устанавливается при сильном загрязнении воды механическими или не растворяемыми органическими примесями.

Резервуар для подготовки питательной смеси гидравлически соединяется с насосом-дозатором и обеспечивает ввод раствора питательных элементов в сеть транспортирующих трубопроводов системы капельного орошения. Целесообразно комплекс водоподготовки и приготовления питательной смеси оборудовать счетчиком-расходомером, позволяющим вести физический контроль расхода оросительной воды или раствора питательной смеси при осуществлении поливов.

Система транспортирования оросительной воды, в зависимости от компоновки поливных модулей в условиях конкретного хозяйствующего субъекта, включает магистральный трубопровод и распределительные трубопроводы разных порядков. Поливные модули представляют собой систему напорных трубопроводов, включающую распределительный трубопровод последнего порядка с запорной арматурой и сеть поливных трубопроводов с

капельными водовыпусками. Запорная арматура позволяет проводить вегетационные или удобрительные поливы дифференцированно, каждым из поливных модулей по отдельности.

Конструктивной особенностью предлагаемой системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды является выполнение КВ по двухступенчатой схеме (рис. 2.2). При этом в первую ступень входят все узлы, присущие современным конструкциям систем капельного орошения, а вторая ступень КВ представлена установкой для электрохимической активации оросительной воды.

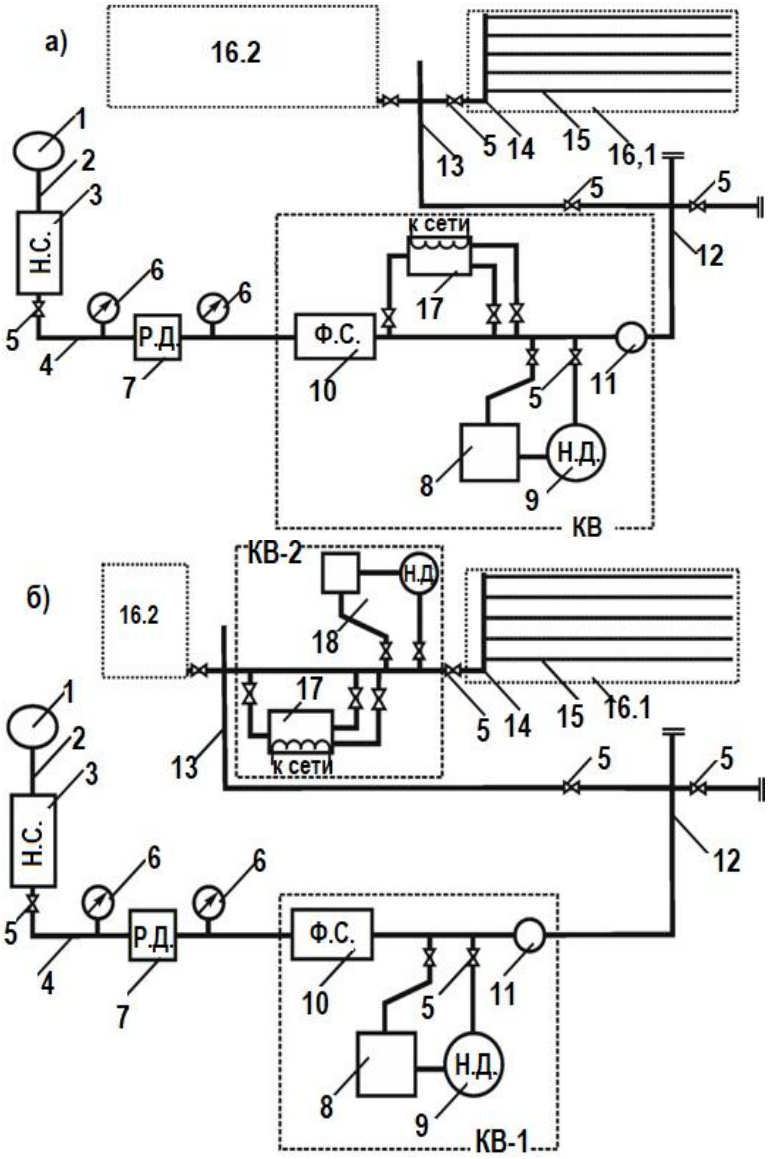

Рис. 2.2. Система капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды:

1 – водоисточник; 2 – всасывающая линия; 3 – насосная станция; 4 – напорная линия; 5 – запорный вентиль; 6 – манометр; 7 – регулятор давления; 8 – емкость для приготовления питательного раствора; 9 – насос-дозатор; 10 – фильтростанция; 11 — счетчик-водомер; 12 – магистральный трубопровод, 13 – распределитель 1-го порядка, 14 – распределитель последнего порядка, 15 – поливной трубопровод с капельницами; 16.1-16.8 – поливные модули системы капельного орошения, 17 – электроактивационная установка, 18 – дополнительный модуль приготовления питательного раствора

Территориально первая и вторая ступень КВ могут выполняться по объединенной или пространственно-разнесенной схеме.

В первом случае, установка для электрохимической активации оросительной воды параллельно подключается к напорному водо-

воду сразу после узла водоочистки (см. рис. 2.2а). При этом узел подготовки и подачи питательной смеси целесообразно размещать после установки для электрохимической активации оросительной воды, что обеспечивает возможность реализации технологического процесса полива питательным раствором, приготовленным на основе электрохимически активированной оросительной воды. Преимущества такой схемы компоновки системы капельного орошения с модулем электрохимической активации воды очевидны:

реализуется возможность централизованной подачи электрохимически активированной воды к различным поливным модулям;

используется централизованный источник электроэнергии;

реализуется возможность централизованного приготовления и подачи питательной смеси на основе электрохимически активированной воды.

Следует признать, что из-за присущего электрохимически активированным средам свойства релаксации (восстановления) параметров активации, такая схема компоновки системы капельного орошения может быть реализована лишь на небольших, территориально сгруппированных участках. При увеличении расстояния от электроактивационной установки до поливного модуля энергоэффективность технологического процесса существенно снижается, а при достижении определенного расстояния – ставится под угрозу выполнение агротехнических требований. В этом случае целесообразно использовать территориально разнесенную схему компоновки двухступенчатого КВ (см. рис. 2.2б).

При использовании разнесенной схемы компоновки вторая ступень КВ дооборудуется источником электроэнергии (генератор постоянного тока, выпрямитель – в случает наличия подключения к электрический сети) и дополнительным узлом подготовки и дозированной подачи питательной смеси. При использовании разнесенной схемы компоновки вторая ступень КВ, включающая указанные выше узлы может выполняться мобильной. В этом случае возможно поочередное присоединение узлов второй ступени водоподготовки непосредственно к поливным модулям в последовательности, заданной агропроизводственным технологическим процессом.

Установка для электрохимической активации оросительной воды в составе второй ступени КВ представляет собой один или несколько параллельно гидравлически соединенных между собой электроактивационных модулей проточного типа. Конструкция

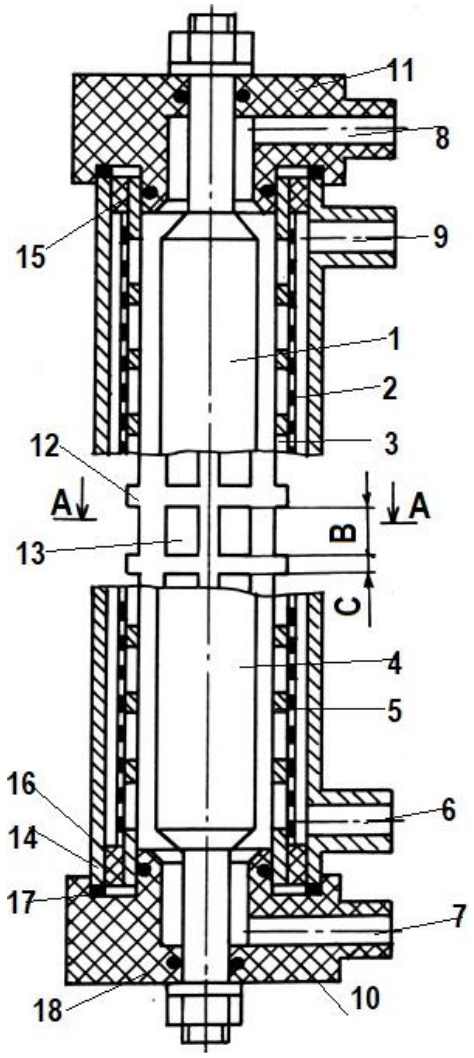

Рис. 2.3. Установка для электрохимической активации воды

электроактивационного модуля представлена на рис. 2.3.

Установка включает стержневой 1 и цилиндрический 2 электроды, трубчатую диафрагму 3, которая разделяет межэлектродное пространство на две электродные камеры 4, 5. Для подвода воды предназначены патрубки 6, 7, а для отвода – патрубки 8, 9. Коаксиальное расположение электродов 1, 2 и диафрагмы 3 обеспечивается втулками 10, 11 из диэлектрического материала, контактирующих с внутренней поверхностью трубчатого каркаса 12, на котором закреплена диафрагма 3. В трубчатом каркасе 12 выполнены сквозные прорези 13, а по торцам на наружной поверхности закреплены электроизоляционные кольца 14, 15. Герметизация электродных камер 4, 5 выполнена посредством уплотнительных колец 16, 17, 18.

Трубчатый каркас может быть изготовлен из нержавеющей стали, титана с покрытием наружной и внутренней поверхности фторопластом (фторлоном) для придания ему электроизоляционных свойств.

В качестве композитного материала для каркаса применим стеклопластик типа GRP, используемый в производстве труб хозяйственно-питьевого назначения, обладающего диэлектрическими свойствами и имеющего сопоставимые со сталью прочностные характеристики. Прорези в трубчатом каркасе могут быть выполнены вырубкой, фрезерованием, лазерной резкой.

Внутренний диаметр ($D_к$, мм) полого цилиндрического катода 2 определяется из соотношения:

$$D_к = 0{,}6 \cdot k \sqrt[4]{Q^2 / H_0 \left(1 - 11{,}5 \cdot 10^{-4} L \cdot k_1\right) / \Delta_1 \sqrt[3]{\Delta_1}} \qquad (2.1)$$

где k – коэффициент пропорциональности, $м^{\frac{1}{12}} с^{\frac{1}{2}}$, Q – макси-

мальная производительность установки, м^3/с, H_0 – напор воды перед входом в катодную камеру, м, L – длина катодной камеры, м; k_1 – коэффициент пропорциональности, м$^{-1}$, Δ_1 – зазор между внутренней поверхностью полого цилиндрического катода и диафрагмой, $\Delta_1 \leq 0{,}004$ м.

При этом величина скорости ($V_к$) движения воды в катодной камере будет равной:

$$V_к = \frac{1{,}27Q}{D_к^2 - D_d^2}, \qquad (2.2)$$

где D_d – внешний диаметр диафрагмы, м, который определится из зависимости:

$$D_d = (D_к - 2\Delta_1) \qquad (2.3)$$

Для расчета диаметра стержневого анода (D_a, м) может быть использовано следующее выражение:

$$D_a = D_к - 2(\Delta_1 + \Delta_2 + \delta), \qquad (2.4)$$

где Δ_2 – зазор между поверхностью анода и внутренней поверхностью диафрагмы, $\Delta_2 \leq 0{,}004$ м, δ – толщина диафрагмы, м

Входной патрубок катодной камеры выполняется в виде полого цилиндра, длину которого целесообразно принимать больше трех диаметров входного патрубка, а диаметр входного патрубка принимать равным $0{,}908D_к$.

Патрубки для отвода воды из катодной и анодной камер конструктивно комплектуются расходомерами и вентилями для регулирования величины расхода активированной воды.

Принципиальная схема электропитания модулей-активаторов оросительной воды включает источник электрического тока 13, электрически соединенный с анодом 14 и катодом 15 через узел коммутации (рис. 2.4).

Узел коммутации представлен разделительным трансформатором 16, регулятором напряжения 17, диодным мостом 18, вольтметром 19 и амперметром 20. Установка работает следующим образом. Обрабатываемая вода из напорного источника под рабочим давлением подается через патрубки в катодную и анодную камеры. При подаче потенциала на анод и катод в соответствующих камерах начинается процесс электролиза воды. В результате этого процесса в анодной камере получают анолит, а в катодной камере – католит с установленными параметрами активации.

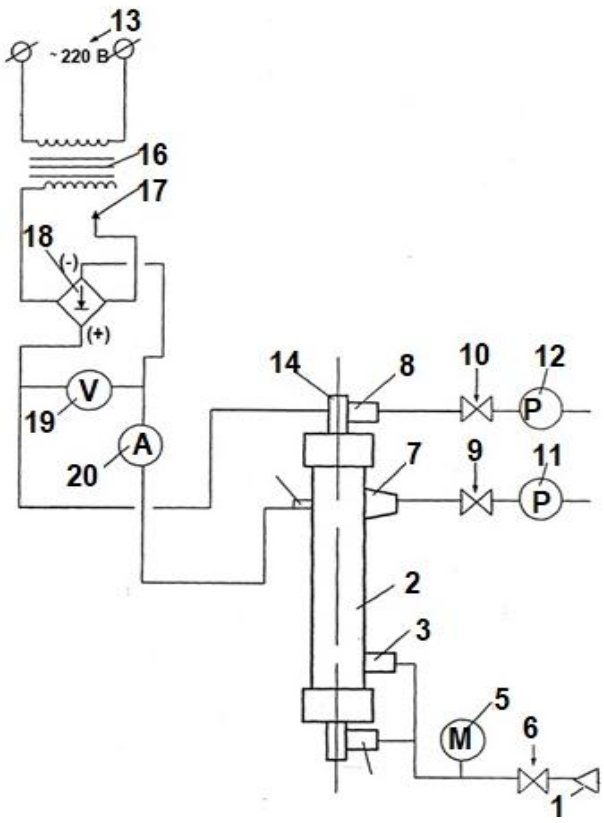

Рис. 2.4. Принципиальная схема подключения экспериментального модуля установки для электрохимический активации оросительной воды

При правильном согласовании всех параметров предложенная конструкция системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды обеспечивает поддержание заданных режимов водообеспечения и сохранение активационных потенциалов оросительной воды и приготовленных на ее основе растворов минеральных удобрений в установленных агротехническими требованиями пределах.

2.2. Перспективные технические решения конструкций модуля

Капельное орошение в сочетании с реактором с помощью систем увлажнителей, уложенных над почвой, обеспечивает распространение активированной воды к основной массе корней растений, тем самым, осуществляя наиболее благоприятный режим орошения для сельскохозяйственных культур.

Изменение ОВП оросительной воды позволяет создавать благоприятные условия для роста и развития сельскохозяйственных культур и значительного повышения их урожайности.

Направленное изменение ОВП оросительной воды обеспечивается установками для электрохимической активации, конструкции которых разработаны в Поволжском НИИ эколого-мелиоративных технологий, их устройство и принцип действия приво-

дится в настоящей работе. Следует отметить, что установки изготавливаются из экологически чистых материалов, по доступной не дорогостоящей технологии, являются экономически эффективными и конкурентоспособными. Конструкции установок защищены патентами на изобретения.

Для систем капельного орошения может использоваться установка, показанная на рис. 2.5. (а, б). В позиции (а) рисунка изображен продольно-вертикальный разрез установки для электрохимической активации оросительной воды, преимущественно для систем капельного орошения. В позиции (б) – сечение А-А, гидравлическое соединение анодных и катодных камер посредством вентилей с системой капельного орошения.

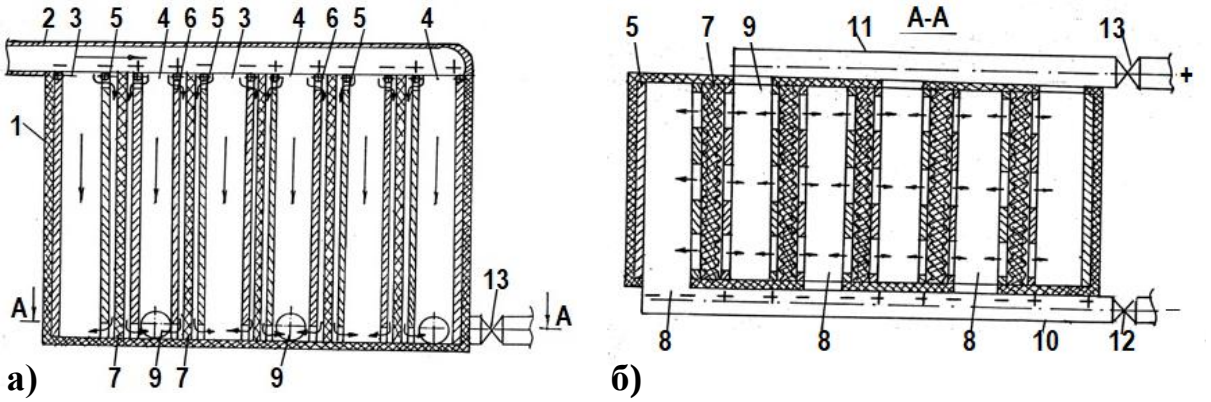

Рис. 2.5. Установка для электрохимической активации оросительной воды преимущественно для систем капельного орошения:

1 – корпус; 2 – водоподводящий трубопровод; 3 – катодная камера; 4 – анодная камера; 5, 6 – катод, анод; 7 – перегородки; 8 – патрубки для католита; 9 – патрубок для анолита; 10 – трубопровод католита; 11 – трубопровод анолита; 12, 13 – вентили

Установка для электрохимической активации воды, преимущественно для систем капельного состоит из корпуса 1, выполненного из диэлектрического материала, в крышке которого смонтирован водоподводящий трубопровод 2. Он обеспечивает подачу воды в катодные 3 и анодные 4 камеры. В каждой камере 3 (4) установлено по два перфорированных катода 5 и анода 6. Катодные и анодные камеры 3 и 4 разделены между собой полупроницаемыми перегородками 7, которые выполнены в виде гофр. Гофры перегородок 7 выполнены в вертикальной плоскости с высотой, равной расстоянию между катодом и анодом, что обеспечивает заданное расстояние между анодом и катодом. В нижней части корпуса 1 предусмотрены патрубки 8 для отвода во-

ды с отрицательным потенциалом (католит) и положительным 9 (анолит). Патрубки соединены с трубопроводами для подачи воды в оросительную сеть системы капельного орошения. Катодные и анодные камеры 3, 4 снабжены общим водоподводящим трубопроводом. Для подачи католита предусмотрен трубопровод 10, установленный с одной стороны корпуса 1, для анолита – трубопровод 11, размещенный с противоположной стороны корпуса 1. Патрубки для отвода воды снабжены вентилями 12 и 13 для изменения величины расхода активированной воды.

Установка для электрохимической активации воды работает следующим образом.

В системе капельного орошения после фильтра тонкой очистки воды от растительного сора, взвесей и минеральных примесей поток под рабочим давлением от 0,2 МПа до 0,8 МПа направляют по водоподводящему трубопроводу 2 в корпус 1 установки. Обрабатываемая вода поступает в катодные и анодные камеры 3 и 4. При подаче потенциала напряжением 24 В на катоды 5 и аноды 6 в камерах 3 и 4 начинается процесс электролиза воды. Вследствие этого в анодной камере 4 получают анолит с pH 3,1-4,6 и ОВП, равным +430…+980 МВ, а в катодной камере 3 – католит с pH 11,0-11,7 и ОВП в пределах –870…–960 МВ. Обработанная вода в виде анолита и католита поступает через вентили 12 и 13 в распределительные сети системы капельного орошения.

Вентилями 12 и 13 изменяют оросительную норму соответственно с рекомендациями для долевой подачи в различные периоды роста и развития растений.

При капельном орошении овощных культур, в частности томата сорта "Новичок", урожайность по сравнению с контролем увеличилась на 25-43 % при той же норме расхода воды на 1 га. Таким образом, приведенные выше сведения свидетельствуют о том, что установленные в корпусе установки перегородки в виде гофр способствуют интенсивному разделению воды с различным ОВП и обеспечивают получение устойчивых урожаев овощных культур при капельном орошении (табл. 2.1).

Создание вихревого тока воды при воздействии электрического потенциала и уменьшение потребляемой энергии обеспечивается на установке для электрохимической активации воды, приведенной на рис. 2.6. (а, б, в). В позиции (а) изображен продольно-вертикальный разрез установки для элетрохимической

активации воды. В позиции (б) показано сечение А-А, гидравлическое соединение анодных и катодных камер с помощью вентилей с системами потребления активированной воды. В позиции (в) представлено сечение Б-Б, подключение электродов к шинам.

Таблица 2.1

Сравнительная характеристика оросительной воды в анодной и катодной камерах

Показатель	Базовая конструкция (плоские)	Предполагаемая конструкция (в виде гофр)
Минерализация воды, г/л	0,77	0,77
Сила тока, а	1,32	1,26
Напряжение, В	24	24
Расход воды, л/с	115,0-120,0	210-240
Время электрохимической обработки, мин	20-30	5-15
Параметры анолита: pH ОВП, МВ	 4,6 430	 3,1 980
Параметры католита: pH ОВП, МВ	 11,0 870	 11,7 960
Энергозатраты, кВт-ч/м^3	1,1-1,03	0,47-0,63

Установка для электрохимической активации воды, используемая для питьевых целей, в промышленности, медицине, микроэлектронике, лазерной технике и орошения сельскохозяйственных культур в системах капельного орошении с окислительно-восстановительными свойствами для обеспечения повышения биологической активности и оптимальных условий произрастания сельхозкультур с целью получения максимальной урожайности, состоит из корпуса 1, выполненного из диэлектрического материала, в крышке которого смонтирован водоподводящий трубопровод 2, обеспечивающий подачу воды в катодные 3 и анодные 4 камеры. В каждой камере 3 (4) установлено по два перфорированных катода 5 и анода 6. Катодные 3 и анодные 4 камеры разделены между собой прокладками (сепараторами) 7 из микропористой пластмассы. В нижней части корпуса 1 выполнены патрубки 8 для отвода воды с отрицательным потенциалом (католит) и патрубки 9 для отвода воды с положительным потенциалом (анолит).

Трубопроводы 10, 11 предназначены для отвода католита и

анолита через регулировочные вентили 12, 13 соответствующим потребителям активированной воды.

Электроды 6 положительного потенциала соединены с шиной 14 положительного потенциала, а электроды 5 соединены с шиной 15 отрицательного потенциала. В анодных камерах 4 установлены вставки 16 из профилированного листового металла, а в катодных камерах 3 вставки 17 из профилированного листового металла.

Вставки 16 и 17 соединены с анодами 6 и катодами 5 и несут соответствующий потенциал камеры, в которой они установлены.

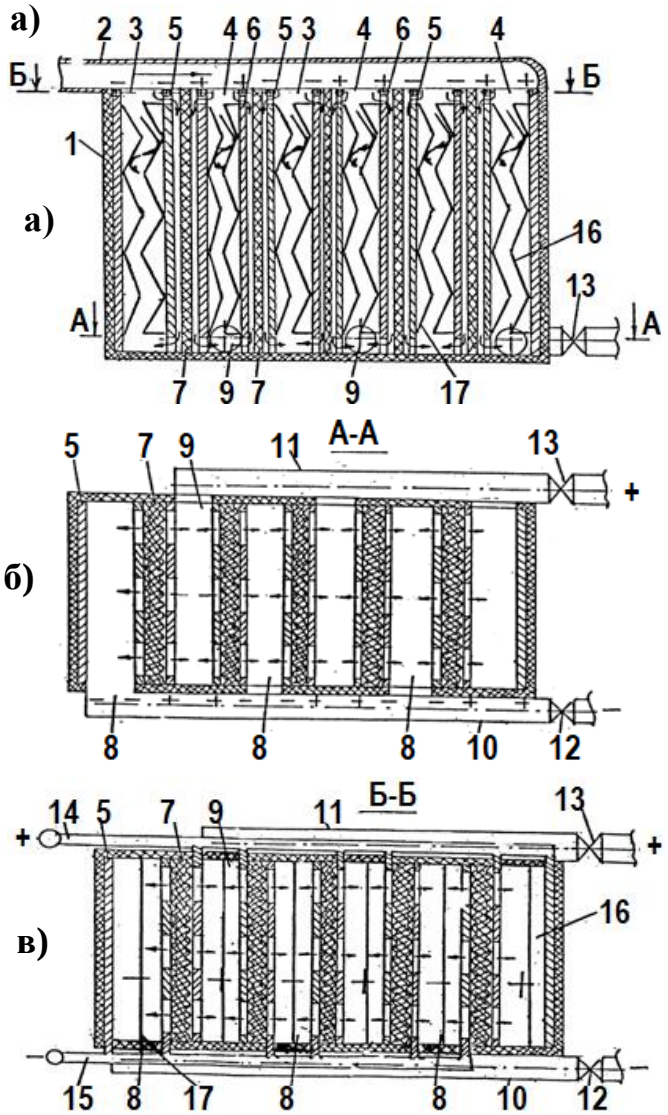

Рис. 2.6. Установка для электрохимической активации воды:

1 – корпус; 2 – водоподводящий трубопровод; 3, 4 – катодные и анодные камеры; 5, 6 – катод, анод; 7, 8 – сепараторы; 8 – патрубок для католита; 9 – патрубок для анолита; 10, 11 – отводящие трубопроводы; 12, 13 – регулировочные вентили; 14 – шина положительного потенциала; 15 – шина отрицательного потенциала; 16, 17 – вставки

Многопоточная установка для электрохимической активации воды работает следующим образом. В системе водоснабжения или капельного орошения после очистки от посторонних примесей поток под рабочим давлением, которое должно быть больше в два раза необходимого давления в выходных трубопро-

водах 10, 11, направляется по водоподводящему трубопроводу 2 в корпус установки. Обрабатываемая вода поступает в катодные 3 и анодные 4 камеры. Одновременно с подачей воды на электроды подается потенциал напряжением 12-24 В. При этом поток воды, проходя по каналам между вставками 16, 17 из профилированного листового металла, приобретает свойства турбулентного движения, что увеличивает возможность контакта всех частиц потока с отрицательно и положительно заряженными электродами 5, 6, что соответственно повышает эффективность электрохимической обработки воды и снижение потребления энергии на обработку от воздействия отрицательного потенциала в катодной камере 3 получают католит с pH 10,0-2,0 и ОВП в пределах –850…–1100 мВ, а в анодной камере анолит с pH 3,0-5,0 и ОВП, равным +560…+1100 мВ. При этом удельные затраты количества электричества составляют не более 400 кулон на литр (Кл/л). Обработанная вода в виде анолита и католита поступает через вентили 12, 13 потребителям. При этом расход воды может регулироваться, что вызывает изменение pH и ОВП. Проведенными испытаниями установлено, что обработка семян сельскохозяйственных культур анолитом обеспечивает уничтожение большинства болезнетворных микробов и вредителей, а обработка семян католитом увеличивает их всхожесть и энергию прорастания.

Еще одно техническое решение по конструкции установки для электрохимической активации воды и водных растворов, преимущественно для систем капельного орошения, представлено на рис. 2.7. (а, б). В позиции (а) – изображено устройство для электрохимической активации воды и водных растворов, диаметрально-вертикальный разрез. В позиции (б) показано горизонтальное сечение.

Конструкция состоит из коллекторной головки 1 с подводящим патрубком 2, который обеспечивает подачу воды в катодную и анодную камеры. Катодная камера 3 выполнена цилиндрической разъемной с профрезерованными впадинами 4 на внутренней поверхности. Анод 5 выполнен в виде стержня, на наружной поверхности которого профрезерованы канавки 6. Между выступами катода 3 и анода 5 установлена полупроницаемая диафрагма 7. Нижняя коллекторная головка 8 имеет патрубок 9 для отвода воды с отрицательным потенциалом и патрубок 10 для отвода воды с положительным потенциалом. Между половинами катода 3 установлены Т-образные эластичные уплотнительные прокладки 11, а между

катодом 3 и коллекторными головками 1 и 8 предусмотрены уплотнительные прокладки 12. Торцовые части анода 5 изолированы от коллекторных головок диэлектрическими прокладками 13, а боковые поверхности резьбовых частей анода изолированы от коллекторных головок диэлектрическими втулками 14. Для соединения установки используются гайки 15 и резьбовые стержни 16.

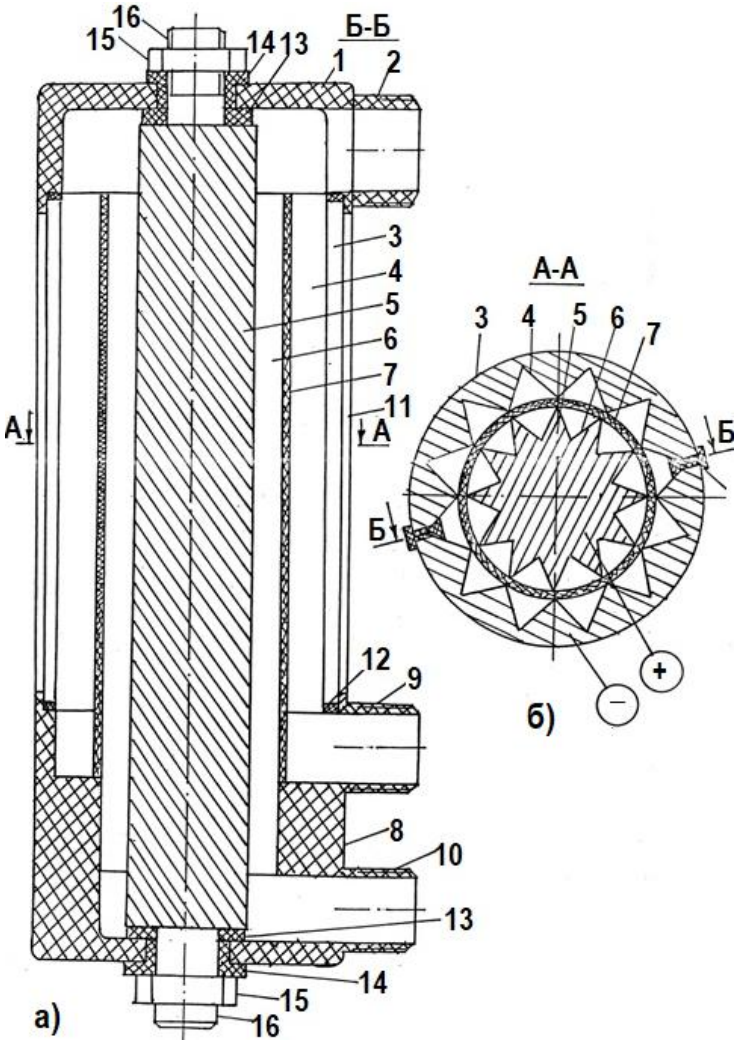

Рис. 2.7. Установка для электрохимической активации воды и водных растворов:

1 – коллекторная головка; 2 – подводящий патрубок; 3 – катодная камера; 4 – впадины; 5 – анод; 6 – канавки; 7 – диафрагма; 8 – коллекторная головка; 9, 10 – отводящие патрубки; 11 – уплотнительные прокладки; 12 – уплотнительная прокладка; 13 – прокладка; 14 – втулка; 15 – гайки; 16 – резьбовые стержни

Установка работает следующим образом. Подводящий патрубок 2 собранной установки подсоединяется к напорному трубопроводу насосной установки, а отводящие патрубки 9 и 10 подключаются к системам, требующим воды с отрицательным или положительным потенциалом. Катод 3 соединяется с отрицательным потенциалом источника тока, а анод 5 с положительным потенциалом.

В системе капельного орошения после фильтра тонкой очистки от растительного сора, взвесей и минеральных примесей поток воды под рабочим давлением 0,1-0,4 МПа направляют по подводящему патрубку 2 в кольцевое пространство коллекторной головки 1.

Под действием рабочего давления, а так же сил гравитации вода поступает в пространства впадин катода 4 и анода 6. Под воздействием потенциала напряжения 24 В на катод 3 и анод 5 происходит процесс электролиза воды. Вследствие этого в катодной камере, состоящей из впадин 4, получают католит с pH 7,0-12,0 и ОВП в пределах –600…–1000 МВ, а в анодной с pH 4,5-6,0 и ОВП в пределах +500…+900 МВ.

Обработанная вода в виде католита и анолита поступает в распределительную сеть системы капельного орошения. При капельном орошении овощных культур активированной водой повышается урожайность томатов на 25 %, крупность плодов на 40 %, а также стимулируется прорастание семян, всхожесть и общая выживаемость растений.

В следующем из рассматриваемых перспективных технических решений увеличение площади контакта электродов с обрабатываемой водой позволяет снизить потребление электроэнергии и улучшить параметры электрохимической активации оросительной воды (рис. 2.8а, б). В позиции (а) изображено устройство для электрохимической активации воды и водных растворов, диаметрально-вертикальный разрез. В позиции (б) показано горизонтальное сечение.

Устройство для электрохимической активации воды и водных растворов состоит из коллекторной головки 1 с подводящим патрубком 2, который обеспечивает подачу воды в катодную 3 и анодную 4 камеры.

Катодная камера 3 представляет собой металлическую трубу 5, в которую установлен каркас 6 из профилированного металла, позволяющего увеличить площадь контакта отрицательного электрода с протекающим потоком воды. Анод состоит из металлического стержня 7, охваченного профилированным металлическим каркасом 8. Между катодом и анодом предусмотрена полупроницаемая диафрагма 9. В коллекторной головке 10 выполнены патрубок 11 для отвода воды с отрицательным потенциалом (католит) и патрубок 12 для отвода воды с положительным потенциалом (анолит). Коллекторные головки 1 и 10 крепятся на металлической трубе 5 с помощью резьбы 13 и 14.

Стержень 7 анода имеет резьбовые наконечники 15, 16 для крепления в коллекторных головках 1 и 10. Уплотнение резьбовых наконечников производится уплотнительными втулками 17, 18.

Устройство работает следующим образом. Вода или водный раствор по подводящему патрубку 2 подается в коллекторную головку 1 и распределяясь по кольцевому каналу, поступает в катодную 3 и анодную 4 камеры устройства.

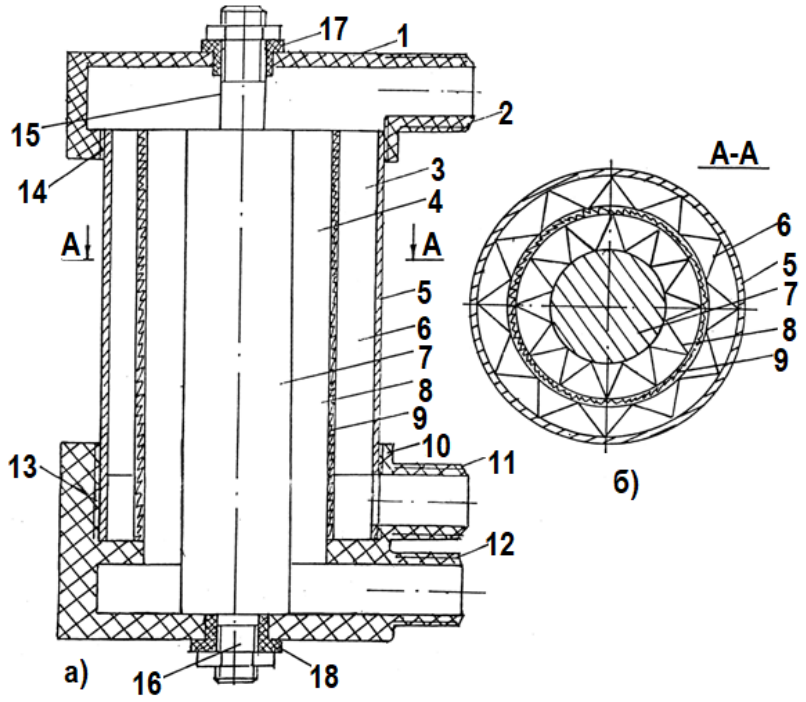

Рис. 2.8. Устройство для электрохимической активации воды и водных растворов:

1 – коллекторная головка; 2 – подводящий патрубок; 3, 4 – катодная и анодная камеры; 5 труба; 6 – каркас; 7 – стержень; 8 – каркас; 9 – диафрагма; 10 – коллекторная головка; 11, 12 – отводящие патрубки; 13, 14 – резьба; 15, 16 – резьбовые наконечники; 17, 18 – уплотнительные втулки

На каркас 6 катода подается ток с отрицательным потенциалом, а на каркас 8 с положительным потенциалом. При протекании потока на него воздействует напряжение электрического тока и происходит электролиз воды. В катодной камере 3 вода приобретает отрицательный потенциал (католит) с pH 7,0-12,0 и ОВП в пределах –600…–1000 мВ, а в анодной камере 4 положительный потенциал с pH 4,5-6,0 и ОВП в пределах +500…+900 мВ.

При подходе к патрубку 11 вода с отрицательным потенциалом поступает в соответствующую систему для использования католита, а при подходе к патрубку 12 соответственно поступает вода с положительным потенциалом и используется по назначению.

Значительное упрощение конструкции и снижение ее стоимости при увеличении площади контакта электродов с обрабатываемой водой достигается приведенным ниже устройством (рис. 2.9. (а, б). В позиции (а) схематично изображено устройство для электрохимической обработки воды, диаметрально-вертикальный разрез. В позиции (б) – вид сверху, со снятой крышкой.

Устройство содержит корпус 1 из диэлектрического материала, крышку 2 так же выполненную из диэлектрического материала.

Внутри корпуса 1 размещен катод 3 из профилированной листовой легированной стали. В корпусе 1 установлен стакан 4 из микропористой пластмассы. В стакане 4 размещен анод 5 из профилированной листовой легированной стали, который охватывает центральный стержень 6 из легированной стали. Стержень 6 имеет упор 7. Стакан 4 зафиксирован в корпусе 1 кольцом 8. Кольцо 8 служит опорой для катода 3. Верхняя часть центрального стержня 6 имеет резьбовую часть 9. Катод 3 имеет полки 10 для крепления к крышке 2 с помощью винтов 11. Центральный стержень 6 зафиксирован в крышке 2 средством крепления, например гайкой 12.

Устройство работает следующим образом. Крышка 2 с катодом 3 и анодом 5 поднимается из корпуса 1, при этом в корпусе 1 остается стакан 4, зафиксированный кольцом 8. Корпус 1 и стакан 4 заполняются, например водопроводной питьевой водой, подлежащей обработке.

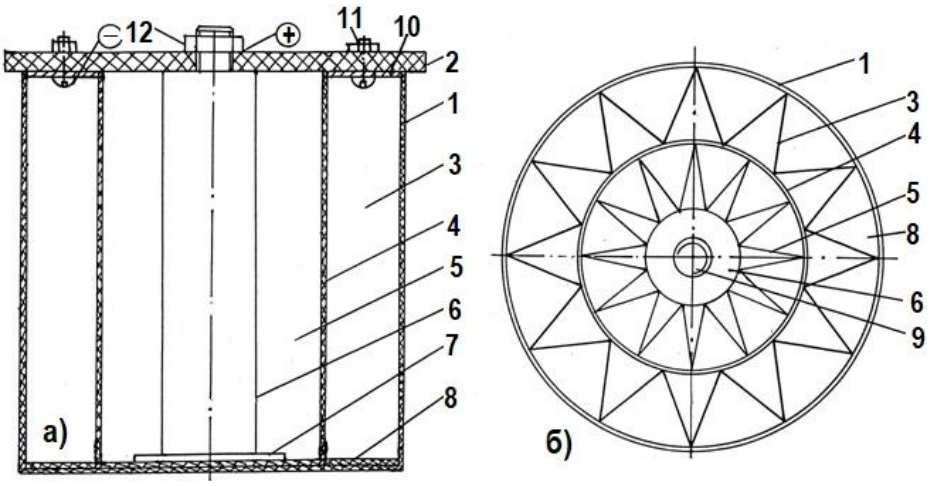

Рис. 2.9. Устройство для электрохимической активации воды:
1 – корпус; 2 – крышка; 3 – катод; 4 – стакан; 5 анод; 6 – стержень; 7 – упор; 8 – кольцо; 9 – резьбовая часть; 10 – полки; 11 – винты; 12 – гайка

Крышка 2 устанавливается на корпус 1, а катод 3 и анод 5 размещаются, соответственно, катод между корпусом 1 и стаканом 4, а анод 5 – в стакане 4. Устройство подключается к источнику постоянного тока, при этом к катоду 3 подается отрицательный потенциал, а к аноду 5 – положительный потенциал.

Под действием электрического тока, возникающего между анодом 5 и катодом 3, в воде происходит электрохимическая обработка с образованием в стакане 4 анолита, а в корпусе 1 – католита.

В катодной камере вода приобретает отрицательный потен-

циал с pH 7,0-12,0 и ОВП в пределах –600…–1200 мВ, а в анодной камере положительный потенциал с pH 4,0-6,0 и ОВП в пределах +500..+1000 мВ.

После проведения активации устройство отключается от источника, крышка 2 с катодом 3 и анодом 5 извлекается из корпуса 1, затем извлекается стакан 4.

Раствор анолита используется по назначению для дезинфекции или лечебных целей. Затем из корпуса 1 выливается католит и так же используется по назначению, например для повышения биологической активности семян сельскохозяйственных растений и лечебных целей.

Упрощение конструкции и стоимости установки, а также возможности непрерывного получения анолита и католита заданных параметров достигается на приведенной установке для электрохимической активации (рис. 2.10. (а, б). В позиции (а) изображен поперечный вертикальный разрез установки для электрохимической активации воды. В позиции (б) – вид на установку сверху со снятой крышкой.

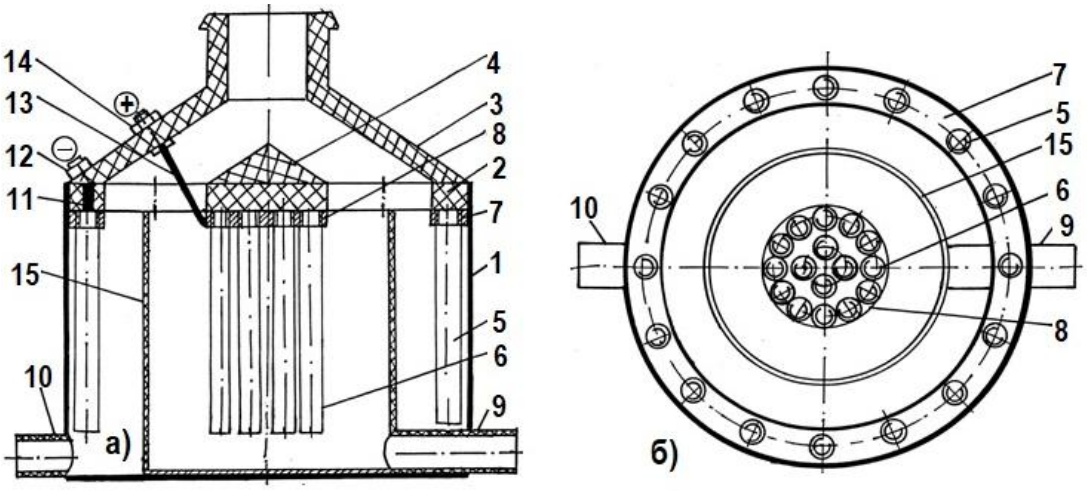

Рис. 2.10. Установка для электрохимической активации воды:

1 – корпус; 2 – крышка; 3 – патрубок; 4 – рассекатель; 5, 6 – отрицательные и положительные электроды; 7 – токопровод; 8 – токопровод анода; 9 – отводящий патрубок анолита; 10 – отводящий патрубок католита; 11 – проводник; 12 – клемма; 13 – проводник; 14 – клемма; 15 – диафрагма

Установка включает корпус 1, выполненный из диэлектрического материала, который закрыт крышкой 2, так же выполненной из диэлектрического материала. На крышке смонтированы диффузорный подводящий патрубок 3 и рассекатель 4. К крышке 2 за-

креплены отрицательные электроды 5 и положительные электроды 6, при этом отрицательные электроды 5 установлены с помощью резьбы на кольцевом токопроводе 7, а положительные электроды 6 соединены резьбой с общим токопроводом 8.

Для отвода воды с положительным потенциалом (анолит) предусмотрен отводящий патрубок 9, а для отвода воды с отрицательным потенциалом (католит) – отводящий патрубок 10. Для подвода отрицательного потенциала предусмотрен проводник 11, соединенный с токопроводом 7, проводник 11 соединен с источником тока с помощью клеммы 12. Для подвода положительного потенциала служит проводник 13, соединенный с токопроводом 8. Проводник 13 соединен с источником тока с помощью клеммы 14. Отрицательные 5 и положительные 6 электроды разделены полупроницаемой цилиндрической диафрагмой 15, выполненной из микропористой пластмассы.

Установка работает следующим образом, вода во внутреннюю полость установки подается через конический диффузорный подводящий патрубок 3 с рассекателем 4 и направляется в корпус 1, заполняя камеры размещения катодов 5 и анодов 6.

Одновременно с подачей воды включается подвод отрицательного и положительного потенциалов к клеммам 12, 14. Поток воды проходит между электродами 5, 6, где под воздействием электрического тока, возникающего между анодом и катодом происходит электрохимическая обработка жидкости, при этом в катодной камере вода приобретает отрицательный потенциал, а в анодной положительный. Через отводящие патрубки 9 и 10 отводятся анолит и католит и подаются для использования в установки для обработки семян и растений по назначению.

Увеличение площади взаимодействия потока с электродами и компактность конструкции обеспечивается на приведенной установке рис. 2.11.

Установка для электрохимической активации воды и водных растворов состоит из цилиндрического корпуса 1, подключенного к отрицательному полюсу источника тока, внутри которого смонтирован стяжной стержень 2, подключенный к положительному полюсу источника тока. Конструкция установки имеет водоподводящий коллектор 3 и коллектор 4 для отвода католита. Водоподводящий коллектор 3 закреплен к корпусу 1 с помощью резьбового наконечника 5, изолированного от коллектора 3 с помощью диэлект-

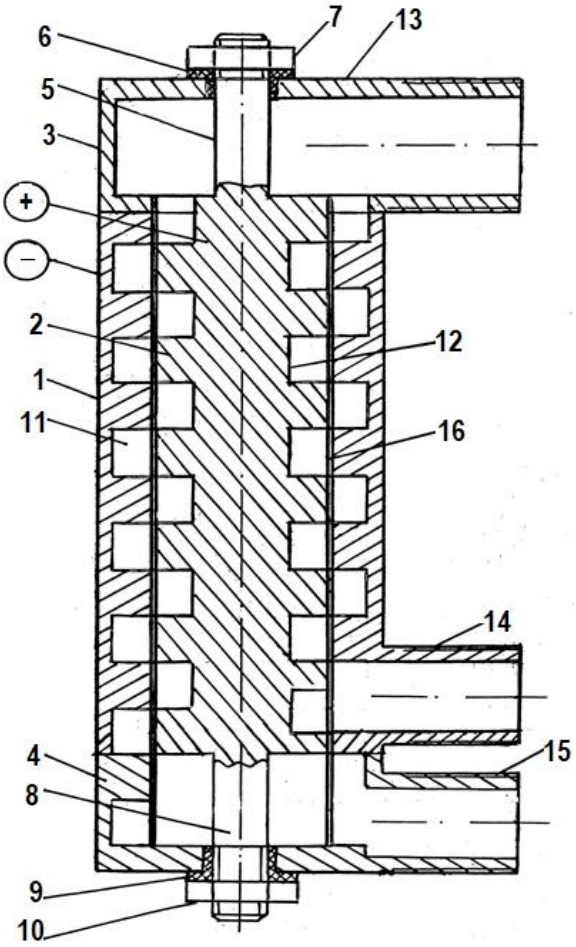

Рис. 2.11. Установка для электрохимической активации воды и водных растворов:

1 – корпус; 2 – стяжкой стержень; 3 – водоподводящий коллектор; 4 – отводящий коллектор; 5 – резьбовой наконечник; 6 – втулка; 7 – гайка; 8 – наконечник; 9 – втулка; 10 – гайка; 11 – винтовая канавка; 12 – винтовая канавка; 13 – подводящий патрубок; 14, 15 – патрубки; 16 – сепаратор

рической втулки 6, поджимаемой к коллектору гайкой 7.

Коллектор 4 крепится к корпусу 1 с помощью резьбового наконечника 8, изолированного от коллектора 4 с помощью диэлектрической втулки 9, поджимаемой к коллектору 4 гайкой 10.

В корпусе 1 выполнена винтовая канавка 11, а в стержне 2 – винтовая канавка 12. Выступы канавки 12 расположены над впадинами канавки 11. В коллекторе 3 предусмотрен патрубок 13 для подвода воды.

Для отвода воды с положительным потенциалом в корпусе 1 предусмотрен патрубок 14. В коллекторе 4 выполнен патрубок 15 для отвода воды с отрицательным потенциалом. Корпус 1, выполняющий функции катода и стержень 2, представляющий собой анод, разделены сепаратором 16, выполненным из микропористой пластмассы.

Устройство для электрохимической активации воды и водных растворов работает следующим образом. Для подачи воды в устройство она должна быть предварительно очищена от механических примесей с помощью общеизвестных фильтров. После очистки поток воды через патрубок 13 подается в водоподводящий коллектор 3, сообщающийся с входными кромками винтовых канавок 11,12. Для нормальной работы устройство необходимо располагать вертикально.

Под действием напора, с которым подается вода в патрубок 13 и гравитационных сил тяжести поток перемещается по винтовым канавкам 11 и 12. При этом частицы потока участвуют в двух

видах движения – поступательном вниз, под действием силы тяжести, и напора при вращении вокруг вертикальной оси симметрии корпуса 1, т. е. по винтовой канавке. В результате сложения двух видов движений образуется турбулентный поток, который позволяет увеличить площадь контакта, молекул воды потока с катодом и анодом. Этим увеличивается коэффициент полезного действия подводимого к электродам электричества и значительно снижается его потребление на единицу объема обрабатываемой воды.

После прохождения потока воды по винтовой канавке 11 католит поступает в коллектор 4 и далее через патрубок 15 подается потребителям воды с биологически активными свойствами (предпосевная обработка семян, капельное орошение и другое).

Поток воды с положительным потенциалом анолит из винтовой канавки 12 поступает в отводящий патрубок 14 и используется для дезинфекции, уничтожения болезнетворных микробов, сельскохозяйственных вредителей и других целей. От воздействия отрицательного потенциала получается католит с ОВП величиной до –1470 мВ, а от воздействия положительного потенциала анолит с величиной ОВП, равной до +1530 мВ. Удельные затраты количества электричества находятся в пределах 350-400 Кулон на литр (Кл/л).

Таким образом, использование перспективных конструктивных решений в области электрохимической активации воды позволяет проектировать компактные энергосберегающие установки, обеспечивающие непрерывный ток обрабатываемой воды со стабильными заданными параметрами. Это позволяет уверенно использовать технологию в современных системах капельного орошения.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ АЛГОРИТМА ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ С МОДУЛЕМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ОРОСИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

3.1. Алгоритм расчета систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды

Исходными материалами для создания алгоритма расчета систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды стали известные методы проектирования систем капельного орошения, изложенные в фундаментальных работах О. Е. Ясониди [127], нормативной документации [48], методических рекомендациях [31, 91] и пр.

Исследование конструкций систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды показало, что обязательным конструктивным отличием таких систем от обычных, капельных является дополнение:

установкой для электрохимической активации оросительной воды;

источником бесперебойного электрического питания, включая электрические сети, мобильные или стационарные генераторы электрического тока;

узлом подключения установки для электрохимической активации оросительной воды к системе напорных водоводов, включая узлы соединения, регулирующую и запорную арматура и т. д.

Проведенные исследования и практический опыт использования капельного орошения с возможностью электрохимической обработки оросительной воды свидетельствуют, что недостаточно просто дополнить систему капельного орошения вышеперечисленными конструктивными элементами [1, 98, 99, 113]. Расчет таких систем необходимо вести комплексно, рассматривая все функциональные узлы и конструктивные элементы в совокупности.

В самых общих чертах алгоритм расчета систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды представлен на рис. 3.1.

Рис. 3.1. Алгоритм расчета систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды

Как и при расчете типизированных систем капельного орошения одним из первых блоков приведенного алгоритма является

блок совокупного анализа дебета водоисточника и водопотребления сельхозкультур на расчетной площади (рис. 3.2).

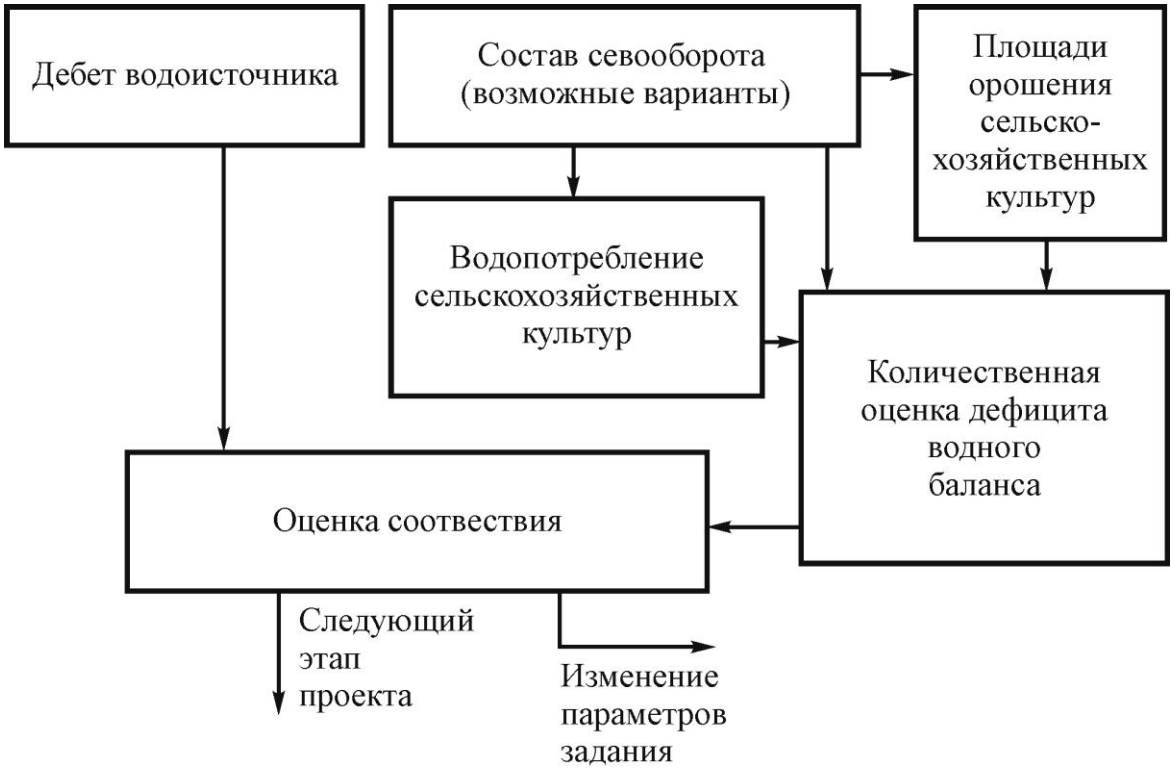

Рис. 3.2. Блок совокупного анализа дебета водоисточника и водопотребления сельскохозяйственных культур на расчетной площади

При расчете потребности в оросительной воде учитывается состав культурных видов севооборота, включая все перспективные варианты, варианты размещения культур севооборота по площади расчетного участка, водопотребление сельскохозяйственных культур в условиях оптимального водообеспечения, дефицит баланса почвенной влаги (последнее принято считать для года 75 %-ного уровня обеспеченности метеоусловий). Динамические графики дебета водоисточника принято составлять для условий не ниже 85 %-ного уровня обеспеченности [48]. Графики водопотребности, рассчитанные на всю площадь орошаемого участка, должны соответствовать графикам дебета водоисточника. Если это условие выполняется, то осуществляется переход к следующему этапу проектирования системы. Если условие не выполняется, то параметры задания корректируют, включая изменение состава культур севооборота, соотношения площадей, занимаемых сельскохозяйственными культурами, изменение площади орошаемого участка и т. д.

На следующем этапе осуществляется выбор общей схемы компоновки системы капельного орошения. Общая схема компоновки должна учитывать географию орошаемого участка, размещение и формулу смены культур севооборота, требования к созданию зон увлажнения при капельном орошении культур севооборота, расположение водоисточника, качество воды и комплектование узла водоочистки, варианты размещения установки для электрохимической обработки оросительной воды и, связанную с этим необходимость комплектации установками – генераторами электрического тока. Общая схема компоновки системы капельного орошения осуществляется с позиций получения наибольшей экономической выгоды, но на первом этапе является довольно приблизительной и может корректироваться в процессе расчета.

Следующим этапом проектирования систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды является выбор конструкций капельных водовыпусков. Основная задача капельных водовыпусков – обеспечение равномерного по площади орошаемого участка вылива с заданной производительностью. При этом, собственно, производительность капельных водовыпусков определяется требованиями культуры к формированию зоны увлажнения. Параметры зоны увлажнения зависят от производительности капельных водовыпусков, но не одинаковы для почв разного типа или гранулометрического состава. Другой характеристикой, имеющей особую важность для систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды, является возможность сохранения производительности капельниц при изменении напора. Это достигается за счет формирования лабиринтов особой формы или за счет установки механического компенсатора перепада напора.

Одним из ключевых этапов проектирования систем капельного орошения является количественная оценка максимумов укомплектованного графика гидромодуля системы. Собственно величину гидромодуля g (л/с·га), определяемую как динамику удельного расхода воды в единицу времени на 1 га площади, для участков, орошаемым капельным способом, легко найти по формуле:

$$g = \alpha \frac{N_{га} \cdot Q_к}{3600}, \qquad (3.1)$$

где $N_{га}$ – общее число капельных водовыпусков на орошаемом участке площадью в 1 га, $Q_к$ – производительность одной капельницы, л/ч, α – доля площади, занимаемой культурой на проекти-

руемом участке, 3600 – переводной коэффициент.

При орошении капельным способом гидромодуль зависит от конструктивных особенностей поливного трубопровода, определяющих число капельных водовыпусков на одном погонном метре капельной линии, расходно-напорных характеристик капельниц, схемы укладки поливных трубопроводов на орошаемом участке. Поэтому величину гидромодуля необходимо определить дифференцированно для всех случаев, где эти условия различаются. При составлении графиков гидромодулей орошаемых культур они нередко складываются, так как потребность в поливе возникает одновременно. Такая совокупность расходов оросительной воды на полив сельскохозяйственных культур капельным способом образует неукомплектованный график гидромодуля. Количественная оценка максимума неукомплектованных графиков гидромодуля системы зависит от состава культур севооборота, их водопотребления и требований к условиям водообеспечения, метеорологических условий и является величиной в большей степени вероятностной. При проектировании оросительных систем с целью улучшения их экономических и эксплуатационных показателей проводят процедуру укомплектования графиков гидромодуля, заключающуюся в сдвиге средних дат полива. С помощью укомплектованного графика получают расчетные значения гидромодуля, по которым можно определить максимальные расходы воды (Q_{max}, л/с), подаваемые по оросительной сети на севооборотный участок:

$$Q_{max} = g_{max} \cdot S_{max}, \quad (3.2)$$

где g_{max} – максимальная ордината укомплектованного графика гидромодуля, л/с·га, S_{max} – площадь севооборотного участка, га.

Следующим этапом алгоритма проектирования системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды является решение задач выбора или расчета насосной станции, системы водоочистки и установки для электрохимической обработки. Определенный по приведенным выше зависимостям максимальный расход воды, подаваемый по оросительной сети на севооборотный участок, является ключевым параметрам для выбора всех перечисленных узлов и установок проектируемой системы. Производительность насосной станции ($Q_{н.с.}$, л/с) должна быть не ниже совокупного максимального расхода воды на полив, а также учитывать возможный расход воды на сброс или накопление в рамках технологии электрохимической активации и применения

электрохимически обработанной воды:

$$Q_{н.с.} = 1{,}1\ldots1{,}2Q_{max} + K_m \cdot Q_{max}, \quad (3.3)$$

где K_m – коэффициент, учитывающий увеличение расхода воды, связанное с особенностями технологии применения электрохимически активированной воды.

Коэффициент K_m принимается равным больше 0 в случае, если в соответствии с технологией применения электрохимически активированной воды полив проводится только анолитом (в чистом виде или в смеси с природной оросительной водой) или только католитом (в чистом виде или в смеси с природной оросительной водой). Современные конструкции проточных установок для электрохимической активации оросительной воды не позволяют проводить униполярную обработку, хотя работы в этом направлении ведутся. Наибольшее смещение производительности установки по выработке анолита и католита сейчас не превышает 80:20. Поэтому значение коэффициента K_m целесообразно принимать равным 0,2.

Расчет совокупной производительности узла водоочистки ($Q_ф$, л/с) проводится по схожей зависимости:

$$Q_{ф.} = 1{,}1\ldots1{,}2Q_{max} + K_m \cdot Q_{max.} \quad (3.4)$$

При этом следует учитывать, что в суточной производительности узла водоочистки ($Q_{сут.}$, м^3/сут.) должны быть отражены затраты воды на собственные нужны комплекса:

$$Q_{сут.} = T \cdot Q_{ф.ч.} + K_{пр.} \cdot T \cdot Q_{ф.ч.}, \quad (3.5)$$

где T – время полива в течение суток, ч, $Q_{ф.ч.}$ – часовая производительность узла водоочистки, определенная интегрированием параметра $Q_{ф.}$ в течение одного часа.

Производительность установки ($Q_{эхав}$, л/с) для электрохимической активации оросительной воды определится из соотношения:

$$Q_{эхав} = Q'_{max} + K_m \cdot Q'_{max}, \quad (3.6)$$

где Q'_{max} – максимальный вероятный расход воды на полив сельскохозяйственных культур в узле врезки установки для проведения электрохимических обработок, л/с. В общем случае показатель Q'_{max} может быть принят равным Q_{max}, если установка размещается в комплексе с узлом водоочистки.

Расчетная величина напора насосной станции определяется потребным рабочим напором в узле размещения капельного водовыпуска, потерями напора в водоподводящих и поливных трубопроводах, разностью геодезических отметок и суммарными потерями напора на установках и оборудовании, которыми укомплек-

тована система капельного орошения. При расчете системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды важно учитывать потери напора в узле водоочистки и на установке для проведения электрохимической обработки:

$$H_{н.с.} = H_{раб.} + H_{пол.} + \sum_{i=1}^{i=U} H_i + H_м + H_{эхав} + H_ф + H_{геод.}. \qquad (3.7)$$

где $H_{н.с.}$ – расчетная величина напора насосной станции, м, $H_{пол.}$ – потери напора на поливном трубопроводе, м, $\sum_{i=1}^{i=U} H_i$ – потери напора в распределительных трубопроводах 1-го, 2-го,… U-го порядка, м, $H_м$ – потери напора в магистральном трубопроводе, м, $H_{эхав}$ – потери напора в узле электрохимической активации оросительной воды, м, $H_ф$ – потери напора в узле водоочистки, м, $H_{геод.}$ – разность геодезических отметок, м.

Потери напора узла водоочистки и узла электрохимической обработки оросительной воды являются известной величиной и включены в технические характеристики соответствующих установок. Потери напора в поливном, участковом, распределительных и магистральном трубопроводах определяются в результате гидравлического расчета.

Гидравлический расчет трубопроводов в классическом алгоритме проектирования систем капельного орошения является основанием для выбора основных параметров оросительной сети, включая диаметр трубопроводов, их предельные линейные размеры, соотношение геометрических размеров проектируемых модулей и т. д. При проектировании систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды обосновать выбор этих параметров только на основании гидравлического расчета системы трубопроводов нельзя.

Следует понимать, что при использовании для полива систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды объективно проявляются два эффекта:

во-первых, классическое падение напора по длине напорных трубопроводов, которое тем выше, чем больше скорость транспортирования оросительной воды;

во-вторых, явление релаксации электрохимически активированной воды или водных растворов минеральных удобрений, которое определяет снижение активационных потенциалов. Причем снижение активационных потенциалов будет тем больше, чем ниже скорость транспортирования воды.

Таким образом, расчет системы капельного орошения с мо-

дулем электрохимической активации возможен только на основе решения компромиссной задачи. Общая схема решения компромиссной задачи представлена на рис. 3.3.

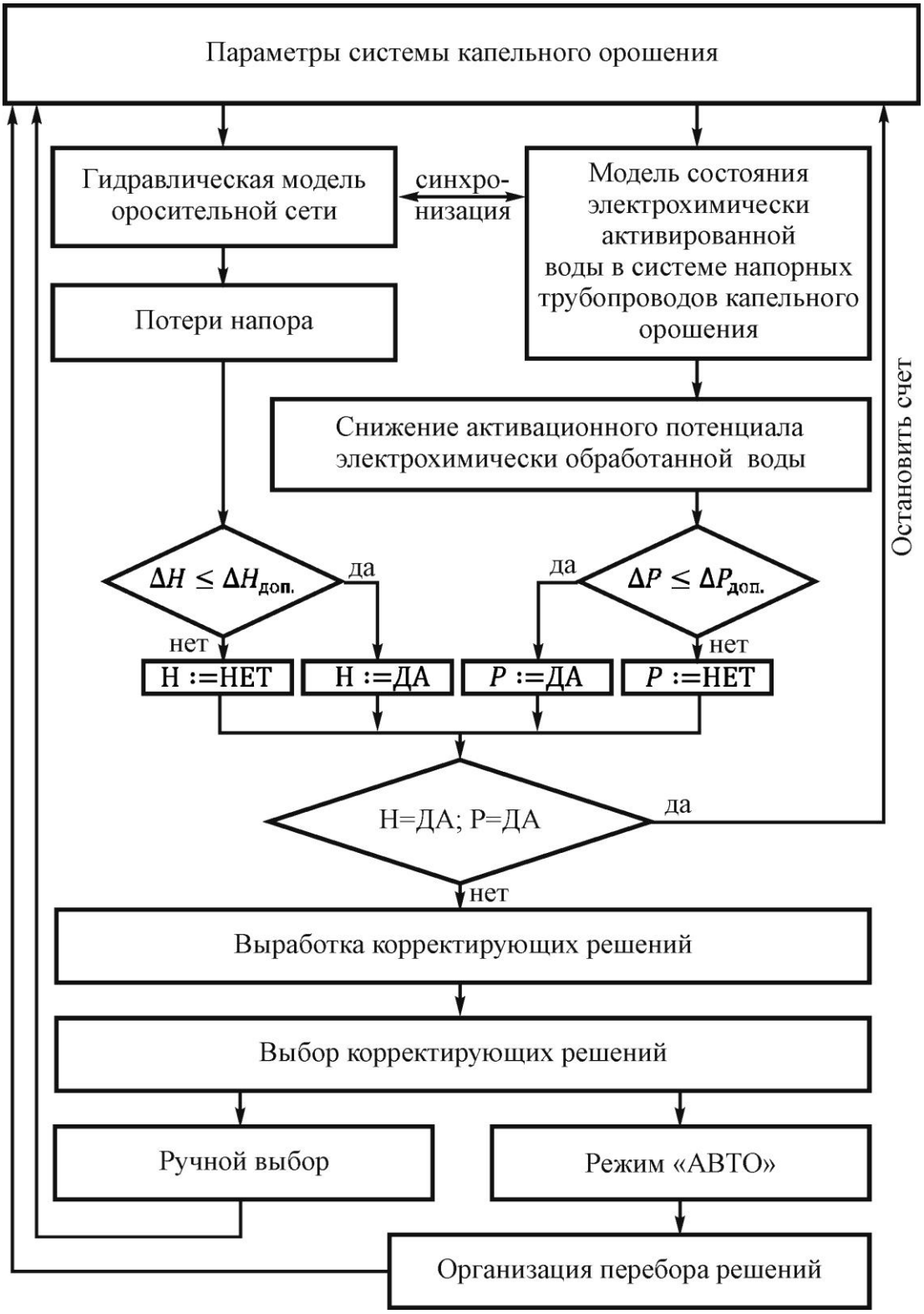

Рис. 3.3. Алгоритм компромиссного расчета сети напорных трубопроводов системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды

Логика процедуры выбора компромиссных решений заключается в следующем:

- во первых, определяется допустимый уровень падения активационного потенциала оросительной воды. Допустимый уровень падения активационного потенциала оросительной воды складывается из допустимого уровня падения активационного потенциала в подводящей сети ($\Delta P_{доп.подв.}$) и сети поливных трубопроводов ($\Delta P_{доп.пол.}$):

$$\Delta P_{доп.} = \Delta P_{доп.подв.} + \Delta P_{доп.пол.}, \quad (3.8)$$

где $\Delta P_{доп.}$ – уровень допустимого снижения активационного потенциала электрохимически обработанной оросительной воды. Допустимое снижение активационного потенциала оросительной воды в сети поливных трубопроводов определяется агротехническими требованиями:

$$\Delta P_{доп.пол.} = [P_1; P_n] = [P_{max}; P_{min}],$$

где $[P_1; P_n]$ – интервал значений активационного потенциала между уровнем активации электрохимически обработанной воды на первой, ближайшей к активатору капельнице и последнем, наиболее удаленном капельном водовыпуске, $[P_{max}; P_{min}]$ – диапазон допустимых значений активационного потенциала оросительной воды, определяемый агротехническими требованиями. Из равенства, в частности, следует:

$$P_1 = P_{max}, \quad P_n = P_{min}.$$

Допустимый уровень падения активационного потенциала в подводящей сети определится выражением:

$$\Delta P_{доп.подв.} = P_{уст.max} - P_1, \quad (3.9)$$

где P_1 – уровень активации электрохимически обработанной воды на первой, ближайшей к активатору капельнице, $P_{уст.max}$ – наибольший уровень активации оросительной воды, обеспечиваемый установкой при заданной производительности $Q_{эхав}$ (л/с): $P_{уст.max} = f(Q_{эхав})$;

- во вторых, определяются допустимые потери напора в системе капельного орошения. Допустимые значения потерь напора также целесообразно дифференцировать на допустимые потери напора в подводящей сети ($\Delta H_{доп.подв.}$) и допустимые потери напора в сети поливных трубопроводов ($\Delta H_{доп.пол.}$):

$$\Delta H_{доп.} = \Delta H_{доп.подв.} + \Delta H_{доп.пол.}, \quad (3.10)$$

где $\Delta H_{доп.}$ допустимые значения потерь напора, м. При этом максимально допустимые значения потерь напора в сети поливных

трубопроводов определятся требованиями к равномерности вылива капельниц по площади орошаемого участка. Известно, что производительность капельных водовыпусков зависит от напора в системе $q = f(H)$, причем расходно-напорная характеристика капельниц строго индивидуальна и зависит от конструктивного исполнения. Исходя из диапазона допустимого изменения производительности капельниц (q_{max}; q_{min}), величина допустимых потерь напора в сети поливных трубопроводов определится решением обратной задачи:

$$q_{max} = f(H_{max});\ H_1 = H_{max}$$
$$q_{min} = f(H_{min});\ H_1 = H_{min}$$
$$\Delta H_{доп.подв.} = H_1 - H_n, \qquad (3.11)$$

где H_{max} – значение напора при расходе капельного водовыпуска, равного наибольшей допустимой производительности, м, H_{min} – значение напора при расходе капельного водовыпуска, равного наименьшей допустимой производительности, м.

Допустимый уровень падения напора в подводящей сети определится выражением:

$$\Delta H_{доп.\ подв.} = H_{н.с.опт.} - H_1, \qquad (3.12)$$

где H_1 –допустимое значение напора на первом капельном водовыпуске, м, $H_{н.с.опт.}$ – рабочий напор насосной станции при расчетной производительности $Q_{н.с.}$, определенный в результате решения оптимизационной задачи. Решение оптимизационной задачи проводится известными методами [33, 58], путем минимизации критерия оптимизации, в качестве которого целесообразно использовать совокупные экономические затраты, собственно, на систему и ее эксплуатацию;

- следующий этап выбора компромиссного решения заключается в сравнении фактических, вычисленных при известных (исходных) параметрах системы капельного орошения, и допустимых значений потерь напора и падения активационного потенциала электрохимически обработанной оросительной воды. При этом, если фактические значения потерь напора и снижения активационного потенциала оросительной воды находятся в допустимых пределах, то счет останавливается, а параметры системы капельного орошения, использованные в расчетах, принимаются в качестве результата компромиссного решения и становятся основой для создания проекта. Если хотя бы одно из условий не выполняется, то параметры системы капельного орошения, использованные в рас-

четах, отвергаются, а выполнение алгоритма продолжается;

- если фактические значения потерь напора и снижения активационного потенциала оросительной воды выходят за рамки допустимого диапазона, то осуществляется переход к выработке корректирующего решения. Собственно, выработка корректирующего решения заключается в идентификации всех параметров, которые в конечном итоге определяют потери напора и (или) падение активационного потенциала, а также направление изменения этих параметров;

- выбор корректирующих решений из сформированного перечня может проводиться в ручном режиме (выбирает оператор) или в режиме "авто". Вместе с тем в режиме "авто" целесообразно обеспечить возможность ограничения изменения некоторых параметров (вплоть до жесткой фиксации), возможность ранжирования предпочтений по изменяемым параметрам и т. д. Организация перебора корректирующих решений является последним блоком предложенного алгоритма, после которого цикл расчетов повторяется.

Выполнение расчетов в строгом соответствии с предложенным алгоритмом позволяет определять допустимые значения параметров сети и проектировать системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды. Анализ структуры предложенного алгоритма проектирования систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды также показал необходимость разработки моделей и методов прогнозирования активационных потенциалов электрохимически обработанной воды и приготовленных на ее основе растворов в системе напорных водоводов капельного орошения.

3.2. Модель состояния электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений в системе капельного орошения

Известные технологии и практический опыт применения для полива электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений с использованием систем капельного орошения свидетельствуют о существовании довольно жестких требований, предъявляемых к уровню активации водных систем непосредственно на капельных водовыпусках [13, 55, 65, 93, 98]. В большинстве случаев указываются конкретные уровни параметров

активации, или диапазон их допустимого варьирования не более 10 % от измененных значений ОВП и pH водной среды.

На практике значения активационных потенциалов редко бывают одинаковыми даже на смежных капельных водовыпусках и, безусловно, изменяются по длине поливного трубопровода. На рис. 3.4 приведена типизированная схема модуля системы капельного орошения, где $P^{(ОВП,\ pH)}$ – значение активационного потенциала электрохимически активированной воды по уровню ОВП или измененному значению pH. Исходя из приведенного выше условия, можно записать:

$$P_N^{(ОВП,\ pH)} - P_0^{(ОВП,\ pH)} < 0{,}1P_0^{(ОВП,\ pH)}. \qquad (3.13)$$

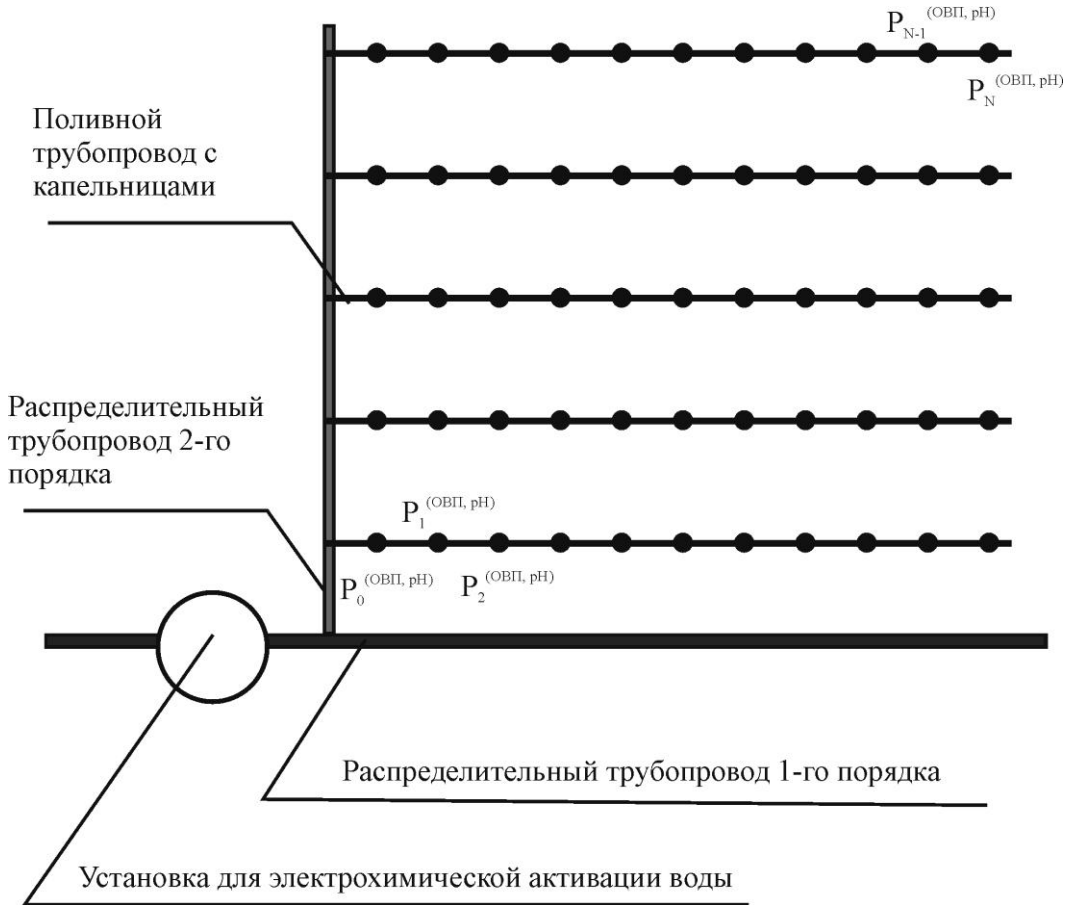

Рис. 3.4. Типизированная схема модуля системы капельного орошения, оборудованного установкой для электрохимической активации оросительной воды

Учитывая, что экспериментальное определение активационных параметров трудоемко, требует специального оборудования, а число схем размещения модулей системы капельного орошения вкупе с их геометрическими размерами вообще не является опреде-

ленной величиной, целесообразным видится для контроля соблюдения поставленного условия использование математической модели, обеспечивающей надежный прогноз распределения активационных параметров состояния оросительной воды (или водных растворов минеральных удобрений) в системе капельного орошения.

Создание модели для определения параметров состояния электрохимически активированных водных сред в системе капельного орошения предусматривает введение ряда определений и допущений, идеализирующих реальные процессы и объекты материального мира. Одним из ключевых определений, введение которого необходимо для построения указанной модели, является определение *элементарного объема воды*, как идеализированного объекта с набором специфических качеств и свойств:

во первых, *элементарный объем воды* рассматривается как дискретный объект не смешиваемый с другими подобными объектами. Движение этого объекта рассматривается как движение материальной точки или твердого тела со специфическими для них дискретными свойствами;

во вторых, предполагается, что *элементарный объем воды* полностью сохраняет качественные и количественные характеристики электрохимически актированной воды или водных растворов. Под характеристиками здесь, прежде всего, понимается изменение ОВП или pH, а также водных растворов в результате электрохимической активации.

Другой отправной точкой в создании модели для определения параметров состояния электрохимически активированных водных сред в системе капельного орошения стала разработка специальной системы параметризации координат. При разработке этой системы мы руководствовались рядом требований к функциям, которые она должна обеспечивать:

определение точного положения координат в системе поливных, распределительных, участковых (и т. д.) трубопроводов;

определение траектории движения элементарного объема воды от источника (или любого сечения, принятого за начало координат) по системе поливных, распределительных, участковых (и т. д.) трубопроводов до искомой координаты;

определение протяженности пути, пройденного элементарным объемом воды от источника (или любого сечения, принятого за начало координат) по системе поливных, распределительных, участковых (и т. д.) трубопроводов до искомой координаты;

определение качественных характеристик движения элементарного объема воды по системе поливных, распределительных, участковых (и т. д.) трубопроводов.

В общем случае любая произвольная система напорных водоводов представляет собой протяженный линейный объект с установленными правилами ветвления. Для описания линейных объектов целесообразно использовать систему линейных координат, как эффективный способ организации географически определенных данных на основе относительного позиционирования вдоль линейного объекта. С другой стороны важно учитывать пространственное ветвление напорных водоводов в системе капельного орошения.

Учитывая вышесказанное, в качестве геопозиционной основы для разрабатываемой модели будет целесообразно использовать систему линейных координат с параметрами, определяемыми уровнем напорных водоводов системы капельного орошения. Тогда любую линейную координату X можно будет определить параметрами i, j, n, – (X_{ijn}), где параметр i – определяет местоположение координаты на участковом трубопроводе (распределительном трубопроводе 1-го порядка); параметр j определяет местоположение координаты на распределительном трубопроводе (распределительном трубопроводе 2-го порядка. В общем случае оросительная система может иметь любое определенное число распределительных трубопроводов, которое и будет определять степень параметризации линейных координат); параметр n определяет положение координаты на поливном трубопроводе.

За начало системы линейных координат целесообразно принять точку подключения установки для электрохимической активации оросительной воды к системе капельного орошения. Тогда $i = 0$ определится как точка подключения установки для электрохимической активации оросительной воды, $i = 1$, $i = 2$ и т. д. – точки подключения распределительных трубопроводов к участковому, соответственно первого, второго и т. д.; $j = 0$ – определится как точка подключения распределительного трубопровода к участковому, $j = 1$, $j = 2$ и т. д. – точки подключения поливных трубопроводов к распределительному, соответственно – первого, второго и т. д.; n = 0 – определится как точка подключения поливного трубопровода к распределительному, $n = 1$, $n = 2$ и т. д. – капельные водовыпуски – первый, второй и т. д. Пределы изменения параметра i определятся диапазоном от 0 до I с шагом в 1, j

диапазоном от 0 до J с шагом в 1, а n – диапазоном от 0 до N с шагом в 1. Параметры I, J и N определяются компоновкой, техническими характеристиками и общими геометрическими размерами системы капельного орошения.

Среди прочих важных допущений и упрощения процессов при создании модели было принято:

движение воды в системе капельного орошения считаем установившимся (без изменения во времени);

расход воды каждой капельницей в пределах модуля системы капельного орошения одинаков, по крайней мере, при соблюдении допустимого уровня перепадов рабочих напоров. Собственно, уровень допустимых перепадов рабочих напоров зависит от напорно-расходных характеристик капельных водовыпусков и, в общем случае, для капельниц с простым лабиринтом будет существенно ниже, чем для капельниц с механизмом компенсации давления.

В самых общих чертах модель состояния электрохимически активированных водных сред в системе капельного орошения представлена на рис. 3.5.

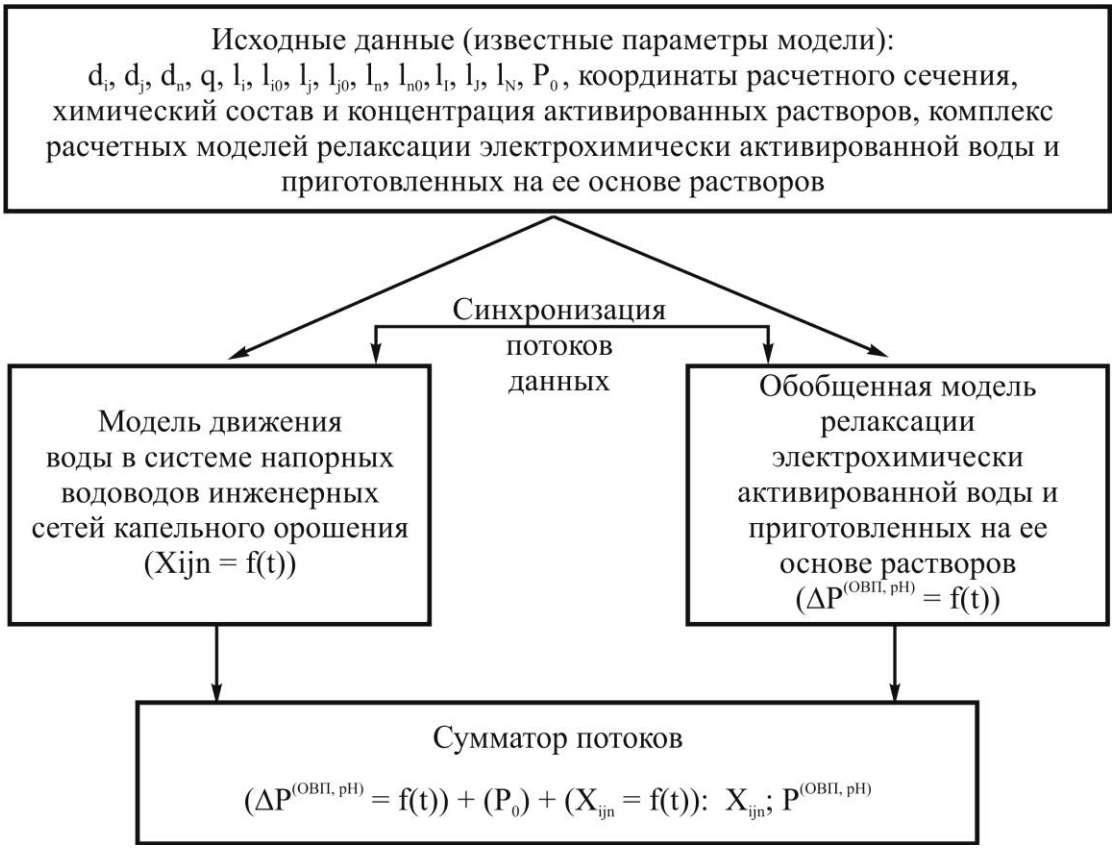

Рис. 3.5. Общая схема модели состояния электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений в системе капельного орошения

Исходными данными для модели являются диаметры напорных трубопроводов (участкового – d_i, распределительного – d_j, поливного – d_n), м, q – производительность капельницы, л/ч, шаг расстановки распределительных трубопроводов l_i, м, расстояние между точкой присоединения установки-активатора к системе и первым распределительным трубопроводом l_{i0}, м, шаг раскладки поливных трубопроводов l_j, м, расстояние между точкой соединения распределительного трубопровода с участковым и точкой присоединения первого поливного трубопроводом l_{j0}, м, шаг расстановки капельных водовыпусков l_n, м, расстояние между точкой соединения поливного трубопровода с распределительным и первым капельным водовыпуском l_{n0}, м, общая протяженность участкового трубопровода от точки присоединения установки-активатора l_I, м, общая протяженность распределительного трубопровода l_J, м, общая протяженность поливного трубопровода l_N, м, величина потенциала электрохимически активированной воды (раствора) на выходе из установки-активатора P_0, мВ, комплекс функций, определяющих закон релаксации электрохимически активированной воды или растворов, состав водных сред, подвергающихся электрохимической активации. В исходные данные также входят параметры координаты X, определяющие положение расчетной точки в системе закрытых водоводов. Если эти параметры не введены, то величина потенциала электрохимически активированных водных сред (по умолчанию) определяется для всей сетки координат системы капельного орошения.

Блок имитации движения воды в напорных трубопроводов решает задачу по оценке закона перемещения элементарного объема воды в разноуровневых водоводах. На выходе из этого блока мы получаем главную пару данных: X_{ijn} – координату, определяющую положение условной точки, и t_{ijn} – время движения элементарного объема воды от установки-активатора до заданной координаты.

Другим ключевым блоком предложенной модели является компонента, проводящая процедуру оценки степени снижения потенциала электрохимически активированной воды (релаксации ЭХАВ) или водных растворов в закрытых системах с течением времени. Главной парой данных на выходе из этого блока являются потенциал (или падение потенциала) электрохимически активированной воды или растворов ΔP по истечению времени Δt.

Полученные пары данных сводятся в сумматоре, который позволяет в комплексе оценить положение координаты X_{ijn}, времени движения элементарного объема воды от установки-активатора до

заданной координаты t_{ijn} и величину снижения (повышения) ОВП электрохимически активированной воды ΔP в течение времени t_{ijn}. Имея в исходных данных начальное значение потенциала электрохимически активированной воды или ее раствора P_0 можно получить значение потенциала P_{ijn} в момент времени t_{ijn}. Главная пара данных, получаемая на выходе из этого блока, включает X_{ijn} – координату, определяющую положение условной точки и P_{ijn} – значение ОВП электрохимически активированной воды (раствора), что позволяет оценить состояние электрохимически активированных водных сред в системе капельного орошения.

Важнейшей компонентой представленной модели является блок имитации движения воды (раствора) в напорных трубопроводах системы капельного орошения. Этот блок представлен, по сути, самостоятельной моделью, описывающей перемещение элементарного объема воды в динамике (рис. 3.6).

Исходными данными для проведения расчетов в рамках модели движения воды (раствора) в закрытых напорных водоводах (трубопроводах) являются все выше перечисленные показатели за исключением величины потенциала электрохимически активированной воды (раствора) на выходе из установки-активатора P_0, мВ, комплекса функций, определяющих закон релаксации электрохимически активированной воды или растворов, показателей-характеристик состава водных сред, подвергающихся электрохимической активации.

Численные решения – имитации движения элементарного объема воды в системе трубопроводов в представленной модели проводятся дискретно для каждого из участка трубопровода между соседними координатами. Поэтому первой процедурой в представленной имитационной модели является процедура перебора параметров координат, последовательно по пути следования до заданной координаты. Процедура позволяет определять параметры очередной координаты по пути следования до заданного сечения, что является отправной точкой для проведения очередного цикла расчетов.

Особенности проведения процедуры состоят в последовательном изменении параметров 1-го, 2-го и последующих порядков. Пусть задана координата X с параметрами i_r, j_r и n_r. Тогда i в параметрах очередной координаты будет последовательно изменяться от 0 до i_r, а параметры j и n будут оставаться равными нулю. При достижений параметром i заданных значений параметра i_r он фиксируется и дальше начинает изменяться параметр j с ша-

гом 1 до значений j_r; при этом параметр n продолжает оставаться равным нулю. При достижении параметром j значений j_r начинает изменяться параметр n от 0 до n_r с шагом в 1. На рис. 3.7 представлен алгоритм выполнения этой процедуры, который в общих чертах сводится к следующему:

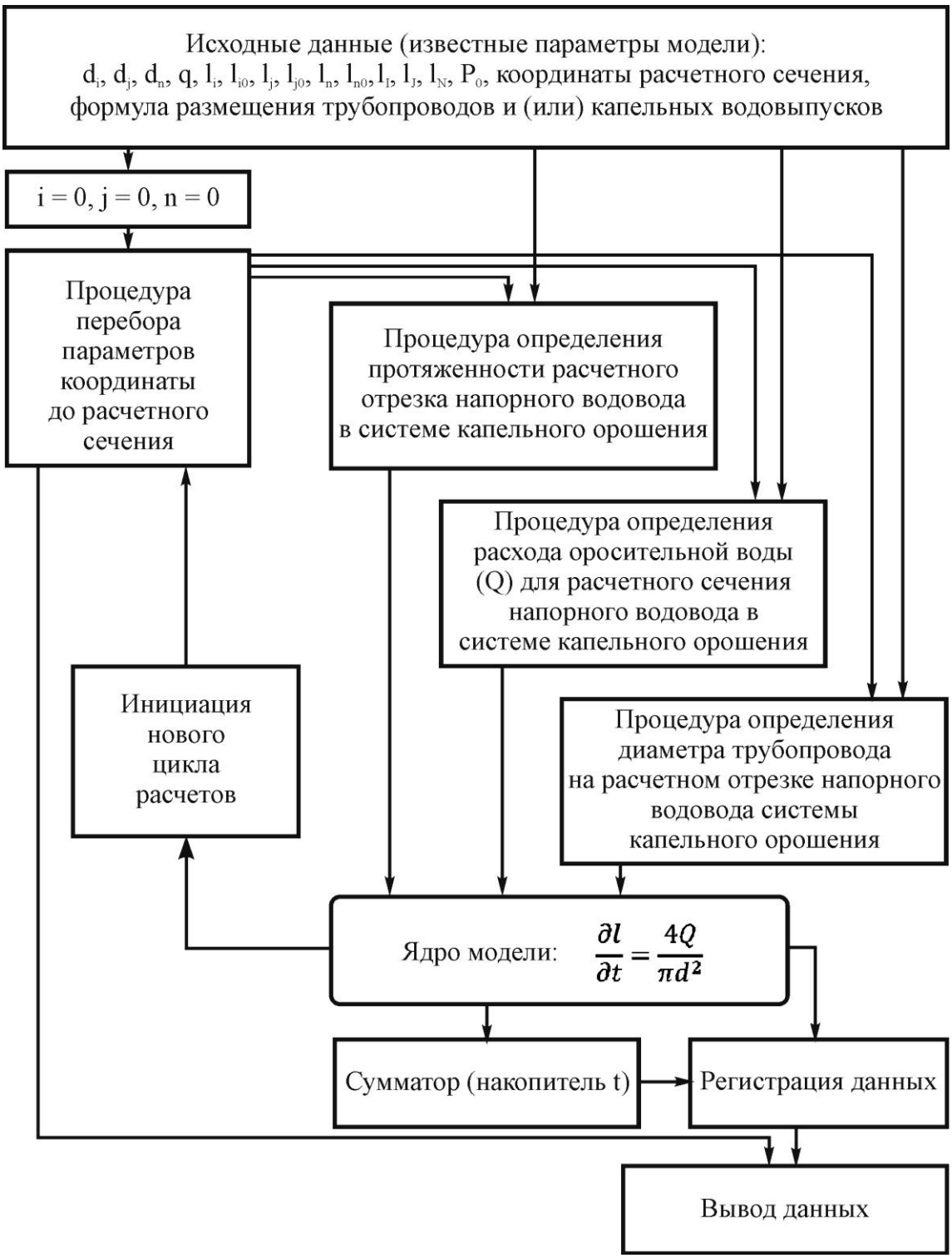

Рис. 3.6. Модель движения воды в системе напорных водоводов инженерных сетей капельного орошения

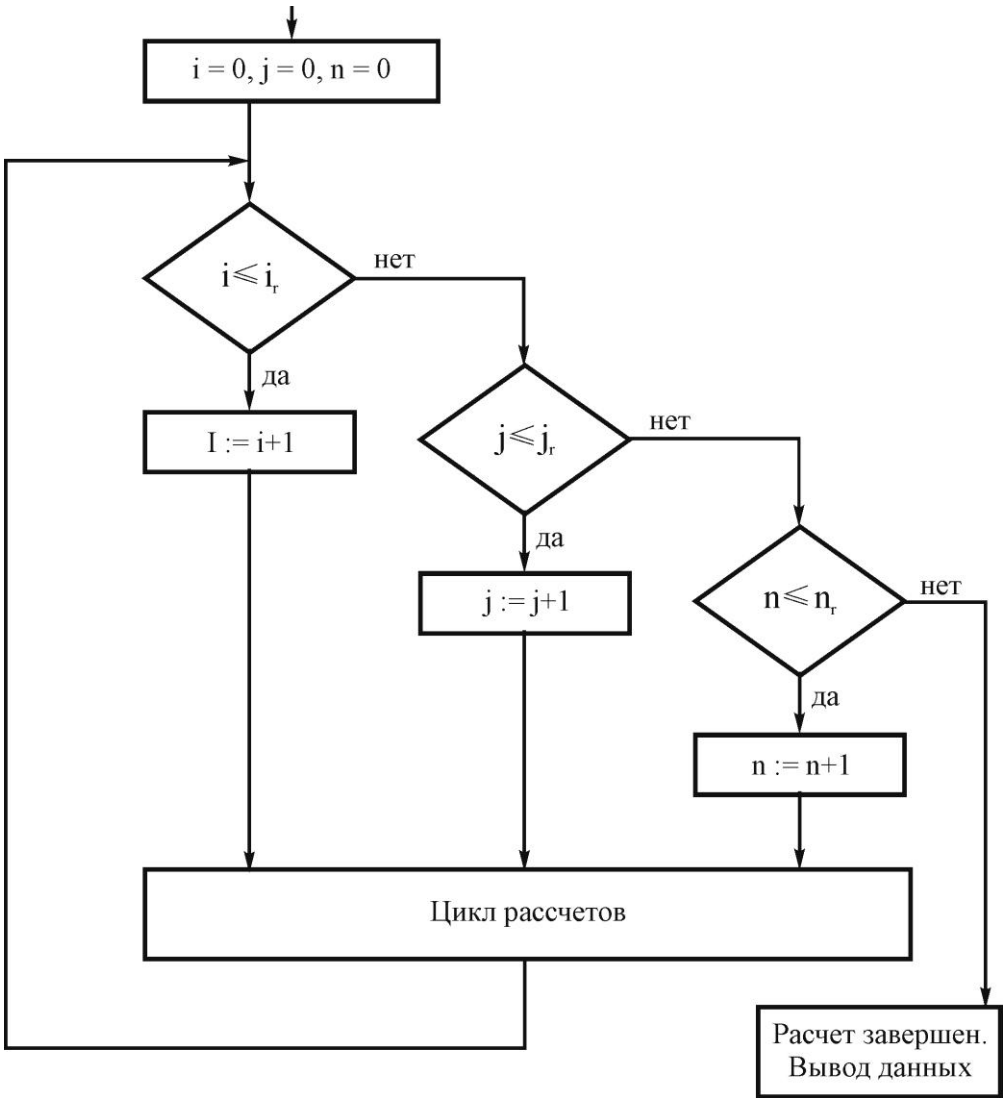

Рис. 3.7. Блок-схема алгоритма организации перебора параметров координаты в расчетной модели оценки состояния электрохимический активированной воды и водных растворов при капельном поливе

если $i < i_r$, то $i = i + 1$, $j = 0$, $n = 0$;
если $i = i_r$, а $j < j_r$, то $i=i_r$, $j = j + 1$, $n = 0$;
если $i = i_r$, $j = j_r$, а $n < n_r$, то $n = n + 1$;
если $i = i_r$, $j = j_r$, $n = n_r$: расчет завершен.

Далее необходимо провести преобразование исходных данных, таким образом, чтобы для расчетного участка определить длину, диаметр, а для расчетного сечения – совокупный расход воды. Для этого в модели используются ряд процедур, опирающихся на предложенную систему параметризации координат.

Диаметр текущего участка трубопровода определяется по последнему ненулевому значению параметра координаты, причем параметр n является более приоритетным в сравнении с па-

раметром j, а параметр j является более приоритетным в сравнении с параметром i (рис. 3.8).

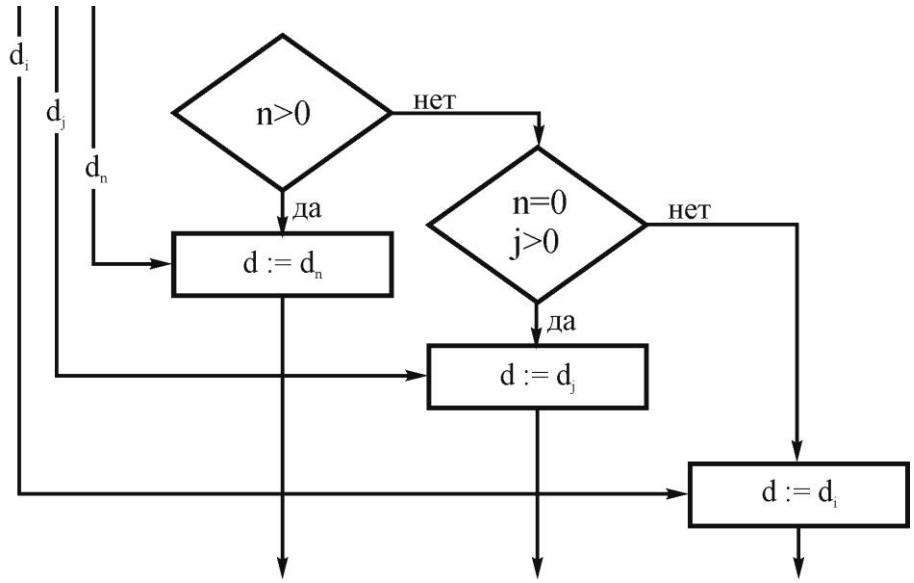

Рис. 3.8. Блок-схема алгоритма организации процедуры определения диаметра трубопровода для расчетного участка

Другими словами, если $n > 0$, то расчетному диаметру d присваивается значение d_n; если $n = 0$, а $j > 0$, то расчетному диаметру d присваивается значение d_j; если $n = 0$, $j = 0$, а $i > 0$, то расчетному диаметру d присваивается значение d_i.

При определении длины расчетного участка целесообразно исходить из того, что шаг между распределительными трубопроводами системы на участке, или между капельными линиями, а также между установкой капельных водовыпусков, одинаков. Это упрощение исходит из практики устройства систем капельного орошения и позволяет существенно упростить процедуру определения длины расчетного участка. Система приоритетов параметров координаты в этом случае аналогична используемой в процедуре определения диаметра расчетного участка трубопровода. Отличительной особенностью процедуры определения длины расчетного участка является индивидуальная величина протяженности трубопровода на отрезке со значениями параметров координаты от 0 до 1. Логика процедуры состоит в следующем (рис. 3.9):

если n > 1, то расчетной длине участка трубопровода (l) присваивается значение l_n, а если $n = 1$ – значение l_{n0};

если n = 0, а $j > 1$, то расчетной длине участка трубопровода (l) присваивается значение l_j, при $j = 1$ – значение l_{j0};

если $n = 0$, $j = 0$, а $i > 1$, то расчетной длине участка трубопровода (l) присваивается значение l_i, при $i = 1$ соответствует значение l_{i0}.

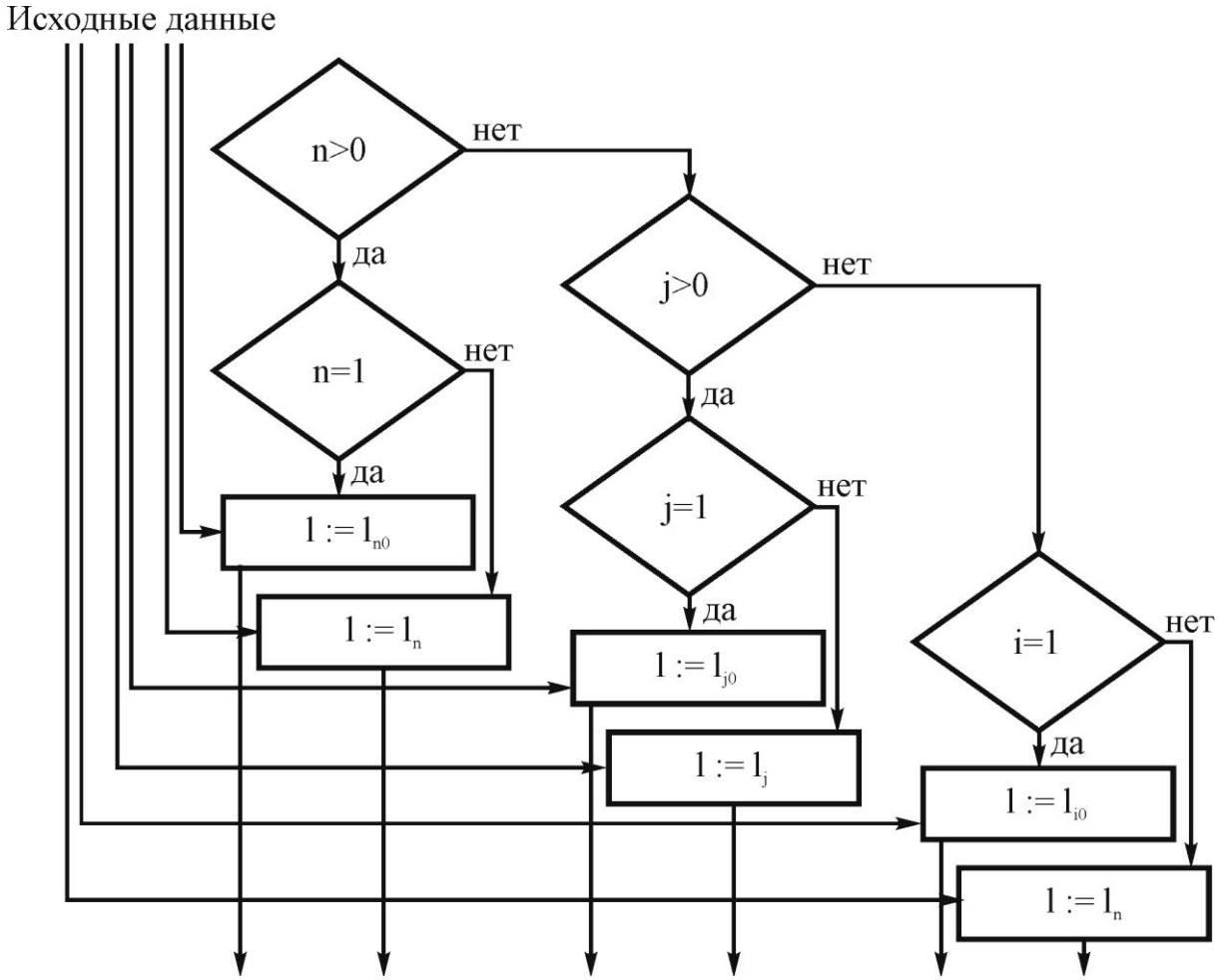

Рис. 3.9. Блок-схема алгоритма организации процедуры определения длины расчетного участка трубопровода в системе капельного орошения

Если шаг между соседними координатами неодинаков, то при определении длины расчетного участка учитывается формула-схема размещения трубопроводов на орошаемом участке. Примером такой ситуации может служить раскладка спаренных поливных трубопроводов при возделывании овощных культур по "луковой" схеме. Тогда добавляется условие по четным и нечетным координатам: для координаты с четным параметром j расчетной длине участка трубопровода l_r присваивается значение l_{jmin} (малый шаг, увлажняемая полоса), а для координаты с нечетным параметром j расчетной длине участка трубопровода l_r присваивается значение l_{jmax} (большой шаг, междурядье).

Процедура определения совокупного расхода воды для расчетного сечения трубопровода Q_{Xijn} основывается на предположении, что расход воды по каждому капельному водовыпуску одинаков при сохранении рабочих напоров. Другим ключевым моментом разработки этой процедуры для расчетного сечения трубопровода являет-

ся то, что параметры координаты в физической интерпретации являются узлами системы, где значения расхода воды меняются. Для капельной линии параметры координаты связаны с капельными водовыпусками, для распределительного трубопровода – с точками подсоединения капельных линий, для участкового трубопровода – с точками подсоединения распределительных трубопроводов. Понятно, что для определения расхода воды в заданном сечении необходимо лишь посчитать общее число капельных водовыпусков, находящихся за сечением и умножить это число на расход воды одним водовыпуском, q (рис. 3.10). Чтобы определить общее число капельных водовыпусков, находящихся за расчетным сечением, необходимо знать, собственно, предельные значения параметров координаты, т. е. сколько капельных водовыпусков на поливном трубопроводе N; сколько капельных линий соединено с распределительным трубопроводом J; сколько распределительных трубопроводов соединено с участковым трубопроводом I.

Зная общие размеры и параметры компоновки системы капельного орошения, эти показатели можно определить по следующим зависимостям:

$$N = \frac{l_N - l_{n0}}{l_n} + 1, \tag{3.14}$$

$$J = \frac{l_J - l_{j0}}{l_j} + 1, \tag{3.15}$$

$$I = \frac{l_I - l_{i0}}{l_i} + 1 \tag{3.16}$$

Тогда при $n > 0$ $\quad Q_{xijn} = q(N - n).$ (3.17)

при $n = 0,\ j > 0$ $\quad Q_{xijn} = qN(J - j).$ (3.18)

при $n = 0,\ j = 0,\ i \geq 0$ $\quad Q_{xijn} = qNJ(I - i).$ (3.19)

Определив все перечисленные выше данные, мы получаем возможность расчета времени перемещения "элементарного" объема воды по расчетному участку трубопровода. Для этого используется классическая формула, устанавливающая функциональную взаимосвязь всех определенных выше параметров:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{4Q}{\pi D^2}, \tag{3.20}$$

где dl – длина отрезка трубопровода, м, Q – расход воды для данного отрезка трубопровода, л/с, D – внутренний диаметр отрезка трубопровода, dt – время перемещения "элементарного" объема воды от начала к концу отрезка трубопровода.

Последним расчетным модулем в блоке имитации движения воды в напорных трубопроводах системы капельного орошения

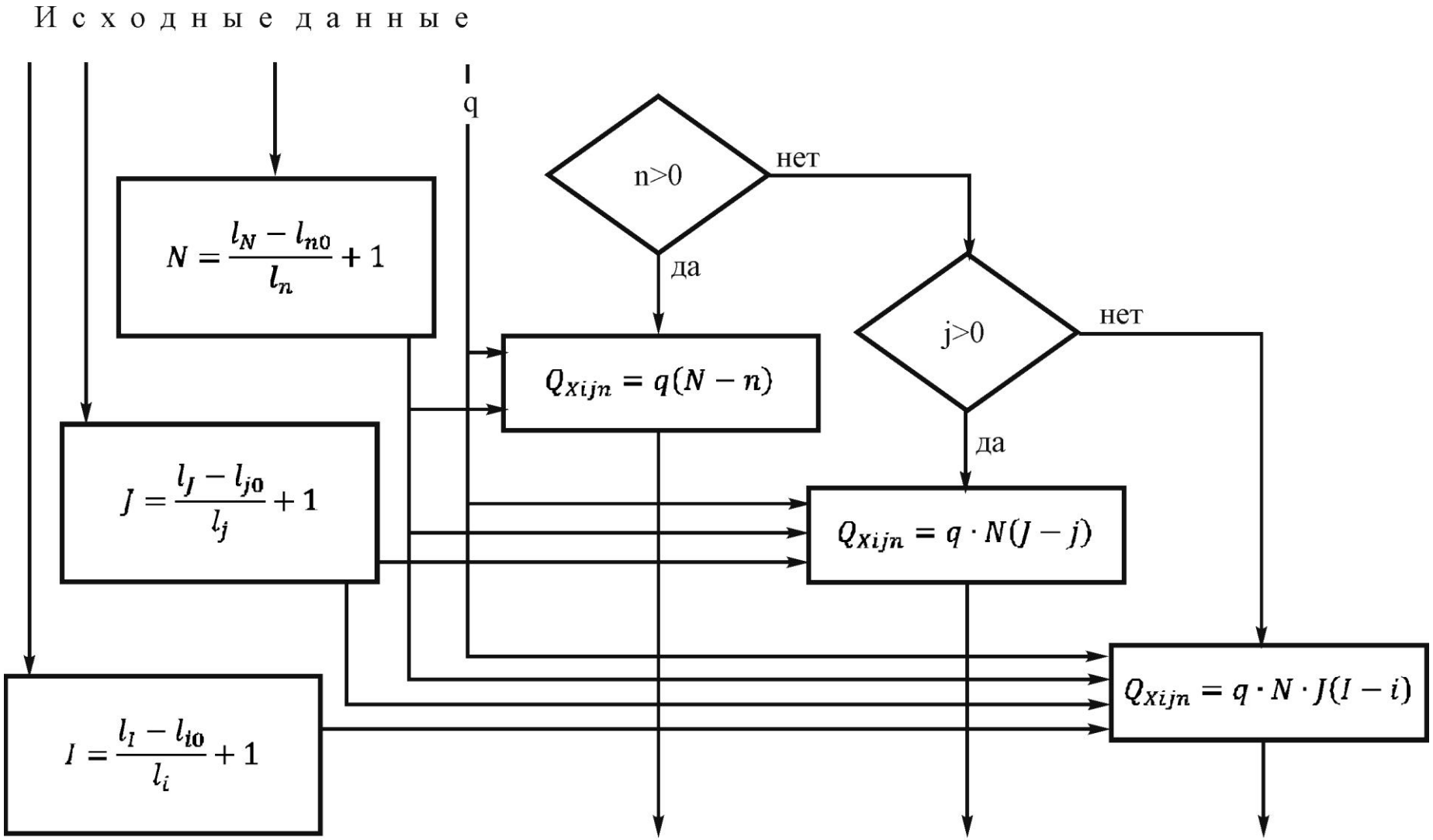

Рис. 3.10. Блок-схема алгоритма организации процедуры определения совокупного расхода воды для расчетного сечения трубопровода

является сумматор (накопитель), в котором суммируются каждый из временных интервалов движения воды по системе трубопроводов до расчетной координаты:

$$t_{Xijn} = t_{(Xijn-1)} + dt,, \qquad (3.21)$$

где t_{Xijn} – время перемещения "элементарного" объема воды от нулевой до текущей координаты (сечения), для которой производится расчет, с; $t_{(Xijn-1)}$ – время перемещения "элементарного" объема воды от нулевой координаты до координаты, предшествующей текущей (на определенном этапе перебора координат), с; dt – время перемещения "элементарного" объема воды от начала к концу расчетного участка трубопровода.

По завершению всех циклов итерационного расчета в сумматоре остается значение t, потребное для перемещения элементарного объема воды от нулевой координаты (место подключения установки для электрохимической активации воды) до расчетной координаты X с параметрами i_r, j_r и n_r, которое и выводится для использования в последующих расчетах. Если координата X с параметрами i_r, j_r и n_r не задана, то на выходе из блока имитации движения воды в системе капельного орошения мы получаем всю совокупность значений t для каждой из координат перебора $Xijn$, начиная с нулевой координаты и заканчивая координатой X_{IJN}.

Исходными данными для проведения расчетов в рамках алгоритма оценки степени снижения потенциала электрохимически активированной воды являются (рис. 3.11):

величина потенциала электрохимически активированной воды (раствора) на выходе из установки-активатора P_0, мВ;

комплекс моделей класса регрессии, определяющих закон релаксации электрохимически активированной воды или растворов;

комплекс показателей-характеристик состава водных сред, подвергающихся электрохимической активации.

Первой процедурой этого расчетного блока является процедура выбора расчетной модели для определения динамики падения активационных параметров электрохимически активированных водных сред. При определении процедуры выбора следует исходить из того, что указанный комплекс расчетных зависимостей дифференцирован для водных растворов с разным химическим составом. Это может быть природная оросительная вода, растворы минеральных удобрений в разной концентрации, растворы других веществ. Исходя из этого выбор расчетной модели

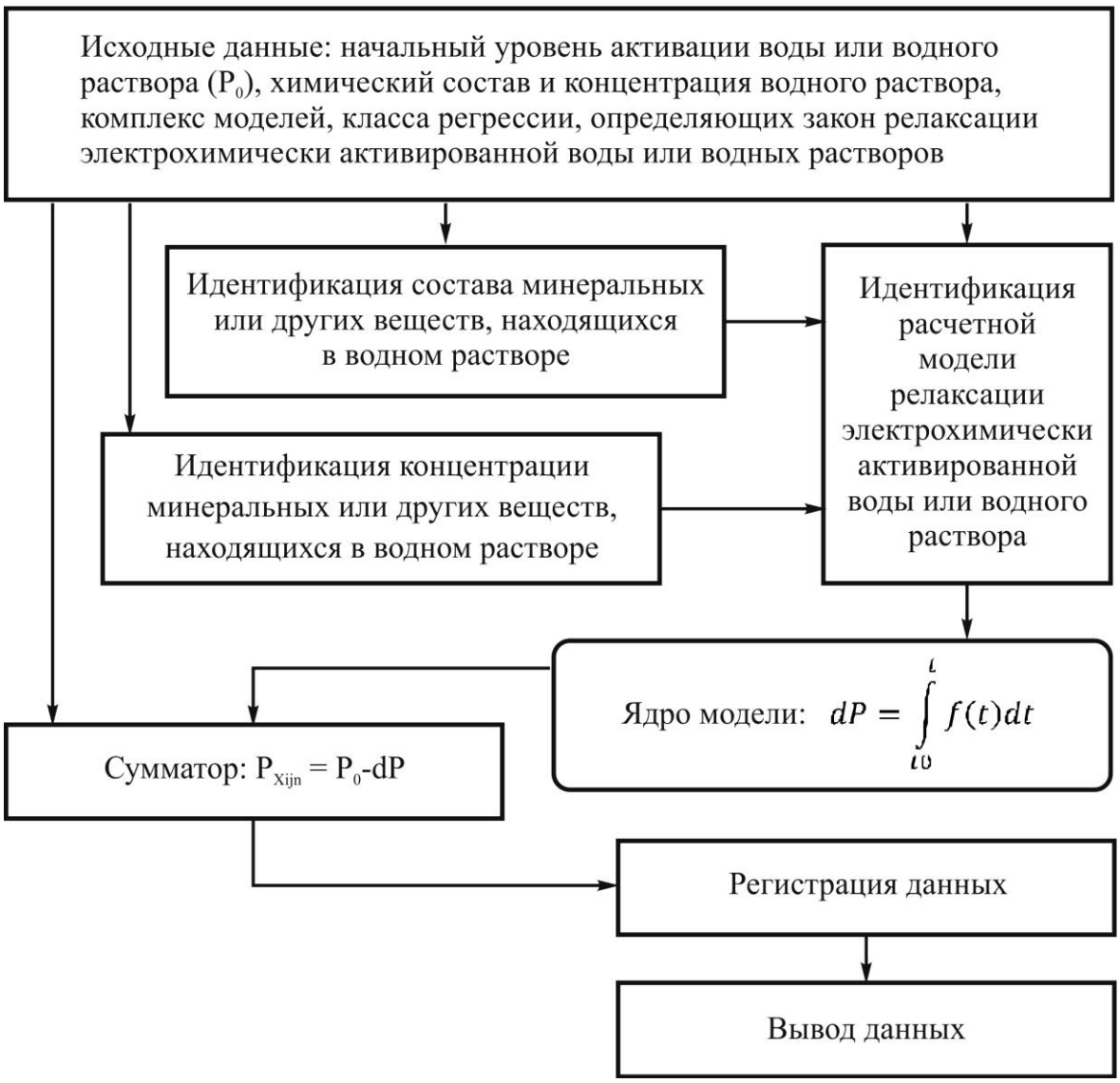

Рис. 3.11. Модель релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений

должен проводиться на основе идентификации показателей-характеристик водного раствора. Тогда сущность процедуры выбора будет сведена к следующему:

идентификация по составу минеральных или других веществ, находящихся в водном растворе. Для проведения идентификации по этому критерию целесообразно создание библиотек минеральных или других веществ, для которых получены расчетные зависимости;

идентификация по концентрации минеральных или других веществ, находящихся в водном растворе. Идентификация по концентрации минеральных или других веществ проводится только с моделями, отобранными в результате идентификация по составу

минеральных или других веществ. Проведение идентификации по этому критерию также целесообразно на основе библиотек концентраций растворов, для которых получены расчетные зависимости.

Каждая из моделей расчетного комплекса представлена регрессионными зависимостями величины потенциала электрохимически активированной воды, *P(t)*, от продолжительности временного отрезка, *t*, прошедшего после электрохимической активации воды (растворов). Зависимости описывают закон релаксации электрохимически активированной воды или растворов разного состава и концентраций.

Закон релаксации в рамках рассматриваемого расчетного блока удобно представить в дифференциальной форме:

$$\frac{dP}{dt} = f(t), \tag{3.22}$$

тогда падение потенциала электрохимически активированной воды dP для любого времени t можно определить, решив приведенное уравнение через определенный интеграл:

$$dP = \int_{t0}^{t} f(t)dt \tag{3.23}$$

Собственно, выходом из блока оценки степени снижения потенциала электрохимически активированной воды могут являться как парные значения t и dP в табличной форме, так и в форме связи этих показателей через определенный интеграл.

Последним, интегрирующим блоком имитационной модели для определения параметров состояния электрохимически активированных водных сред в системе капельного орошения является сумматор выходов двух ранее рассмотренных блоков. Так, исходными данными для суммирующего блока из блока имитации движения воды в системе капельного орошения являются:

заданная координата X с параметрами i_r, j_r и n_r;

время перемещения "элементарного" объема воды от установки для электрохимической активации воды да заданной (расчетной) координаты t_{Xijn}.

Исходными данными из блока оценки степени снижения потенциала электрохимически активированной воды для суммирующего блока является зависимость степени падения аквтивационного потенциала воды dP от времени в интегральной форме или численных решениях.

Из блока исходных данных в суммирующем блоке используется значение активационного потенциала воды на выходе из

установки для электрохимической активации P_0. Имея эти данные легко определить искомое значение редокс-потенциала воды или раствора для любой координаты системы по разности начального значения P_0 и значения dP для времени t_{Xijn}:

$$P_{Xijn} = P_0 - \int_{t0}^{t_{Xijn}} f(t)dt. \qquad (3.24)$$

Таким образом, для любой координаты X с параметрами i, j и n системы капельного орошения можно определить значения активационного потенциала электрохимически активированной оросительной воды или раствора.

3.3. Особенности построения гидравлической модели системы капельного орошения для проведения расчетов в рамках предложенного алгоритма

Важным условием эффективного применения предложенного алгоритма решения компромиссной задачи является синхронизация гидравлической модели оросительной сети и модели, используемой для прогнозирования состояния параметров электрохимически активированной воды в системе напорных трубопроводов капельного орошения. С этой целью гидравлическую модель сети трубопроводов системы капельного орошения целесообразно представить в тех же координатах, в которых представлена модель состояния параметров электрохимически активированной воды в той же системе напорных трубопроводов.

При определении потерь напора по длине трубопровода в системах, предназначенных для реализации функции капельного полива необходимо учитывать:

что потери напора по длине прямо пропорциональны скорости движения воды, а, следовательно, расходу воды по сечению;

что расход воды в системе капельного орошения изменяется по длине трубопровода из-за дифференцированного отбора воды капельными водовыпусками, ответвлениями поливных, участковых, распределительных водоводов.

Поскольку параметры координаты X (i, j и n) соответствует узлам отбора воды, и, следовательно, на каждом из этих узлов изменяется расход воды по сечению, то расчет будет целесообразно проводить дифференцированно, для участков трубопровода с соседними параметрами координаты.

Обозначим падение напора на одном из указанных выше уча-

стков трубопровода с координатой конечной точки X_{ijn} как ΔH_r и примем, что H_{ijn} – это напор воды в точке с координатой X_{ijn}.

Тогда:

если $n > 0$, то $H_{ijn} = H_{ij(n-1)} - \Delta H_r$;

если $n = 0$, а $j > 0$, то $H_{ij0} = H_{i(j-1)0} - \Delta H_r$;

если $n = 0$, $j = 0$, а $i > 0$ то $H_{i00} = H_{(i-1)00} - \Delta H_r$

если $n = 0$, $j = 0$, а $i = 1$ то $H_{100} = H_{000} - \Delta H_r$,

где H_{000} – давление воды на выходе установки для электрохимической активации оросительной воды.

Реализация подобного алгоритма на ЭВМ не вызывает затруднений, а производительность современных вычислительных машин позволяет выполнить расчет для сколь угодно сложной системы капельного орошения в считанные секунды. Результатом расчета являются значения напоров H_{ijn} для всей сетки координат, определяющей параметры системы капельного орошения.

Ядром модели является известная расчетная формула для расчета потерь напора по длине трубопровода:

$$\Delta H = \lambda \cdot \frac{L \cdot V^2}{D \cdot 2g}, \tag{3.25}$$

где ΔH – потери напора по длине трубопровода, м, λ – безразмерный коэффициент гидравлического трения, L-длина трубопровода, м, D – диаметр потока жидкости (внутренний диаметр трубы), м, V – скорость потока жидкости, м/с, g – ускорение свободного падения, м/с^2 (9,81). Применительно к расчетному участку трубопровода системы капельного орошения в соответствии с предложенным алгоритмом формула запишется следующим образом:

$$\Delta H_r = \lambda \cdot \frac{l_r \cdot V_r^2}{d_r \cdot 2g} \tag{3.26}$$

Расчетная скорость потока в системе определиться исходя из общего расхода воды для данного расчетного сечения:

$$V_r = \frac{4Q_{ijn}}{\pi d_r^2} \tag{3.27}$$

Алгоритмы определения l_r, d_r и Q_{ijn} для каждого расчетного участка подробно рассмотрены в предыдущем разделе и синхронизированы с алгоритмом определения этих же показателей в модели состояния электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений в системе капельного орошения.

Неизвестной в рассматриваемом выражении остается величина коэффициента гидравлического трения λ. Значение коэффициента гидравлического трения зависит от режима течения жидкости и определяется с учетом известного числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{V d_r}{\gamma}, \quad (3.28)$$

где Re – число Рейнольдса, γ – кинематическая вязкость жидкости, м^2/с/

Кинематическая вязкость воды зависит от температуры, снижаясь с ее увеличением. Выбор расчетной температуры воды напрямую связан с водоисточником и должен осуществляться с учетом его физических параметров. Например, температура воды из открытого водоисточника имеет выраженную годовую амплитуду изменения, подземные воды имеют более стабильную температуру, которая, впрочем, может изменяться при длительной транспортировке. Свой вклад, хотя и сравнительно небольшой, в изменение температуры оросительной воды вносит и процесс электрохимической активации.

Определив значение числа Рейнольдса, можно судить о режиме течения воды в трубопроводах, что, в свою очередь, позволяет выбрать расчетную зависимость для определения коэффициента гидравлического трения. Если Re < 2320, то режим течения оросительной воды – ламинарный, для которого коэффициент трения определяется по уравнению Пуазейля:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3.29)$$

При больших значениях числа Рейнольдса:

$$4000 < Re < 10 \cdot \frac{d_r}{k_Э},$$

где $k_э$ – гидравлический эквивалент шероховатости труб, м, адекватную оценку коэффициента гидравлического трения дает формула Блазиуса:

$$\lambda = \frac{0{,}3164}{Re^{0{,}25}} \quad (3.30)$$

Следует признать, что шероховатость стенки трубы влияет на гидравлическое сопротивление только при турбулентном потоке, но и в этом случае, из-за наличия ламинарного пограничного слоя существенно сказывается только при числах Рейнольдса, превышающих некоторое значение, зависящее от относительной шероховатости $\frac{k_Э}{d_r}$. Если

$$10 \cdot \frac{d_r}{k_Э} < Re < 560 \cdot \frac{d_r}{k_Э},$$

то при расчете коэффициента гидравлического трения лишь частично учитывается влияние гидравлического эквивалента шероховатости труб:

$$\lambda = 0{,}11 \cdot (\frac{k_Э}{d_r} + \frac{68}{Re})^{0{,}25} \quad (3.31)$$

Если же и это условие не выполняется, т. е. $Re > 560 \cdot \frac{d_r}{k_Э}$, то коэффициент гидравлического трения определяется уже, преимущественно, шероховатостью труб. При этом значения коэффициента гидравлического трения можно считать величиной, зависящей только от относительной шероховатости труб:

$$\lambda = 0{,}11 \cdot (\frac{k_Э}{d_r})^{0{,}25} \quad (3.32)$$

Определив значение коэффициента гидравлического трения, мы имеем все данные для определения потери напора воды по длине трубопровода на расчетном участке.

Методика учета местных сопротивлений в общей модели определения потерь напора сегодня имеет мощное теоретическое и экспериментальное обоснование [47]. В тоже время указывается на необходимость учета индивидуальных особенностей конструкций при количественной оценке величины потерь напора на местные сопротивления. В нормативной литературе [90] на основании обобщения различных типов местных сопротивлений в системе капельного орошения, предлагается для учета потерь напора на местных сопротивлениях использовать экспериментально определенные коэффициенты:

$$\Sigma \Delta H_r = k_{м.с.} \cdot \Delta H_{r.l}, \quad (3.33)$$

где $\Sigma \Delta H_r$ – суммарные потери напора по длине трубопровода и на местные сопротивления для расчетного участка, м, $\Delta H_{r.l}$ – потери напора по длине трубопровода для расчетного участка, м, $k_{м.с.}$ – эмпирический коэффициент, учитывающий потери напора на местные сопротивления, равный для магистральных и распределительных трубопроводов значительной протяженности подводящего пути 1,1, для участковых трубопроводов 1,2, для поливных трубопроводов с капельницами 1,3.

Вычисленные значения суммарных потерь напора для расчетных участков напорных трубопроводов, входящих в состав системы капельного орошения можно использовать для определения фактических напоров воды для всех значений координаты X с параметрами i, j и n. Использование единых координат обеспечивает естественную синхронизацию гидравлической модели системы капельного орошения и модели параметров состояния электрохимически активированной воды в системе капельного орошения при проведении расчетов по предложенному алгоритму.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ РЕЛАКСАЦИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИ АКТИВИРОВАННЫХ ВОДНЫХ СРЕД В СИСТЕМЕ КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ

4.1. Постановочные вопросы и программа экспериментальных исследований

Рабочей гипотезой исследований стало предположение о необходимости учета релаксации электрохимически активированной воды в процессе движения от установки-активатора к капельным водовыпускам при проектировании систем капельного орошения с модулем электрохимической активации. Алгоритм проектирования систем капельного орошения базируется на классической методике гидравлического расчета, в результате которого выбираются большинство параметров проектируемой системы. При этом параметры системы капельного орошения выбираются исходя из условия равномерного распределения оросительной воды по орошаемому участку. Решение задачи в итоге сводится к установлению допустимых перепадов напора на первом и последнем капельном водовыпуске системы и сравнению фактического падения напора с допустимыми значениями. При комплектации системы капельного орошения модулем электрохимической активации оросительной воды, кроме указанного условия равномерности вылива капельниц, важно оценить возможности сохранения активационного потенциала электрохимически активированной воды в соответствии с агротехническими требованиями. Отсюда следует и необходимость адаптации классического алгоритма проектирования систем капельного орошения для условий, когда указанные системы комплектуются модулем электрохимической активации оросительной воды.

Для достижения поставленной цели и основываясь на принятой формулировке рабочей гипотезы исследований, программой исследований к изучению был поставлен круг важных вопросов. Круг вопросов, связанных с изучением закономерностей релаксации электрохимически активированной воды в открытых

и закрытых системах с полимерной оболочкой, в общем случае, сводится к необходимости:

изучения общих закономерностей релаксации в открытых и закрытых системах с полимерной оболочкой;

анализа различий процесса релаксации в открытых системах и в системах закрытого типа;

анализа особенностей релаксации при разных начальных уровнях активационного потенциала электрохимически обработанной воды;

установления строго математического описания процессов релаксации электрохимически активированной воды в системах открытого и закрытого типа.

Рис. 4.1. Исследование динамики релаксации католита и анолита

Решение этого круга вопросов потребовало проведения двух экспериментов, реализованных в лабораторных условиях (рис. 4.1).

Опыт I был поставлен с целью экспериментального изучения динамики восстановления показателей-характеристик электрохимически активированной воды, а также общей продолжительности периода релаксации в открытых и закрытых системах с полимерной оболочкой. Опыт включал следующие варианты исследования динамики релаксации:

1 – католита в открытых емкостях-резервуарах;

2 – анолита в открытых емкостях-резервуарах;

3 – католита в закрытых емкостях-резервуарах с полимерной оболочкой;

4 – анолита в закрытых емкостях-резервуарах с полимерной оболочкой.

Варианты 3 и 4 опыта I подразумевали имитацию условий нахождения электрохимически активированной воды в закрытых напорных водоводах системы капельного орошения (рис. 4.2).

Рис. 4.2. Имитация условий нахождения электрохимически активированной воды в закрытых напорных водоводах системы капельного орошения

Опыт II был поставлен с целью изучения особенностей релаксации электрохимически активированной воды при разных начальных уровнях активационного потенциала. Опыт включал в себя следующие варианты исследования динамики релаксации:

1 – католита с начальным уровнем ОВП –650 мВ и pH = 10,5;

2 – анолита с начальным уровнем ОВП +840 мВ и pH = 3,9;

3 – католита с начальным уровнем ОВП –420 мВ и pH =10,0;

4 – анолита с начальным уровнем ОВП +680 мВ и pH = 4,6;

5 – католита с начальным уровнем ОВП –740 мВ и pH = 10,9;

6 – анолита с начальным уровнем ОВП +920 мВ и pH = 3,4.

Следующим этапом работы являлось установление закономерностей релаксации электрохимически активированной воды с раствором минеральных удобрений. Круг вопросов, к которому сводится решение этой задачи, определяется необходимостью:

установления особенностей изменения ОВП и pH электрохимически активированной воды с раствором минеральных удобрений;

количественного сравнения и качественной оценки влияния минеральных удобрений на скорость релаксационных процессов;

введения и количественной оценки критериев сохранения активационного потенциала электрохимически активированной воды с раствором минеральных удобрений.

Для решения этих вопросов в условиях лаборатории ПНИИЭМТ был заложен и реализован комплексный эксперимент, направленный на изучение динамики релаксации анолита и католита (фактор А) в зависимости от химического состава растворенного вещества (фактор В) и концентрации растворенного вещества (фактор С). Фактор А в рамках этого опыта представлен двумя вариантами: A^3_1 – католит и A^3_2 – анолит.

В рамках фактора В к изучению были поставлены следующие

варианты изучения динамики восстановления свойств электрохимически активированной воды: B^3_1 –с раствором сульфата калия; B^3_2 – с раствором суперфосфата; B^3_3 – с раствором карбамида.

В рамках фактора С варианты изучения динамики восстановления свойств электрохимически активированной воды с раствором минеральных удобрений были заложены тремя уровнями концентрации растворенного вещества: C^3_1 – в концентрации 0 % (контроль); C^3_2 – в концентрации 0,05 % (весовых процента); C^3_3 – в концентрации 0,1 % (весовых процента); C^3_4 – в концентрации 0,3 % (весовых процента).

Результаты экспериментов и установленные по их итогам устойчивые закономерности позволили нам перейти к разработке универсальной расчетной схемы количественной оценки релаксации электрохимически активированной воды или приготовленных на ее основе растворов. Решение этого вопроса по сути сводилось к разработке самостоятельной обобщенной модели релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений.

Для оценки надежности прогноза предложенной модели были проведены натурные исследования (рис. 4.3), в ходе которых

Рис. 4.3. Натурные исследования, в ходе которых по длине капельной линии проводились измерение показателей

по длине капельной линии проводилось измерение показателей, характеризующих уровень активации воды или водного раствора минеральных удобрений. Для обеспечения возможности всесторонней оценки предложенной модели натурные исследования проводились по многофакторной схеме:

фактор А, варианты: A^4_1 – католит; A^4_2 – анолит.

фактор В, варианты изучения показателей состояния электрохимически активированной воды в системе капельного орошения: B^4_1 – с раствором сульфата калия; B^4_2 – с раствором суперфосфата; B^4_3 – с раствором карбамида.

фактор С, варианты изучения показателей состояния электрохимически активированной воды в системе капельного орошения: C^4_1 – в концентрации раствора минеральных удобрений 0 %; C^4_2 – в концентрации 0,05 %; C^4_3 – в концентрации 0,1 %; C^4_4 – в концентрации 0,3 %.

Реализация всего комплекса экспериментальных исследований позволила верифицировать параметры прогностической модели состояния электрохимически активированной воды и приготовленных на ее основе растворов в системе капельного орошения и обеспечила возможность осуществления расчета конструкций капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды по предложенному алгоритму.

4.2. Лабораторное оборудование и методики исследований

Программа исследований в совокупности включала в себя проведение 4-х лабораторных опытов и производственной проверки полученных результатов. Для повышения чистоты результатов экспериментальных исследований при проведении опытов использовались общеизвестные и принятые научной общественностью методы и стандартные измерительные приборы. Общие методологические подходы, использованные при проведении исследований, сводятся к следующему:

обобщение современных теоретических представлений в сфере технологий электрохимической обработки воды и водных растворов с целью программируемого улучшения их свойств за счет управления ОВП;

сбор, обобщение и структуризация технической информации, анализ агротехнологических требований применения элек-

трохимически активированной воды в сельском хозяйстве;

синтез методов и эффективных моделей прогнозирования динамики изменения свойств электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений в процессе релаксации;

прогнозное моделирование состояния электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений в системе напорных трубопроводов капельного орошения;

натурные исследования закономерностей релаксации электрохимически активированной воды и приготовленных на ее основе растворов с последующим сопоставлением данных эксперимента и модельных предсказаний;

общепринятые статистические методы анализа экспериментального материала и проверки прогнозной надежности модели.

Выработка электрохимически активированной воды при проведении экспериментальных исследований в лаборатории ПНИИЭМТ осуществлялась на экспериментальном оборудовании, представляющим опытный образец установки для электрохимической активации воды проточного типа.

Для измерения показателей-характеристик электрохимически активированной воды и приготовленных на ее основе растворов использовали РН-метр РН-150М [92].

Каждое измерение показателей-характеристик электрохимически активированной воды сопровождалось четырехкратным дублированием. Фактическое значение измеренного показателя определяли расчетом среднего арифметического:

$$\bar{P} = {\sum_i^n P_i}/{n}, \tag{4.1}$$

где $\bar{P}$ – фактическое значение активационного потенциала электрохимически обработанной воды, n – число дублей измерений, P_i – значение активационного потенциала электрохимически обработанной воды в i-том дубле измерений.

Кроме того, для вычисленного среднего определяли ошибку по известной зависимости [18, 39, 51]:

$$S_{\bar{P}} = \sqrt{\frac{S^2}{n}}, \tag{4.2}$$

где $S_{\bar{P}}$– ошибка выборочной средней, S^2 – дисперсия дублирующих измерений значений активационного потенциала электрохимически обработанной воды.

Если ошибка выборочной средней на статистически значи-

мом уровне превышала допустимый интервал погрешности измерений прибора, то измеренное значение браковалось.

Особенности организации лабораторных исследований в рамках опыта I заключались в следующем:

периодичность измерений устанавливалась по прогрессивной схеме. В начале опыта интервал измерений не превышал 1 ч, затем – 2 ч, 4 ч и т. д. Последние замеры проводили с интервалом в 1 сут.

для хранения электрохимически активированной воды в опыте использовали тару из полимерных материалов (бутыли из полиэтилентетрафталата);

оценка активационного потенциала электрохимически обработанной воды и динамки его изменения проводилась по значениям показателей ОВП и pH;

начальные значения ОВП и pH электрохимически активированной воды как в варианте с открытыми системами, так и при хранении обработанной воды в закрытой таре устанавливались на одном уровне. Активационный потенциал католита характеризовался ОВП, равным–650 мВ и pH = 10,5. Активационный потенциал анолита характеризовался ОВП, равным +840 мВ и pH = 3,9;

анализ полученных данных проводилась с использованием стандартных методов корреляционного и регрессионного анализа.

Опыт II являлся логическим продолжением опыта I, но в иной плоскости. С точки зрения организации эксперимента варианты 1 и 2 опыта II и варианты 1 и 2 опыта I были единым исследованием. Закладка вариантов 3-6 проводилась вариацией начального уровня активации воды путем изменения настроек ЭХАВ-установки.

Начальный уровень активации католита в опыте III характеризовался значениями ОВП –700 мВ и pH = 10,73. ОВП анолита составлял +850 мВ при pH = 3,10. Обоснованность выбора вида минеральных удобрений, используемых в опыте, определялась:

невозможностью использования результатов эксперимента в случае приготовления растворов с другими видами минеральных удобрений. Это определило необходимость использования в опытах наиболее распространенных видов удобрений;

необходимостью решения прогнозных задач при применении в посевах сельскохозяйственных культур полного минерального удобрения. Это определило требование к использованию удобрений, как минимум, возмещающих основные, потребляемые растениями, макроэлементы. Собственно, к таким макроэле-

ментам традиционно относятся азот, фосфор и калий, недостаток которых проявляется в большинстве орошаемых почв России;

возможностью применения результатов исследований при составлении режимов удобрения различных сельхозкультур. Это определило использование в опытах простых минеральных удобрений, которые можно применять для приготовления питательных смесей с любым соотношением питательных элементов.

Концентрация раствора минеральных удобрений в поливной воде может варьировать в широких пределах в зависимости от технологии фертигации, удобряемой культуры, вида минеральных удобрений и других факторов. Большинство учетных и практиков [17, 50, 87, 90, 128] сходятся во мнении, что целесообразные уровни концентрации раствора минеральных удобрений в поливной воде не должны быть ниже 0,05 % (весовых процента) и не более 0,3 % (весовых процента). Это определило пределы уровня варьирования фактора в опыте III.

Результаты эксперимента использовались для разработки регрессионных моделей зависимости скорости восстановления свойств электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений от их концентрации и фазы релаксации. Разработка регрессионных моделей велась по общепризнанным методикам с использованием специализированного программного обеспечения и выбраковкой незначимых компонентов [19].

Результаты опыта IV, реализованного непосредственно с капельной линией, использовались для оценки прогнозной надежности модели состояния электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений в системе капельного орошения. Оценка проводилась с использованием:

а) метода оценки и сравнения дисперсии модельных данных и результатов натурных опытов, который основывается на предположении, что две совокупности данных, принадлежащих одному генеральному распределению, имеют одинаковую дисперсию. Выдвигая гипотезу о равенстве результатов модельного прогноза и результатов эксперимента, мы, безусловно, относим их к одному генеральному распределению. Дисперсия выборок вычислялась по известной зависимости [23, 39]:

$$S^2 = \frac{\sum_i^n (P_i - \bar{P})^2}{n-1} \qquad (4.3)$$

где S^2 – искомая величина дисперсии показателя, характеризующего активационный потенциал электрохимически обработанной воды.

Проверку гипотезы о равенстве двух дисперсий проводили по критерию Фишера [51]:

$$F_{факт.} = \frac{{S_1}^2}{{S_2}^2} \leq F_{теорет.} \quad (4.4)$$

Теоретический критерий Фишера определяли для 5%-ного уровня значимости. Из приведенного выражения (4.4) следует, что гипотеза о равенстве двух дисперсий подтверждается, если фактическое значение критерия Фишера меньше теоретического на 5%-ном уровне значимости;

б) метода оценки разности средних [51, 56], подразумевающий численную оценку значений средних и расчет их статистических показателей, включая значения стандартного отклонения, ошибки средней и доверительного интервала. Стандартное отклонение, S, для распределения результатов измерения активационного потенциала электрохимически обработанной воды определяли по зависимости [23]:

$$S = \sqrt{S^2} \quad (4.5)$$

Численную оценку ошибки доверительного интервала средней проводили по формуле (3.2) и использовали для определения доверительного интервала [23, 39]:

$$(\Delta P)_{дов.} = t \cdot S_{\bar{P}}, \quad (4.6)$$

где t – критерий Стьюдента, определенный из соответствующего распределения для 5%-ного уровня значимости.

Разность значений активационного потенциала, предсказанных по модели и определенных в результате натурных исследований сравнивали со значениями доверительного интервала. Соответствие между предсказанными и фактическими значениями устанавливалось, если выполнялось условие [56]:

$$P_{мод.} - P_{факт.} \leq t \cdot S_{\bar{P}}.$$

Производственную проверку эффективности спроектированной по предложенному алгоритму системы проводили в рамках полевого опыта с томатами, выращиваемых при поливе капельным способом в закрытом грунте.

4.3. Закономерности релаксации электрохимически активированной воды в открытых системах

Основными параметрами-характеристиками электрохимически активированной воды являются значения ОВП и pH. Важно

рассматривать эти показатели в совокупности, так как процесс активации характеризуется не только изменением значений этих показателей, но и соотношением этих значений. Другой, не менее важной, особенностью электрохимически активированной воды является общий тренд к восстановлению начальных значений ОВП и pH с течением времени (процесс релаксации свойств и параметров электрохимически активированной воды или водных растворов). Релаксация свойств и параметров электрохимически активированной воды или водных растворов имеет чрезвычайно важное значение, и используется для разработки современных, экологически безопасных технологий. Например, использование электрохимически активированной воды для подавления патогенной микрофлоры растений или обеззараживания семенного материала [14, 95, 101, 116] не имеет экологически негативных последствий, так как со временем активационный потенциал теряется, а на выходе мы получаем воду с обычными, "естественными" свойствами.

В тоже время, определенное значение имеет и проблема сохранения потенциалов электрохимически активированной воды или водных растворов. Как правило, при непосредственном использовании электрохимически активированной воды требуется вполне определенное соотношение параметров активации, в частности, соотношение значений ОВП и pH. Изменение этих значений электрохимически активированной воды (или водных растворов) связано с существенным изменением эффективности ее применения на практике [122, 123]. Поэтому, для применения электрохимически активированной воды на практике важно знать, какими будут значения ОПВ или pH при непосредственном контакте с предметом обработки (растительный материал, семена, почва и т. д.). В настоящем эта задача чаще всего решается ситуационно, опытным путем. Наши исследования показали, что процесс релаксации электрохимически активированной воды подчинен вполне определенным закономерностям, использование которых позволяет уверенно прогнозировать соотношение значений ОВП и pH расчетным способом. Для исследования закономерностей релаксации электрохимически активированной воды нами был поставлен лабораторный опыт, который предусматривал регулярное измерение параметров электрохимически активированной воды через определенный интервал времени в четырехкратной повторности. В результате электрохимической обработки воды в опыте получали анолит с параметрами ОВП = +840 мВ,

pH = 3,9 и католит с параметрами ОВП =–650 мВ, pH = 10,5. Результаты лабораторного эксперимента приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты лабораторного исследования процесса релаксации электрохимически активированной воды в открытых системах

Номер измерения	Время релаксации, ч	Католит		Анолит	
		редокс-потенциал, мВ	pH	редокс-потенциал, мВ	pH
1	0,1	–650	10,50	840	3,90
2	1,0	–460	10,10	472	4,97
3	3,0	–383	9,48	409	5,46
4	4,0	–375	9,46	376	5,53
5	5,0	–365	9,46	363	5,60
6	7,0	–250	9,40	352	5,72
7	8,0	–220	9,33	334	5,79
8	9,0	–190	9,25	312	5,87
9	11,0	–170	9,11	309	5,89
10	12,0	–145	8,94	315	6,01
11	14,0	–109	8,72	316	6,25
12	24,0	–31	8,45	272	6,43
13	36,0	45	8,14	252	6,81
14	48,0	102	7,97	245	6,82
15	72,0	157	7,95	245	6,82

Исследования показали, что восстановление значений ОВП и pH электрохимически активированной воды до уровня, близкого к соотношению этих показателей в природной воде (ОВП = +235 мВ и pH = 7,43) в открытых системах происходит у анолита за 36 ч, а у католита – за 48 ч. Однако динамика падения ОВП неравномерна и изменяется с течением времени.

Например, ОВП анолита в открытых системах уже в течение первого часа изменялся более, чем на 60 % от своего максимального, полученного при активации заряда; еще 15,9 % – в течение следующих трех часов и до 93,9 % – в течение суток.

Схожая картина наблюдалась и по католиту. В течение первого часа ОВП изменялся на 190 мВ, что составляет 21,5 % от полученного при активации заряда, за следующие три часа ОВП снижался еще на 9,6 %, и на 69,9 % – в течение суток.

Водородный показатель воды при активации в католите увеличился на 3,07 единицы, а в анолите снизился до 3,9 или на 3,53 единицы. Анализ данных релаксационного процесса показал, что в

течение первого часа после проведения электрохимической обработки pH анолита восстанавливает порядка 30,3 % изменений, полученных при активации. В следующие два часа pH анолита восстанавливается еще на 13,9 %, а за сутки изменения pH в результате релаксации электрохимически активированной воды восстанавливаются на 71,7 %. Динамика восстановления pH католита качественно была такой же, хотя количественно несколько отличалась от динамики восстановления pH анолита. В течение первого часа после проведения электрохимической обработки pH католита восстанавливается на 13,0 % и еще на 20,2 % в течение последующих двух часов. В течение суток после проведения электрохимической обработки pH католита восстановился на 66, 8 %.

Столь динамичное снижение активационных потенциалов анолита и католита в открытых системах в первые после обработки часы и последующее замедление релаксационных процессов на вторые и третьи сутки хорошо описывается логарифмическими кривыми (рис. 4.4а):

$$ОВП_A = -85{,}26 \cdot ln(t) + 533{,}8, \qquad (4.7)$$

где $ОВП_A$ – ОВП анолита, t – продолжительность периода релаксации, ч; коэффициент детерминации зависимости (R^2) равен 0,94;

$$ОВП_K = 130{,}4 \cdot ln(t) - 467{,}5, \qquad (4.8)$$

где $ОВП_K$ – ОВП католита; $R^2 = 0{,}92$.

Данные, полученные в опыте по восстановлению природных значений pH анолита и католита, также наиболее достоверно описывались регрессионными уравнениями логарифмического типа (рис. 4.4б):

$$pH_A = 0{,}466 \cdot ln(t) + 4{,}9,\ R^2 = 0{,}98; \qquad (4.9)$$

$$pH_K = -0{,}43 \cdot ln(t) + 9{,}9,\ R^2 = 0{,}90. \qquad (4.10)$$

Как уже указывалось выше, опыт был проведен при определенных начальных значениях параметров активации природной воды (анолит: ОВП = +840 мВ, pH = 3,9, католит: ОВП = –650 мВ, pH = 10,5). Однако, на практике начальные значения параметров активации могут быть и иными, что определяется множеством факторов, как технического (технические характеристики установки для электрохимической активации воды, качественный состав воды, мощностные характеристики источника энергии), так и технологического (требования агротехнологий к параметрам активации воды, технология применения, соотношение "производительность – уровень активации" для установки и т. д.) характера. При этом важ-

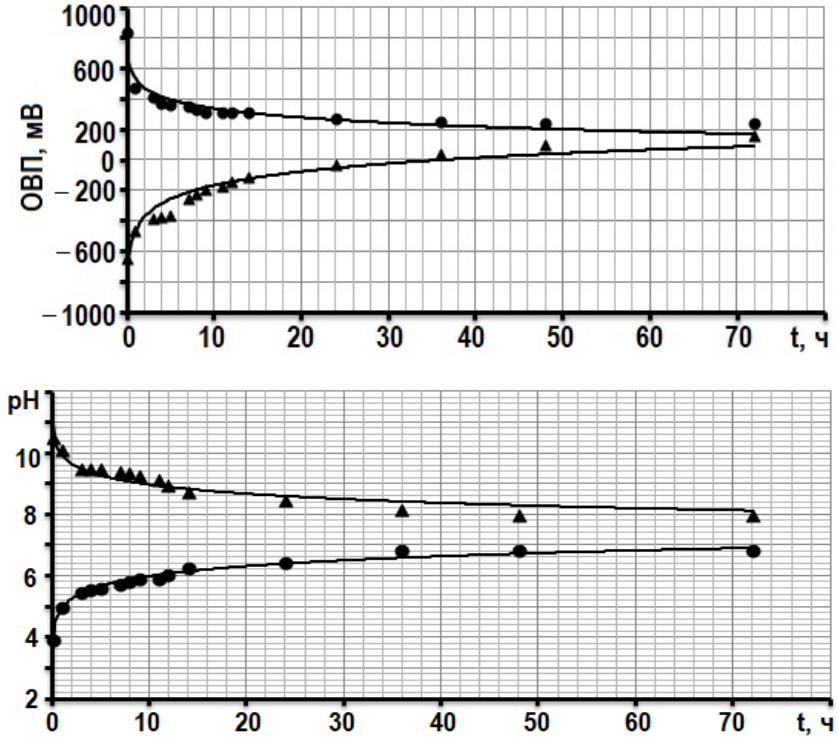

Рис. 4.4. Закономерности восстановления природных значений ОВП (а) и pH (б) электрохимически активированной воды в открытых системах (▲ – католит, • – анолит)

но учитывать возможность изменения динамики релаксации электрохимически активированной воды в зависимости от уровня начальной активации, определяемой значениями ОВП и pH. Для этого лабораторный эксперимент был расширен и проведены дополнительные исследования, в которых изучалась скорость изменения параметров активации (ОВП, pH) при различных начальных значениях. В прилож. 1-2 и на рис. 4.5 и 4.6 приведены значения скорости изменения рассматриваемых параметров-характеристик электрохимически активированной воды в различные периоды и фазы релаксации. Из приведенных данных видно, что первые 3-4 ч после электрохимической обработки воды различий в скорости процесса релаксации основных активационных параметров (измененного ОВП и pH) в зависимости от уровня начальной активации воды практически не наблюдается. Расхождения в графиках скорости восстановления ОВП и pH электрохимически активированной воды начинают проявляться с 4-6-го часа после проведения электрохимической обработки. Последнее совпадает с фазой перехода логарифмической кривой релаксации от высокой динамики течения процесса к плавному изменению параметров-характеристик активированной воды. Различия в графиках скорости восстановления активационных параметров электрохимически обработанной воды в той или иной степени сохраняются до конца релаксационного процесса.

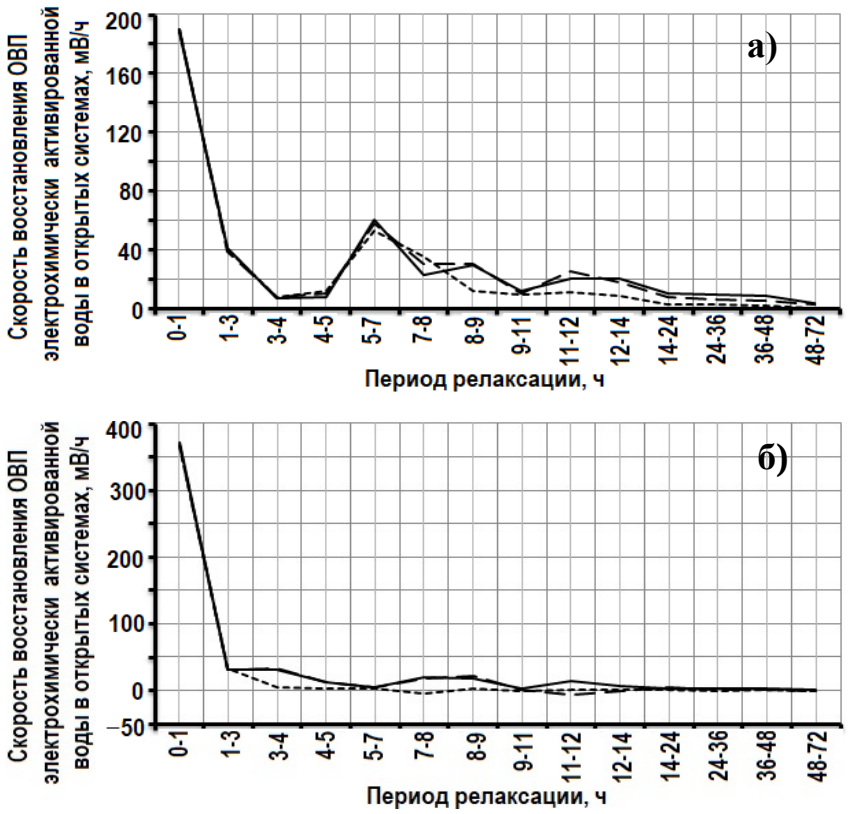

Рис. 4.5. Динамика восстановления ОВП католита (а) и анолита (б) при разных начальных уровнях активации:

католит:

- - - - - ОВП = –420 мВ;
— — ОВП = –650 мВ;
——— ОВП = –740 мВ

анолит:

- - - - - ОВП = +680 мВ
— — ОВП = +840 мВ;
——— ОВП = –740 мВ

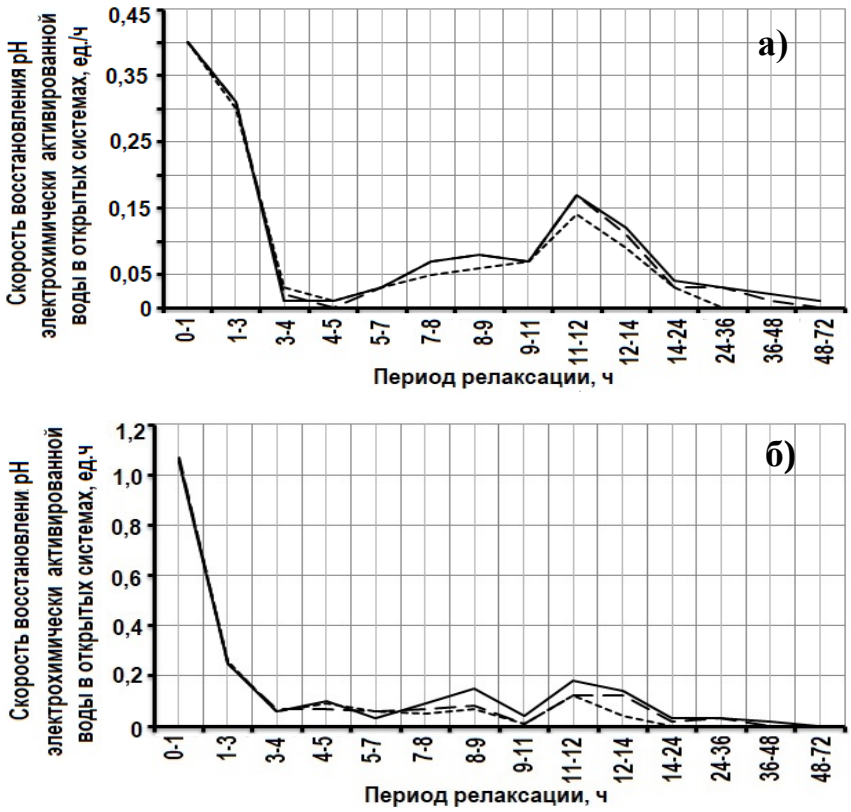

Рис. 4.6. Динамика восстановления pH католита (а) и анолита (б) при разных начальных уровнях активации:

католит:

- - - - - pH = 10,0;
— — pH = 10,5;
——— pH = 10,9

анолит:

- - - - - pH = 4,6;
— — pH = 3,9;
——— pH = 3,4

Таким образом, динамика релаксации электрохимически активированной воды, преимущественно на начальных этапах, практически не имеет различий в скорости процесса при разных исходных уровнях активации (совокупность значений ОВП и pH). Собственно, релаксация электрохимически активированной

воды (восстановление природных параметров и свойств), по крайней мере в двух параметрах – ОВП и pH водный среды – довольно точно описывается кривыми логарифмического типа.

Сам тип такого рода кривых характеризуется динамичным изменением значений функции на достаточно коротком интервале оси абсцисс с последующим замедлением динамики и ее бесконечном приближении к некой асимптотической прямой. Следует признать, что именно в начальный период динамика изменения активационного потенциала электрохимически активированной воды определяет большую долю релаксации параметров в открытых системах. Последнее обуславливает проблематичность использования электрохимически активированной воды в технологиях, требующих определенного времени на доставку или распределение и не предусматривающих непосредственное ("мгновенное") применение сразу после проведения электрохимической обработки.

4.4. Закономерности релаксации электрохимически активированной воды в закрытых системах

Ряд технологий, применяемых в сельском хозяйстве, предусматривает хранение и доставку электрохимически активированной воды до объекта назначения в системах с ограниченным доступом воздуха или совсем без сообщения с атмосферой. Это технологии, связанные с доставкой электрохимически активированной воды к месту применения в закрытых резервуарах, напорные водоводы, обеспечивающие перемещение активированной воды к объекту, включая системы капельного орошения, используемые для полива сельхозкультур водой измененным ОВП [1, 2, 49, 93]. Такие системы можно считать закрытыми, подразумевая в этом ограничение или полное исключение сообщения с атмосферным воздухом.

Распространение систем закрытого типа, использующихся в технологиях с применением электрохимически активированной воды, требует уточнения параметров и закономерностей релаксации измененных свойств последней с течением времени. Исследование закономерностей релаксации параметров электрохимически активированной воды проводилось на основе данных лабораторного эксперимента, реализованного нами с использованием закрытых резервуаров-емкостей из полимерных материалов. Результаты эксперимента приведены в прилож. 3-6 и табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты лабораторного исследования процесса релаксации электрохимически активированной воды в закрытых системах

Номер измерения	Время релаксации, ч	Католит		Анолит	
		редокс-потенциал, мВ	pH	редокс-потенциал, мВ	pH
1	0,1	–650	10,50	840	3,90
2	1,0	–580	10,43	797	4,12
3	2,0	–595	10,32	767	4,24
4	3,0	–560	10,24	746	4,41
5	4,0	–480	10,11	717	4,58
6	5,0	–526	10,12	696	4,65
7	6,0	–519	9,98	677	4,74
8	8,0	–474	9,71	647	4,88
9	10,0	–432	9,65	614	5,02
10	12,0	–383	9,41	593	5,22
11	18,0	–315	9,18	530	5,46
12	22,0	–269	9,11	493	5,64
13	46,0	30	8,72	397	6,32
14	70	150	8,44	345	6,75
15	94,0	210	8,21	287	6,81
16	118,0	214	7,88	252	6,85

Исследования показали, что продолжительность общего периода, в течение которого параметры-характеристики электрохимически активированной воды восстанавливаются до значений, близких к исходным, в закрытых системах достигает 94 ч, что почти втрое больше, чем в системах, имеющим свободное сообщение с атмосферным воздухом (см. табл. 4.2). Следует признать, что технологии применения электрохимически активированных водных сред, как правило, ориентированы на достаточно узкий интервал измененных значений ОВП или его сочетания с pH. Поэтому важно знать не только общий период релаксации электрохимически активированной воды, но и в гораздо большей степени динамику восстановления ее параметров-характеристик, закономерности, позволяющие точно просчитывать, когда активационный потенциал воды будет соответствовать предъявляемым требованиям, и какое время это состояние будет сохраняться.

Исследования показали, что динамика релаксации электрохимически активированной воды существенно отличается от законо-

мерностей, установленных для систем с открытым доступом атмосферного воздуха. Для проведения достоверных сравнений результатов, полученных в двух проведенных опытах, данные были сгруппированы по временным отрезкам. Особенность проведенной группировки данных заключается в том, что в начальные фазы, когда динамика восстановления измененных параметров-характеристик электрохимически активированной воды еще высока, группировались данные только в рамках первого часа измерения (точное соответствие). В дальнейшем, когда процессы релаксации замедляются и стабилизируются, данные группировали по временному интервалу, не превышающему 2 ч (интервальное соответствие). Вся совокупность данных была сгруппирована по 10 интервалам, из которых 7 соотносились по принципу точного соответствия. Группировка данных позволила обработать результаты лабораторного эксперимента статистически и определить доверительные интервалы для парных сравнений. Результаты сравнительного анализа полученного экспериментального материала с данными релаксации электрохимически активированной воды в открытых системах, приведены в табл. 4.3 и на рис. 4.7 и 4.8.

Анализ численного и графического материала показал, что различия в динамике восстановления параметров-характеристик электрохимически активированной воды в открытых и закрытых системах с полимерной оболочкой статистически значимы. Например, ОВП католита в открытых системах уже в один час после проведения электрохимической обработки воды составил –460 мВ, тогда как в закрытых системах достигал –580 мВ. Разница между вариантами составила140 мВ при наименьшей существенной разнице по фактору 11 мВ. Со временем эта разница возрастает, достигая наибольших значений, 254 мВ, к 8 часу после проведения электрохимической обработки.

Спустя 12 ч после проведения электрохимической обработки воды динамика восстановления ОВП католита в открытых системах существенно снижалась, в результате чего различия между значениями параметра по вариантам начинали постепенно сокращаться. Однако только через 70-72 ч после проведения электрохимической обработки воды значения ОВП католита, хранящегося в закрытой емкости и в емкости со свободным доступом атмосферного воздуха статистически сравнялись (различия не превышали 7 мВ при $НСР_{05}$ = 11 мВ).

Таблица 4.3

Результаты сравнительного анализа динамики релаксации электрохимически активированной воды в открытых и закрытых системах с полимерной оболочкой

Показатель	Способ хранения	Период релаксации, ч										$НСР_{05}$
		0,1	1	3	4	5	8	12	22-24	46-48	70-72	
Католит												
ОВП, мВ	Открытые системы	–650	–460	–383	–375	–365	–220	–145	–31	102	157	24,00
	Закрытые системы	–650	–580	–560	–480	–526	–474	–383	–269	30	150	
	$НСР_{05}$, мВ	11,00										
pH	Открытые системы	10,5	10,1	9,48	9,46	9,46	9,33	8,94	8,45	7,97	7,95	0,48
	Закрытые системы	10,5	10,43	10,24	10,11	10,12	9,71	9,41	9,11	8,72	8,44	
	$НСР_{05}$, мВ	0,22										$НСР_{05}$
Анолит												
ОВП, мВ	Открытые системы	840	472	409	376	363	334	315	272	245	245	34,00
	Закрытые системы	840	797	746	717	696	647	593	493	397	345	
	$НСР_{05}$, мВ	15,00										$НСР_{05}$
pH	Открытые системы	3,9	4,12	4,41	4,58	4,65	4,88	5,22	5,64	6,32	6,75	0,20
	Закрытые системы	3,9	4,97	5,46	5,53	5,6	5,79	6,01	6,43	6,82	6,82	
	$НСР_{05}$, мВ	0,09										$НСР_{05}$

Водородный показатель католита в закрытых системах сохранялся в еще большей степени, чем значения ОВП. Различия pH по вариантам с использованием закрытых или открытых систем для хранения электрохимически активированной воды у католита и через 70-72 ч после проведения электрохимической обработки достигали 0,49 при $НСР_{05}$ = 0,22. В тоже время высокая динамика снижения pH католита в открытых системах и сохранение уровня pH католита в закрытых системах определило формирование наибольших различий (до 0,76) уже к 3-му часу поле электрохимической активации воды. Таким образом, различия в динамике восстановления pH католита между вариантами с открытыми и закрытыми системами хранения быстро возрастают и сохраняются на статистически значимом уровне свыше 3-х суток.

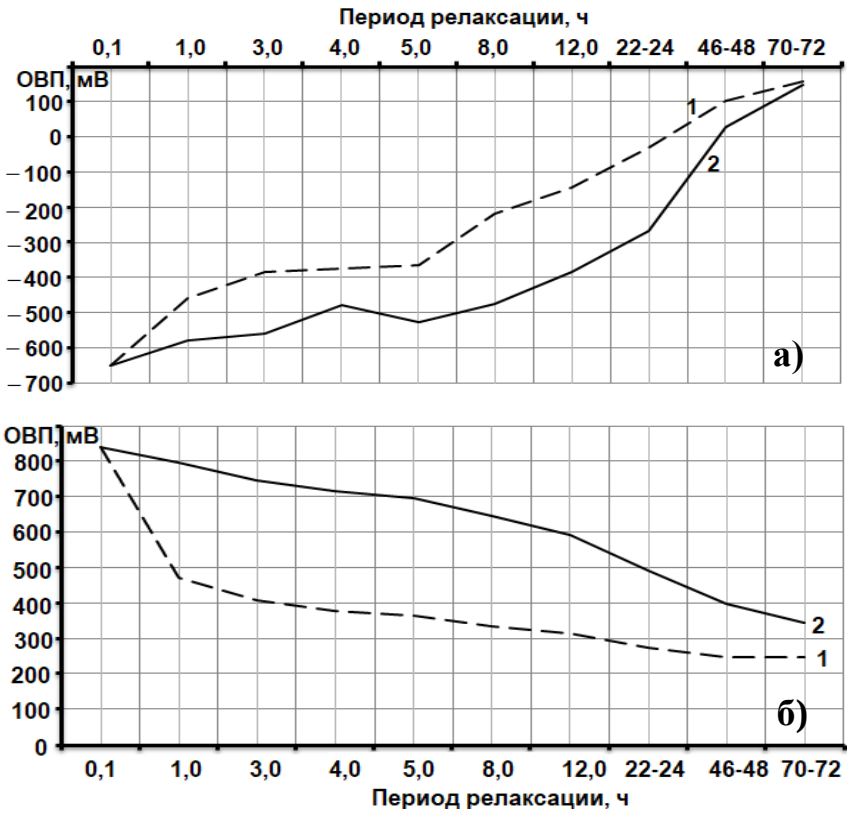

Рис. 4.7. Динамика восстановления ОВП католита (а) и анолита (б) в открытых (1) и закрытых (2) системах с полимерной оболочкой

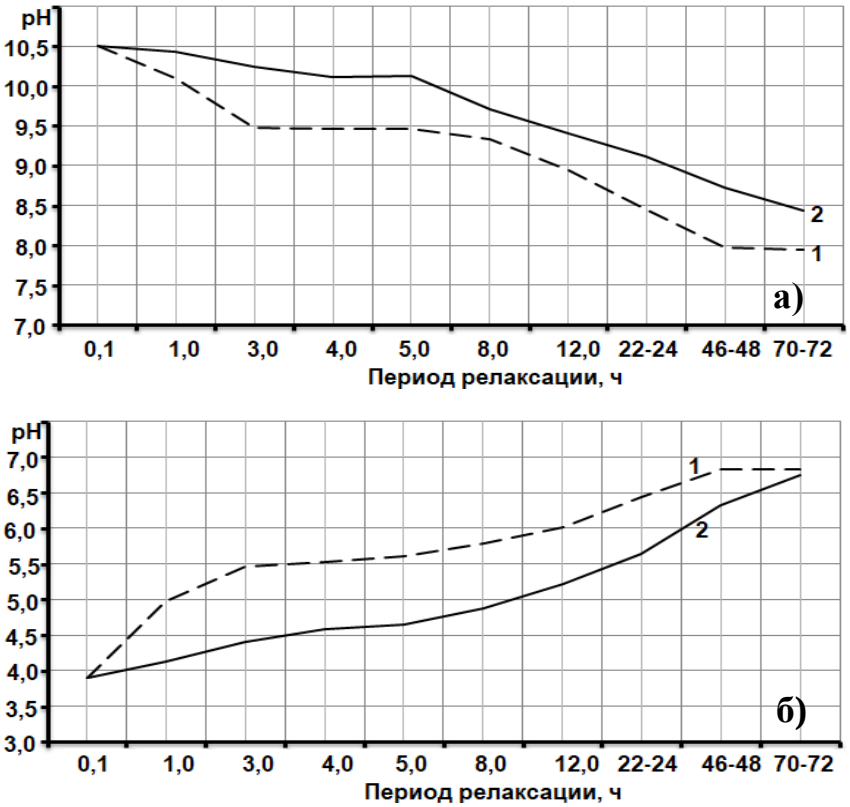

Рис. 4.8. Динамика восстановления pH католита (а) и анолита (б) в открытых (1) и закрытых (2) системах с полимерной оболочкой

Опыты с анолитом выявили еще более сильные различия в динамике сохранения активационного потенциала, проявляющиеся при использовании для хранения закрытых резервуаров и емкостей с открытым доступом атмосферного воздуха. Уже к первому часу после проведения электрохимической обработки во-

ды ОВП анолита при хранении в открытом резервуаре снизился с +840 до +472 мВ, тогда как при хранении в закрытом резервуаре через час после обработки ОВП еще сохранялся на уровне +797 мВ. Разница составила 325 мВ и продолжала углубляться до 4-го часа после электрохимической активации воды.

Различия в кривых восстановления pH у анолита при использовании закрытых и открытых систем с полимерной оболочкой были еще более заметны, чем у католита (см. рис. 4.7, 4.8). Наибольших значений, 1,05, различия pH между рассматриваемыми вариантами достигали к 3-му часу после проведения электрохимической обработки воды. Впоследствии различия между вариантами постепенно сглаживались, достигая к 70-72 часам после электрохимической обработки значений, сравнимых с ошибкой опыта (0,07 мВ при $НСР_{05}$ = 0,09 мВ).

Общие особенности восстановления параметров электрохимически активированной воды в открытых и закрытых системах с полимерной оболочкой заключаются в следующем:

сразу после проведения электрохимической активации параметры-характеристики электрохимически активированной воды в закрытых системах хорошо сохраняются, тогда как в открытых системах, быстро восстанавливаются, что обуславливает динамично растущую разницу в показателях между вариантами. Наибольшая разница в значениях параметров-характеристик электрохимически активированной воды достигается к 3-8-му часу после проведения электрохимической обработки;

по мере восстановления параметров-характеристик электрохимически активированной воды до значений, близких к исходным характеристикам природной воды, динамика восстановления значений параметров снижается, причем при хранении активированной воды в открытых резервуарах стабилизация процесса более выражена, чем в закрытых. Это приводит к тому, что спустя 3-8 ч после проведения обработки параметры-характеристики анолита и католита в вариантах с использованием открытых и закрытых резервуаров начинают сближаться, а различия сглаживаться.

Таким образом, динамика восстановления параметров-характеристик электрохимически активированной воды, анолита и католита, в закрытых системах носит принципиально иной характер, чем в открытых. Для описания закономерностей изменения ОВП анолита и католита в закрытых системах в процессе релаксации достаточно простых полиномов 3-й и 4-й степени (рис. 4.9):

$$ОВП_A = 2\cdot10^5t^4 - 0{,}0057t^3 + 0{,}56t^2 - 24{,}9t + 835, \quad (4.11)$$

где $ОВП_A$ – ОВП анолита, t – продолжительность периода релаксации, ч; $R^2 = 0{,}99$;

$$ОВП_K = 4\cdot10^{-4}t^3 - 0{,}16t^2 + 20{,}1t - 647, \quad (4.12)$$

где $ОВП_K$ – ОВП католита; $R^2 = 0{,}99$.

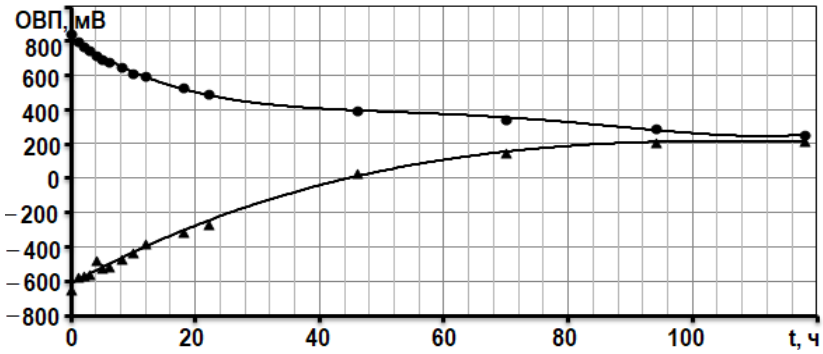

Рис. 4.9. Закономерности релаксации ОВП электрохимически активированной воды в закрытых системах с полимерной оболочкой (▲ – католит, ● – анолит)

Построенные по полученным данным теоретические кривые характеризуются заметно меньшей динамикой изменения ОВП. Например, анолит в течение первого часа терял не более 7,0 % своего активационного потенциала и еще 8,4 %, в течение следующих трех часов. ОВП католита в течение первого часа после обработки воды изменялся не более, чем на 70 мВ, что составляет 7,9 % активационного уровня. В течение последующих трех часов ОВП католита терял еще около 11,3 % от активационного уровня и до 43,5 % в течение первых суток.

Анализ численных данных по восстановлению pH электрохимически активированной воды в закрытых системах показал, что для математического описания процесса релаксации как анолита, так и католита достаточно полиномов 3-й степени (рис. 4.10):

$$pH_K = -6\cdot10^{-6}t^3 + 0{,}0012t^2 - 0{,}085t + 10{,}44, \quad (4.13)$$

где pH_K – pH католита; $R^2 = 0{,}98$;

$$pH_A = 6\cdot10^{-6}t^3 - 0{,}0011t^2 + 0{,}094t + 3{,}9, \quad (4.14)$$

где pH_A – pH анолита; $R^2 = 0{,}99$.

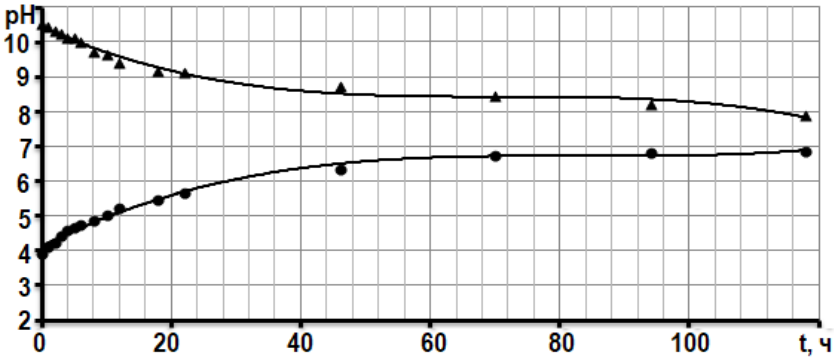

Рис. 4.10. Закономерности восстановления природных значений pH электрохимически активированной воды в закрытых системах с полимерной оболочкой (▲ – католит, ● – анолит)

Приведенные зависимости в отличие от логарифмических, полученных для описания процессов релаксации в открытых системах, характеризуются гораздо меньшей динамикой восстановления pH электрохимически активированной воды, по крайней мере на начальных этапах. Например, pH анолита в течение первого часа после электрохимической обработки воды восстанавливает не более 6,2 % своего активационного уровня, и еще около 3,3 %, в течение следующего часа. В тоже время, за сутки восстанавливается примерно половина измененного pH электрохимически активированной воды. В целом, закономерности изменения pH активированной воды полностью отражают динамику изменения ОВП в закрытых системах.

Таким образом, в закрытых системах релаксация параметров электрохимически активированной воды характеризуется меньшей динамикой, чем в открытых системах. Это позволяет эффективно использовать закрытые оросительные системы из полимерных материалов (таких, как капельное орошение) и дает принципиальное решение проблемы использования электрохимически активированной воды для полива сельхозкультур.

4.5. Закономерности релаксации поликомпонентных водных сред в закрытых системах

Как уже говорилось, термин "электрохимически активированная (…ный)" подразумевает не только (и даже не столько) чистую воду, но и ее растворы с различными химическими веществами. Другим способом применения электрохимически активированной воды является ее использование, собственно, для приготовления растворов. В частности, при поливе сельскохозяйственных культур актуальны вопросы приготовления и использования растворов минеральных удобрений на основе электрохимически активированной воды. Прогнозирование свойств раствора электрохимически активированной воды и минеральных удобрений остается важной не решенной задачей, требующей знания закономерностей релаксации электрохимически активированных поликомпонентных водных сред со специфическим химическим составом.

При разработке программы исследований закономерностей релаксации раствора минеральных удобрений в электрохимически активированной воде учитывался опыт изучения закономерностей релаксации природной электрохимически активированной воды в

чистом виде. В первую очередь учитывалось, что наибольшая динамика восстановления параметров-характеристик электрохимически активированной воды наблюдается сразу после электрохимической обработки, т. е. в начальные фазовые периоды. Кроме того, все известные агротехнологии, связанные с применением растворов минеральных удобрений на основе электрохимически активированной воды, характеризуются средней продолжительностью периода от активации до физического использования не более 0,5-3,0 ч. В связи с этим, при исследовании закономерностей релаксации электрохимически активированной воды с раствором минеральных удобрений особое внимание было уделено динамике восстановления значений параметров-характеристик именно в первые три часа после проведения электрохимической обработки. Результаты лабораторного эксперимента приведены в табл. 4.4.

Опыты показали, что приготовление раствора минеральных удобрений на основе электрохимически активированной воды сопровождается скачкообразным переходом электрохимически активированной водной системы к новому состоянию, характеризующемуся существенно изменившимися параметрами активационного потенциала. Например, добавление сульфата калия в анолит при концентрации 0,05 % снижало ОВП электрохимически активированной воды с +850 до +623 мВ, а при доведении концентрации раствора до 0,3 % он снижался до +264 мВ. Последнее значение практически соответствует естественному ОВП природной оросительной воды. Еще в большей мере добавление сульфата калия в анолит отражалось на pH активированной поликомпонентной системы. При доведении раствора сульфата калия до 0,3 % pH анолита изменялся от 3,1 до 9,34, характеризуя, фактически, щелочную среду.

При добавлении в раствор суперфосфата ОВП анолита изменялся слабо, но отмечено существенное падение активационного потенциала католита.

Доведение концентрации суперфосфата в растворе до 0,05 % сопровождалось изменением ОВП с –700 мВ до –578 мВ, а при содержании в растворе 0,3 % суперфосфата ОВП активированной системы не превышал –469 мВ. Водородный показатель католита при этом изменялся от 10,73 – в сосудах без раствора минеральных удобрений до 6,29 – при концентрации суперфосфата 0,3 %. В результате получается вещество, характеризуемое отрицательным ОВП (–469 мВ) и слабокислой средой (pH = 6,29). Сама воз-

Таблица 4.4

Динамика восстановления редокс-потенциала и pH электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений, мВ

Концентрация раствора, %	Время, t	Сульфат калия		Суперфосфат		Карбамид (мочевина)	
		католит	анолит	католит	анолит	католит	анолит
Редокс-потенциал							
0	0	–700	850	–700	850	–700	850
0	1	–644	807	–644	807	–644	807
0	2	–622	777	–622	777	–622	777
0	3	–610	756	–610	756	–610	756
0,05	0	–685	623	–578	770	–673	665
0,05	1	–654	585	–530	732	–641	630
0,05	2	–639	560	–513	706	–626	608
0,05	3	–629	541	–503	689	–616	591
0,10	0	–675	512	–511	722	–655	633
0,10	1	–653	467	–456	697	–630	605
0,10	2	–642	442	–441	682	–620	590
0,10	3	–634	425	–432	670	–612	575
0,30	0	–648	264	–469	652	–636	601
0,30	1	–633	212	–407	635	–618	581
0,30	2	–625	200	–386	627	–610	570
0,30	3	–617	195	–375	620	–603	559
pH							
0	0	10,73	3,10	10,73	3,10	10,73	3,10
0	1	10,57	3,35	10,57	3,35	10,57	3,35
0	2	10,43	3,50	10,43	3,50	10,43	3,50
0	3	10,30	3,63	10,30	3,63	10,30	3,63
0,05	0	10,67	5,93	8,62	3,26	10,52	3,32
0,05	1	10,53	6,07	8,48	3,45	10,37	3,51
0,05	2	10,42	6,16	8,37	3,56	10,25	3,64
0,05	3	10,32	6,24	8,28	3,65	10,14	3,75
0,10	0	10,60	6,94	7,18	3,41	10,43	3,48
0,10	1	10,47	7,04	7,09	3,56	10,31	3,63
0,10	2	10,37	7,10	7,04	3,65	10,23	3,73
0,10	3	10,29	7,14	7,02	3,72	10,16	3,81
0,30	0	10,52	9,34	6,29	3,59	10,12	3,94
0,30	1	10,40	9,41	6,22	3,71	10,02	4,08
0,30	2	10,32	9,44	6,19	3,79	9,94	4,16
0,30	3	10,25	9,45	6,18	3,85	9,88	4,23

можность сочетания таких параметров применима только для электрохимически активированных сред на водной основе.

Приготовление раствора карбамида сопровождалось менее заметными изменениями ОВП и pH электрохимически активированной воды, как анолита, так и католита. Однако и в том, и в другом случае активационный потенциал раствора снижался по отношению к активационному потенциалу электрохимически активированной воды.

Результаты лабораторного эксперимента показали, что при добавлении в электрохимически активированную воду минеральных удобрений изменяется не только общий уровень активации водного раствора, но и динамика последующего восстановления параметров-характеристик активированных сред.

Применение разных видов химических соединений, включающих основные питательные макроэлементы, такие, как фосфор, калий и азот, оказывало заметное влияние на динамику релаксации, но качественный характер этого влияния был не одинаковым. Например, динамика восстановления редокс-потенциала электрохимически активированной воды после добавления карбамида (мочевины) существенно замедлялась. Последнее наблюдалось как в отношении к католиту, так и в отношении к анолиту, причем скорость релаксации снижалась пропорционально увеличению концентрации раствора. Раствор карбамида в анолите в концентрации 0,05 и 0,1 % настолько замедлял падение редокс-потенциала, что уже через 1,5 ч "мгновенные" изменения заряда электрохимически активированной воды, сопровождающие приготовление раствора, полностью компенсировались. Через 3 ч после активации наибольший ОВП католита наблюдался уже в варианте с 0,05 %-ным раствором карбамида.

Тоже самое наблюдалось и в отношении измененных при активации значениях pH анолита и католита. С увеличением концентрации карбамида в отрицательно и положительно заряженных компонентах электрохимически активированной воды динамика восстановления pH существенно замедлялась.

При добавлении суперфосфата в католит заметного изменения динамики восстановления редокс-потенциала раствора не наблюдалось. В тоже время, если изменение pH католита в течение первых трех часов релаксации на графике заметно, то при концентрации 0,3 % это практически горизонтальная прямая.

При добавлении суперфосфата в анолит существенно замедлялось восстановление как редокс-потенциала раствора, так и

значение pH.

Интересные результаты эксперимента были получены при добавлении в электрохимически активированную воду сульфата калия. Восстановление редокс-потенциала католита при добавлении сульфата калия замедлялось настолько, что уже через 2 ч после электрохимической обработки в природной воде оставалось наименьшее количество полученного заряда, а в 0,3 %-ном растворе – наибольшее. В тоже время изменение динамики релаксации анолита при добавлении сульфата калия в разных концентрациях, как по редокс-потенциалу, так и по значению pH, на графике практически не наблюдается.

Динамика релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений, в общем случае, не линейна. Однако, при выборе временного лага достаточной малой продолжительности любой нелинейный закон максимально приближается к линейным решениям. Динамика релаксационных процессов в электрохимически активированной воде или водных растворах такова, что уже при временном интервале в один час изменение активационных потенциалов происходит практически по линейному закону. Это допущение позволяет нам ввести показатель, характеризующий устойчивость электрохимически активированных систем, как воды, так и водных растворов, понимаемую как способность максимально продолжительное время сохранять неравновесное состояние, обусловленное, собственно, электрохимической активацией.

Принимая закон восстановления показателей-характеристик электрохимически активированной воды или растворов линейным (для определенного интервала времени), представим его в декартовых координатах (рис. 4.11). Здесь величина b – это, собственно, уровень активации воды (раствора), по оси X откладывается время с момента проведения электрохимической обработки. Нетрудно увидеть, что прямая релаксации, оси X и Y образуют прямоугольный треугольник, а отношение проекции прямой на ось X к проекции на ось Y, есть котангенс угла α – угла наклона прямой релаксации к оси X.

Учитывая, что прилежащий к углу α катет есть продолжительность периода релаксации, а противолежащий – изменение активационного потенциала воды или растворов за время T, равное продолжительности периода релаксации, то, собственно, зна-

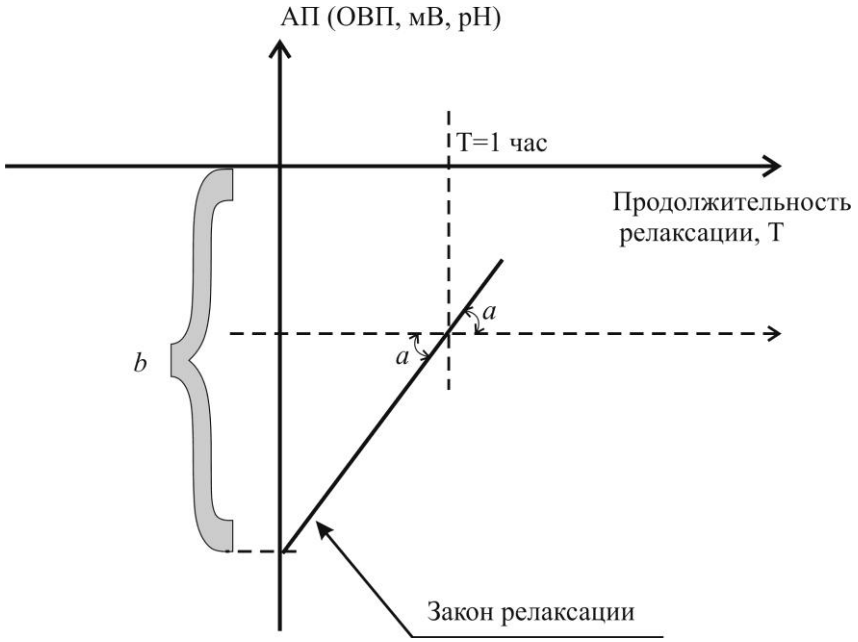

Рис. 4.11. Геометрическая интерпретация линейных участков закона релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений в декартовых координатах

чение котангенса этого угла будет прямо пропорционально способности сохранения активационных потенциалов. Абсолютное значение котангенса угла α в этом случае целесообразно использовать в качестве критерия устойчивости электрохимически активированных систем на водной основе. Фазовые значения этого критерия для растворов минеральных удобрений на основе электрохимически активированной воды приведены в табл. 4.5.

Анализ приведенных данных показывает, что со временем значение коэффициентов сохранения активационных параметров электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений возрастает. Это хорошо согласуется с общими представлениями о сущности явления электрохимической активации. Сразу после электрохимической обработки вода и водные растворы характеризуются наибольшим содержанием нестабильных химических образований, соответственно, параметры активации восстанавливаются наиболее динамично, коэффициент сохранения активационных параметров наименьший. Со временем в процессе восстановления, нестабильных химических компонентов в электрохимически активированной воде и водных растворах минеральных удобрений становится меньше, доля стабильных веществ возрастает, соответственно, процессы релаксации замедляются, коэффициент сохранения активационных параметров возрастает. Однако опыты показали, что значения коэффициентов сохранения ОВП и pH электрохимически активированной воды и водных растворов изменяются в зависимости от концентрации

этих растворов и не одинаковы для растворов разных химических соединений. Например, коэффициент сохранения ОВП католита в первый час после проведения электрохимической обработки, в зависимости от вида растворенного вещества и его концентрации в растворе изменялся от 58 до 240 с/мВ, или более, чем в 4 раза.

Таблица 4.5

Фазовые значения коэффициента сохранения ОВП и pH электрохимически актированной воды с раствором основных видов минеральных удобрений, с/мВ

Концентрация раствора, %	Фаза релаксации, Т, ч	Сульфат калия		Суперфосфат		Карбамид (мочевина)	
		католит	анолит	католит	анолит	католит	анолит
ОВП							
0	1	64	84	64	84	64	84
0	2	164	120	164	120	164	120
0	3	300	171	300	171	300	171
0,05	1	116	95	75	95	113	103
0,05	2	240	144	212	138	240	164
0,05	3	360	189	360	212	360	212
0,10	1	164	80	65	144	144	129
0,10	2	327	144	240	240	360	240
0,10	3	450	212	400	300	450	240
0,30	1	240	69	58	212	200	180
0,30	2	450	300	171	450	450	327
0,30	3	450	720	327	514	514	327
pH							
0	1	22500	14400	22500	14400	22500	14400
0	2	25714	24000	25714	24000	25714	24000
0	3	27692	27692	27692	27692	27692	27692
0,05	1	25714	25714	25714	18947	24000	18947
0,05	2	32727	40000	32727	32727	30000	27692
0,05	3	36000	45000	40000	40000	32727	32727
0,1	1	27692	36000	40000	24000	30000	24000
0,1	2	36000	60000	72000	40000	45000	36000
0,1	3	45000	90000	180000	51429	51429	45000
0,3	1	30000	51429	51429	30000	36000	25714
0,3	2	45000	120000	120000	45000	45000	45000
0,3	3	51429	360000	360000	60000	60000	51429

Результаты расчетов, приведенных в таблице для первого часа после электрохимической обработки воды, выявили сле-

дующие общие закономерности:

приготовление раствора на основе сульфата калия способствует увеличению коэффициентов сохранения ОВП и pH католита прямо пропорционально концентрации раствора. Например, при концентрации 0,05 % значение коэффициента сохранения ОВП католита составляло 116 с/мВ, при концентрации 0,1 % – достигло 164, а при концентрации 0,3 % – возросло до 240 с/мВ.

В тоже время, при приготовлении раствора сульфата калия на основе анолита наибольшие значения коэффициента сохранения ОВП, 95 с/мВ, были отмечены при концентрации 0,05 %. С увеличением концентрации раствора до 0,1 % и 0,3 %, значения коэффициента сохранения ОВП анолита снижались соответственно до 80 и 69 с/мВ;

при использовании суперфосфата для приготовления раствора на основе электрохимически активированной воды наблюдалась обратная картина. При добавлении суперфосфата в католит в концентрации 0,05 % коэффициент сохранения ОВП был наибольшим и составлял 75 с/мВ. При этом коэффициент сохранения ОВП природной электрохимически активированной воды составлял 64 с/мВ, а при увеличении концентрации суперфосфата до 0,1 и 0,3 % – снижался соответственно до 65 и 58 с/мВ. При использовании анолита для приготовления раствора суперфосфата значение коэффициентов сохранения ОВП и pH возрастало пропорционально концентрации этого химического соединения;

приготовление раствора на основе карбамида (мочевины) способствует увеличению коэффициентов сохранения ОВП и pH прямо пропорционально концентрации раствора как у анолита, так и у католита. Наибольшее значение коэффициента сохранения ОВП католита при концентрации раствора 0,3 % составило 200 с/мВ, а анолита – 180 с/мВ. При этом значения коэффициента сохранения pH католита и анолита достигали, соответственно, 36000 и 25714 с/ед.

Таким образом, приготовление раствора на основе электрохимически активированной воды и различных химических соединений сопровождается изменением динамики восстановления параметров-характеристик электрохимически активированных сред, что должно учитываться при проектировании технологических процессов и может быть использовано для регулирования процессов релаксации путем изменения концентрации раствора.

4.6. Обобщенная модель релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений

Практический опыт применения электрохимически активированной воды для полива сельхозкультур показывает, что решение задачи пространственного прогнозирования активационных потенциалов, собственно, оросительной воды, и приготовленных на ее основе питательных растворов минеральных удобрений является необходимым условием адаптации методики проектирования систем капельного орошения с модулем электрохимической активации. Разработанная модель состояния электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений в системе капельного орошения основана на наиболее полном учете закономерностей релаксации (восстановления) активированных водных сред. В тоже время, закономерности релаксации природной электрохимически активированной воды или приготовленных на ее основе растворов, изучению которых посвящены разделы 4.1-4.3 настоящей работы, довольно сложны и требуют определенного обобщения. В оптимуме решение этой задачи предусматривает создание обобщенной модели релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов.

Динамика релаксационных процессов в электрохимически активированной воде или водных растворах, как правило, не линейна [122]. Но, как уже говорилось, при выборе временного лага достаточной малой продолжительности любой нелинейный закон максимально приближается к линейным решениям. Динамика релаксационных процессов в электрохимически активированной воде или водных растворах такова, что уже при временном интервале в один час изменение активационных потенциалов происходит практически по линейному закону:

$$\Delta P = \upsilon t + b, \qquad (4.15)$$

где t – продолжительность периода релаксации; b – значение активационного потенциала в начале периода релаксации ($t = 0$), υ – скорость релаксационных процессов. В геометрической интерпретации параметр υ соответствует тангенсу угла α наклона к оси времени прямой, характеризующей линейный закон релаксации активационных процессов. Этот параметр не зависит от начального активационного потенциала электрохимически активиро-

ванной воды или водных растворов и поэтому может быть взят за основу разрабатываемой модели.

Разобьем общий период восстановления свойств электрохимически активированной воды на равные по продолжительности интервалы, а продолжительность дискретизированных временных интервалов примем равной 1 ч. Тогда, используя линейные значения скорости релаксации (параметр υ, тангенс угла α), для каждого из дискретизированных временных отрезков периода релаксации можно прогнозировать и активационный потенциал воды или водных растворов в рамках этого периода. Например, если прогноз необходимо составить для периода, продолжительность которого не превышает 1 ч, то расчет следует проводить по формуле

$$P_{0:1} = \upsilon_1 t_{0:1} + b_0, \qquad (4.16)$$

где $P_{0:1}$ – активационный потенциал электрохимически активированной воды на момент времени t, но в рамках первого часа релаксации; υ_1 – линейная скорость релаксации активированной воды в течение первого часа после электрохимической обработки; $t_{0:1}$ – переменная продолжительности периода релаксации в течение первого часа после электрохимической обработки воды или водного раствора; b_0 – начальный уровень активации воды.

Прогноз активационного потенциала воды на период после первого, но в пределах второго часа после электрохимической обработки, определится по схожей зависимости:

$$P_{1:2} = \upsilon_2 t_{1:2} + b_1, \qquad (4.17)$$

отличие которой от первой заключается в изменении значения параметра υ (линейная скорость для отрезка $t_{1:2}$) и значения свободного члена b_1. Причем значение свободного члена b_1 можно определить по зависимости: $b_1 = P_1 = \upsilon_1 t_1 + b_0$. Тогда

$$P_{1:2} = \upsilon_2 t_{1:2} + \upsilon_1 t_1 + b_0, \qquad (4.18)$$

$$P_{2:3} = \upsilon_3 t_{2:3} + \upsilon_2 t_2 + \upsilon_1 t_1 + b_0 \qquad (4.19)$$

и так далее, в зависимости от того, на какой момент времени значения активационных параметров нас интересует. Общий вид зависимости можно свести к следующей форме:

$$P_{(i-1):i} = \upsilon_i t_{(i-1):i} + \upsilon_{i-1} t_{i-1} + \upsilon_{i-2} t_{i-2} + \ldots b_0, \qquad (4.20)$$

где i – продолжительность периода после электрохимической обработки воды, ч.

Практический опыт показывает необходимость учета в обобщенной модели релаксации электрохимически активированной воды и приготовленных на ее основе растворов тех изменений состояния, которые сопровождаются добавлением минеральных

удобрений при приготовлении раствора. О существенности таких изменений и их определяющем действии на активационный потенциал новоприготовленного раствора свидетельствуют результаты эксперимента, анализ которых дан в разделе 4.3 монографии.

Обозначим градиент падения активационного потенциала электрохимически активированной воды при добавлении в раствор минеральных удобрений как $\Delta\overline{P}$. Тогда выражение (4.20) примет вид

$$P_i = \Delta\overline{P} + \upsilon_i t_i + \upsilon_{i-1} t_{i-1} + \upsilon_{i-2} t_{i-2} + \ldots b_{0.} \qquad (4.21)$$

Это выражение может быть использовано в качестве обобщенной расчетной модели для оценки релаксации электрохимически активированной воды и приготовленных на ее основе растворов, в частности, растворов минеральных удобрений. Идентифицируем параметры модели.

Результаты численного исследования градиента падения активационного потенциала электрохимически активированной воды позволяют сделать обоснованный вывод о его зависимости от концентрации приготовленного раствора, что позволяет для оценки связей между параметрами применить метод регрессионного анализа. В результате такого анализа был получен комплекс регрессионных уравнений, позволяющий вычислить величину градиента падения активационного потенциала при приготовлении раствора и дифференцировать его для растворяемых веществ с различным химическим составом.

Для оценки градиента изменения ОВП анолита ($\Delta P^{ОВП}$, мВ) при добавлении разных форм минеральных удобрений могут быть использованы следующие зависимости, где растворы готовились на основе анолита, C – концентрация раствора, %:

При приготовлении раствора простого суперфосфата:

$$\Delta\overline{P}^{ОВП} = 3195{,}1C^2 - 1610{,}5C - 2{,}2;\ R^2 = 0{,}96, \qquad (4.22)$$

При приготовлении раствора мочевины:

$$\Delta\overline{P}^{ОВП} = -23{,}51\ln(C) - 268{,}63;\ R^2 = 0{,}92. \qquad (4.23)$$

При приготовлении раствора сульфата калия:

$$\Delta\overline{P}^{ОВП} = 7597{,}9C^2 - 4193{,}6C - 10{,}65;\ R^2 = 0{,}98, \qquad (4.24)$$

Графики представленных зависимостей приведены на рис. 4.12а, из которого видно, что:

наибольшими изменениями активационного потенциала анолита сопровождается приготовление раствора сульфата калия в концентрации 0,1-0,3 %;

при приготовлении раствора суперфосфата ОВП анолита

меняется в наименьшей степени;

изменения ОВП анолита при добавлении мочевины не намного превышают действие суперфосфата, но существенны даже при малых концентрациях раствора (логарифмическая зависимость).

Для оценки градиента изменения ОВП католита при добавлении разных форм минеральных удобрений нами предложена следующая совокупность регрессионных уравнений, где растворы готовились на основе католита, C – концентрация раствора, %:

При приготовлении раствора простого суперфосфата:

$$\Delta\overline{P^{ОВП}} = 21621C^3 - 14249C^2 + 3099C - 0{,}031;\ R^2 = 0{,}97, \quad (4.25)$$

При приготовлении раствора мочевины:

$$\Delta\overline{P^{ОВП}} = -1201{,}3C^2 + 572{,}24C + 0{,}4;\ R^2 = 0{,}98, \quad (4.26)$$

При приготовлении раствора сульфата калия:

$$\Delta\overline{P^{ОВП}} = 163{,}86x + 4{,}56;\ R^2 = 0{,}95. \quad (4.27)$$

Графики представленных зависимостей приведены на рис. 4.12б, из которого видно, что влияние одних и тех же химических соединений на активационный потенциал анолита и католита существенно различается. Коэффициент детерминации приведенных зависимостей находится на уровне 0,95-0,98, что характеризует их высокую надежность и возможность использования в качестве составного компонента обобщенной модели релаксации электрохимически активированной воды и приготовленных на ее основе растворов минеральных удобрений.

Исследования градиента изменения pH электрохимически активированной воды позволили для его оценки также предложить

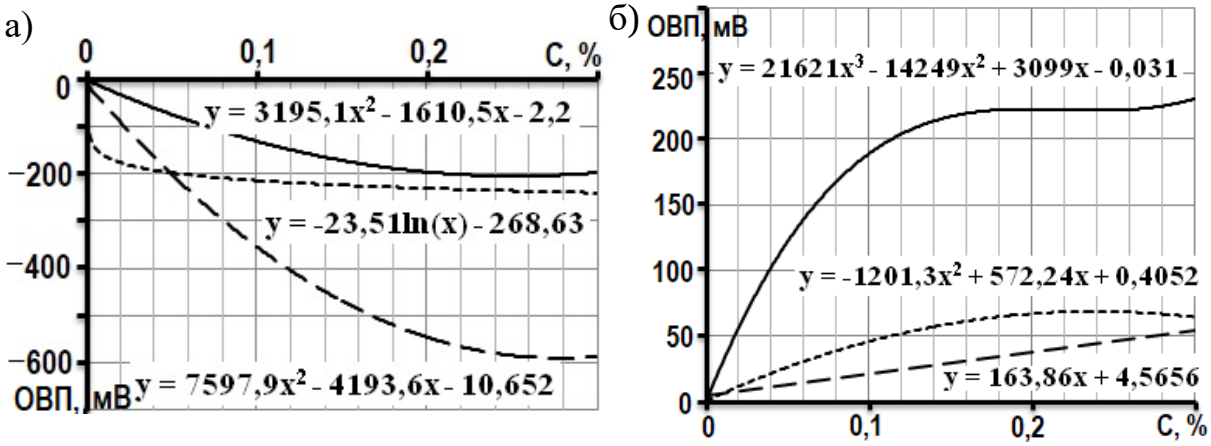

Рис. 4.12. Падение ОВП анолита (а) и католита (б) в зависимости от концентрации растворов минеральных удобрений (----- мочевина, ——— суперффосфат, — — сульфат калия)

комплекс регрессионных зависимостей от концентрации растворяемых химических компонентов.

Оценить градиент изменения pH анолита при приготовлении раствора на основе суперфосфата с достаточной степенью надежности можно по следующей зависимости:

$$\Delta\overline{P^{pH}} = -7{,}18C^2 + 3{,}8C - 0{,}003;\ R^2 = 0{,}96, \qquad (4.28)$$

где C – концентрация раствора суперфосфата, %.

Надежный прогноз градиента изменения pH анолита при приготовлении раствора на основе мочевины также обеспечивается при использовании простого полинома второй степени:

$$\Delta\overline{P^{pH}} = -5{,}20C^2 + 4{,}34C + 0{,}004;\ R^2 = 0{,}99, \qquad (4.29)$$

где C – концентрация раствора мочевины, %.

Для оценки градиента изменения pH анолита при приготовлении раствора на основе сульфата калия предлагается использовать следующую зависимость:

$$\Delta\overline{P^{pH}} = -95{,}97C^2 + 48{,}92C + 0{,}18;\ R^2 = 0{,}97. \qquad (4.30)$$

Из графика приведенных зависимостей (рис. 4.13) видно, что численная оценка градиента изменения pH анолита при добавлении рассмотренных удобрений прямо пропорциональна концентрации их содержания в растворе.

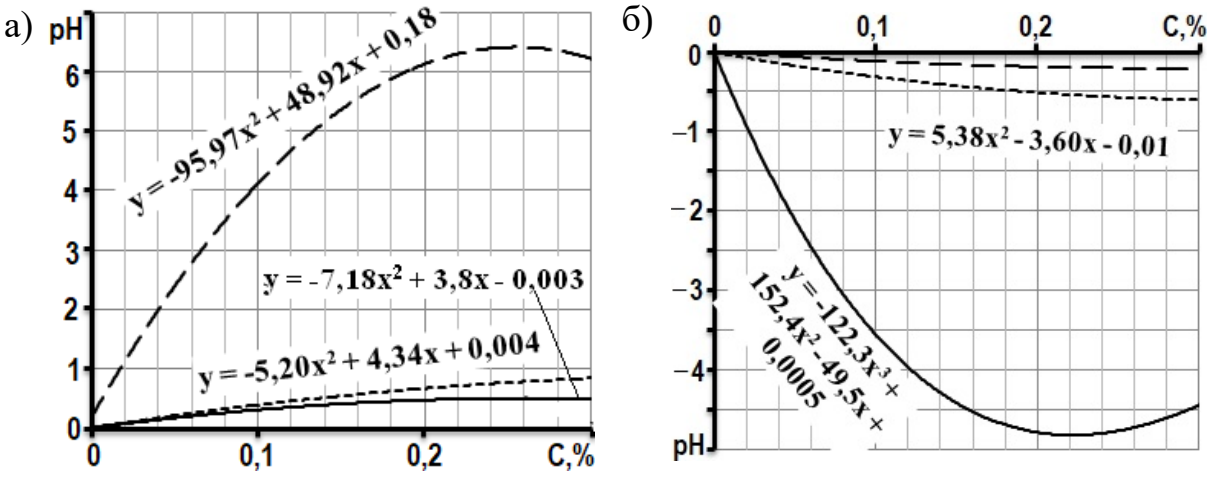

Рис. 4.13. Восстановление pH анолита (а) и католита (б) в зависимости от концентрации растворов минеральных удобрений (- - - - мочевина, —— суперфосфат, — — сульфат калия)

Градиент изменения pH католита при добавлении в раствор рассмотренных минеральных удобрений всегда имел отрицательный знак. Анализ экспериментального материала показал, что

получение надежного прогноза численного изменения pH католита при приготовлении раствора суперфосфата обеспечивается при использовании полинома 3-й степени:

$$\Delta\overline{P^{pH}} = -122{,}3C^3 + 152{,}4C^2 - 49{,}5C + 0{,}001;\ R^2 = 0{,}95, \quad (4.31)$$

где C – концентрация раствора суперфосфата, %.

Для оценки градиента изменения pH католита при приготовлении раствора на основе мочевины предлагается использовать следующую зависимость:

$$\Delta\overline{P^{pH}} = 5{,}38x^2 - 3{,}60x - 0{,}01;\ R^2 = 0{,}97 \quad (4.32)$$

где C – концентрация раствора мочевины, %.

Численный прогноз изменения pH католита при приготовлении раствора на основе сульфата калия с наибольшей степенью достоверности можно сделать по зависимости:

$$\Delta\overline{P^{pH}} = 2{,}85x^2 - 1{,}56x + 0{,}003;\ R^2 = 0{,}97 \quad (4.33)$$

где C – концентрация раствора сульфата калия, %.

Алгоритм определения значений параметров υ в уравнении 4.14 обобщенной модели релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений на основе результатов натурных исследований сводится к следующему:

кривая релаксации электрохимически активированной воды с растворенными в ней минеральными удобрениями, разбивается на n-ное число интервалов таким образом, чтобы рамках этого интервала с высокой степенью достоверности закон релаксации мог быть описан линейными уравнениями: $\Delta P = \upsilon t + b$;

для каждого из отрезка, полученного разбиением кривой релаксации на периоды (фазы), по опытным данным методом регрессионного анализа определяются параметры линейного уравнения регрессии вида: $\Delta P_i = \upsilon_i T_i + b$;

полученные значения параметров υ идентифицируются и систематизируются. Систематизированные значения параметров υ, которые, по своей сущности являются градиентами фазовых скоростей релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений, приведены в табл. 4.6.

Исследования показали, что в зависимости от концентрации водных растворов минеральных удобрений и времени с момента электрохимической обработки воды в активационном модуле значения фазовых скоростей релаксации изменяются по вполне определенным закономерностям, которые могут быть описаны не-

Таблица 4.6

Динамика фазовых скоростей восстановления ОВП электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений

Концентрация раствора, %	Фаза релаксации, Т, ч	Сульфат калия		Суперфосфат		Карбамид (мочевина)	
		католит	анолит	католит	анолит	католит	анолит
0	1	56	–43	56	–43	56	0
0	2	22	–30	22	–30	22	0
0	3	12	–21	12	–21	12	0
0,05	1	31	–38	48	–38	32	0,05
0,05	2	15	–25	17	–26	15	0,05
0,05	3	10	–19	10	–17	10	0,05
0,10	1	22	–45	55	–25	25	0,10
0,10	2	11	–25	15	–15	10	0,10
0,10	3	8	–17	9	–12	8	0,10
0,30	1	15	–52	62	–17	18	0,30
0,30	2	8	–12	21	–8	8	0,30
0,30	3	8	–5	11	–7	7	0,30

линейными уравнениями множественной регрессии вида:

$$\upsilon = a + bC + kt + dC^2 + et^2 + fCt, \qquad (4.34)$$

где υ – градиент скорости восстановления ОВП электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений, мВ/ч; C – концентрация минеральных удобрений в растворе, %; t – фаза релаксации, ч.

Представленная зависимость регрессионного типа не связана с физико-химическими характеристиками процессов релаксации электрохимически активированной воды, и не может быть использована для прогнозирования динамики восстановления электрохимически активированной воды с раствором других минеральных веществ, а также с растворами, концентрация которых превышает 0,3 %. Ограничение прогноза по времени релаксации составляет 3 ч. С учетом указанных ограничений зависимость обеспечивает возможность точного прогнозирования фазовых скоростей восстановления ОВП католита. Коэффициент корреляции зависимостей с данными, полученными в результате лабораторного эксперимента, достигает 0,91-0,99. Идентифицированные параметры зависимостей для растворов трех видов минеральных удобрений (сульфата калия, суперфосфата и карбамида), дифференцированные по анолиту и католиту, приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Идентифицированные значения параметров зависимостей фазовых скоростей восстановления ОВП электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений

Раство-ренное вещество	Анолит/ католит	Параметр						R^2
		a	b	k	d	e	f	
Сульфат калия	Анолит	–72,5	–64,2	37,3	–11,1	–7,00	46,2	0,94
	Католит	82,9	–315,8	–41,3	511,3	6,25	49,4	0,91
Супер-фосфат	Анолит	–62,4	206,7	21,5	–314,5	–2,75	–20,0	0,97
	Католит	117,5	–31,8	–77,1	236,1	14,10	–16,0	0,99
Карбамид	Анолит	–65,5	190,8	27,0	–309,8	–4,25	–20,0	0,99
	Католит	86,8	–294,6	–45,6	489,7	7,25	43,1	0,93

На рис. 4.14 представлен пример реализации зависимости скорости изменения ОВП для раствора сульфата калия в католите.

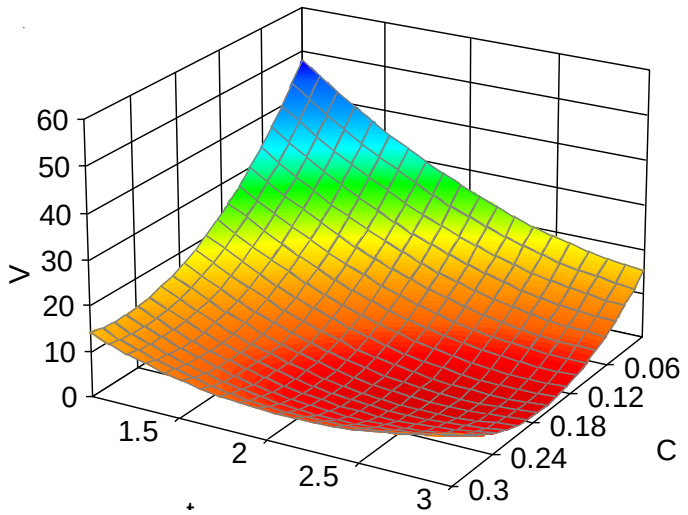

Рис. 4.14. Градиент скорости релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений при разной концентрации (раствор сульфата калия, католит)

Аналогичным образом, на основании результатов лабораторного эксперимента были определены значения фазовых скоростей восстановления pH электрохимически активированной воды и приготовленных на ее основе растворов. Результаты расчетов систематизированы и сведены в табл. 4.8.

Анализ приведенных в таблице данных позволяет выявить ряд довольно устойчивых закономерностей изменения динамики релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений в зависимости от концентрации раствора и времени после проведения электрохимической обработки. В общем случае закономерности сводятся к следующему:

значения фазовых скоростей восстановления pH электрохи-

мически активированной воды с раствором минеральных удобрений существенно ниже, чем восстановление природной электрохимически активированной воды;

Таблица 4.8

Динамика фазовых скоростей восстановления pH электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений

Концентрация раствора, %	Фаза релаксации, T, ч	Сульфат калия		Суперфосфат		Карбамид (мочевина)	
		католит	анолит	католит	анолит	католит	анолит
0	1	–0,16	0,25	–0,16	0,25	–0,16	0,25
0	2	–0,14	0,15	–0,14	0,15	–0,14	0,15
0	3	–0,13	0,13	–0,13	0,13	–0,13	0,13
0,05	1	–0,14	0,14	–0,14	0,19	–0,15	0,19
0,05	2	–0,11	0,09	–0,11	0,11	–0,12	0,13
0,05	3	–0,10	0,08	–0,09	0,09	–0,11	0,11
0,10	1	–0,13	0,1	–0,09	0,15	–0,12	0,15
0,10	2	–0,10	0,06	–0,05	0,09	–0,08	0,10
0,10	3	–0,08	0,04	–0,02	0,07	–0,07	0,08
0,30	1	–0,12	0,07	–0,07	0,12	–0,10	0,14
0,30	2	–0,08	0,03	–0,03	0,08	–0,08	0,08
0,30	3	–0,07	0,01	–0,01	0,06	–0,06	0,07

с увеличением концентрации, растворенных в электрохимически активированной воде веществ, наблюдается устойчивый тренд к снижению фазовых скоростей восстановления pH водной среды;

наибольшие значения фазовых скоростей релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений наблюдаются в первый после проведения электрохимической обработки час. В последующие периоды (фазы) значения скоростей восстановления pH воды или водных растворов монотонно снижается.

Обобщение и анализ экспериментального материала позволили нам предложить совокупность зависимостей, позволяющих дать надежную оценку значения фазовых скоростей восстановления pH электрохимически активированной воды или водных растворов минеральных удобрений в зависимости от концентрации раствора и продолжительности периода релаксации. Всю совокупность зависимостей удалось свести к одной, полиномиальной форме второй степени с параметрами, приведенными в табл. 4.9:

$$\upsilon = a + bC + kt + dC^2 + et^2 + fCt, \qquad (4.35)$$

где υ – градиент скорости релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений, ед./ч; *C* – концентрация минеральных удобрений в растворе, %; *t* – фаза релаксации, ч.

Таблица 4.9

Идентифицированные значения параметров зависимостей фазовых скоростей восстановления pH электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений

Раство-ренное вещество	Анолит/ католит	Параметр						R^2
		a	b	k	d	e	f	
Сульфат калия	Анолит	–0,210	0,460	0,053	–1,15	–0,009	0,028	0,99
	Католит	0,330	–1,570	–0,120	3,28	0,020	0,065	0,97
Супер-фосфат	Анолит	–0,210	0,125	11,200	–34,88	0,050	–0,006	0,97
	Католит	0,369	–1,140	–0,150	2,21	0,025	0,091	0,98
Карба-мид	Анолит	–0,208	0,020	7,360	–22,40	0,050	–0,007	0,99
	Католит	0,359	–0,974	–0,149	1,94	0,025	0,060	0,96

На рис. 4.15 представлен пример реализации такой зависимости для раствора сульфата калия в католите.

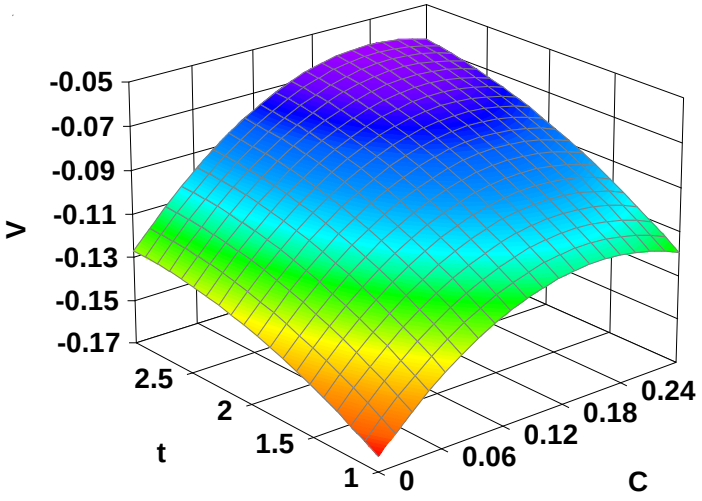

Рис. 4.15. Градиент скорости релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений при разной концентрации (раствор сульфата калия, католит)

Как видно из рисунка, зависимость имеет выраженную выпуклую форму с наибольшими значениями скорости релаксации в точке *C* = 0 (электрохимически активированная природная вода), *t* = 1 (первый час после проведения электрохимической обработки. Сходимость с опытными данными высокая, коэффициент корреляции зависимости составляет 0,99. Такая коррелируемость показателей позволяет уверенно использовать зависимость в практических расчетах.

Таким образом, используя систему зависимостей для определения градиентов фазовых скоростей релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений, зависимостей "мгновенного" изменения ОВП и pH активированной воды при добавлении минеральных удобрений в разной концентрации и обобщенную модель релаксации, представленную уравнением (4.20), можно определить активационный потенциал водной среды для любого времени *t*, прошедшего с момента электрохимической обработки воды в активационном модуле.

4.7. Оценка соответствий модельных и реальных параметров состояния электрохимически активированной воды в системе капельного орошения

Проверка адекватности, обоснованности модели является неотъемлемым этапом работ по ее созданию, позволяющим оценить ее соответствие поставленным целям. Обобщенная модель параметров состояния электрохимически активированной воды и водных растворов в системе капельного орошения имеет довольно разветвленную структуру, в разных блоках которой использовались как общеизвестные, теоретически обоснованные соотношения, так и эмпирические зависимости, полученные по результатам серии натурных экспериментов и имеющие стохастический характер. Цель моделирования вполне прагматичная, подчинена необходимости поиска наименее затратных путей решения задачи определения активационных потенциалов электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений в системе водопроводящих напорных трубопроводов капельного орошения. В соответствии с поставленной целью главным критерием оценки обоснованности модели будет являться эффективность решения задачи прогнозирования показателей, характеризующих измененное состояние электрохимически обработанной оросительной воды или водных растворов минеральных удобрений в различных, произвольных сечениях системы капельного орошения.

Для проверки обоснованности предложенной модели и ее соответствия задачам исследований нами была проведена серия натурных экспериментов, в ходе которых по длине капельной линии проводились измерения показателей, характеризующих уровень активации воды или водного раствора минеральных удобрений.

Измерения начинали с учетом продолжительности пролонгированного периода, необходимого для стабилизации работы активационного реактора. Опыты закладывались дифференцированно, с различной совокупностью начальных условий, которые впоследствии полностью копировались для построения модельных экспериментов. Исследования были проведены с природной электрохимически активированной водой, анолитом и католитом, а также с приготовленными на их основе растворами минеральных удобрений: карбамида, суперфосфата и сульфата калия. Результаты опытов (прилож. 7-9) использовались в качестве эталонных для сравнения с результатами модельного прогноза.

Результаты анализа соответствий модельных и реальных параметров состояния электрохимически активированной воды в системе капельного орошения систематизированы в табличной форме и визуализированы в графической форме.

Одним из основополагающих методов проверки адекватности модели, ее соответствию отражаемым реальным процессам, является метод сравнения средних и их статистических характеристик. Известно, что принадлежность двух выборок одной генеральной совокупности не подтверждается, если выборки имеют разные дисперсии. Поэтому одной из первых проверок адекватности модели является проверка гипотезы о равенстве дисперсий численной совокупности данных, полученных в результате эксперимента и численной совокупности модельных данных. Для решения этой задачи по общеизвестным формулам [23, 39, 51, 56] рассчитывались дисперсии опытных данных и численных решений, полученных в результате модельного эксперимента. Отношение вычисленных значений этих дисперсий, большей дисперсии к меньшей, образует известную статистику Фишера. Сравнение значений критерия Фишера, полученных в результате проведенных вычислений, с теоретическими значениями, позволяет судить о том, подтверждается гипотеза о равенстве дисперсий или отвергается. Если фактические значения критерия Фишера меньше теоретических, то нулевая гипотеза (о равенстве дисперсий) подтверждается. Если фактические значения критерия Фишера больше теоретических, то нулевая гипотеза (о равенстве дисперсий) отвергается. Сравнения проводили со значениями теоретического критерия Фишера, полученными для 5-%-ного уровня значимости (табл. 4.10).

Таблица 4.10

Результаты анализа соответствия модели по критерию Фишера

Показатель	Состав активированной среды							
	вода		сульфат калия		суперфосфат		карбамид	
	католит	анолит	католит	анолит	католит	анолит	католит	анолит
Окислительно-восстановительный потенциал								
Дисперсия модели	86,30	53,000	263,10	25595	2379,6	2570,2	250,20	751,40
Дисперсия опытных данных	124,90	123,500	224,60	22994	2029,9	2315,5	255,70	682,20
Fфакт.	1,45	2,330	1,17	1,11	1,17	1,11	1,02	1,10
Fтеор.	19,40	19,400	1,99	1,99	1,99	1,99	2,76	1,99
Водородный показатель								
Дисперсия модели	0,0007	0,0016	0,005	2,293	1,031	0,018	0,032	0,007
Дисперсия опытных данных	0,0014	0,0014	0,012	2,079	0,924	0,020	0,042	0,007
Fфакт.	1,95	1,107	2,59	1,10	1,120	1,12	1,31	1,03
Fтеор.	19,40	3,330	2,76	1,99	1,990	2,76	2,76	2,76

Расчеты подтвердили, что значения фактического критерия Фишера, полученного отношением дисперсий опытных и модельных данных, во всех случаях были меньше теоретического уровня для 5-%-ного уровня значимости. Это свидетельствует о том, что с вероятностью 95 % дисперсии опытной и модельной выборок равны, а значит выборки принадлежат одной генеральной совокупности.

Другой важной характеристикой рассматриваемой модели является необходимая точность прогнозирования значений показателей, характеризующих состояние электрохимически активированной воды или водных растворов минеральных удобрений в системе капельного орошения. Для оценки точности прогнозных решений была проведена статистическая оценка опытных средних, определенных дифференцированно, в начале капельной линии l = 0,3 м, в середине – l = 30 м и в конце l = 60 м. Кроме, собственно, арифметического среднего, по 10 повторностям рассчитывалась дисперсия показателя, стандартное отклонение от опытного среднего, ошибка среднего значения и величина довери-

тельного интервала. Исходные данные модели копировались с условий проведения натурных экспериментов. Оценка разности средних проводилась как в физических единицах, так и относительно опытного среднего в процентах.

Исходные значения ОВП, полученные на выходе из установки для электрохимической активации воды, в опытах незначительно варьировали около –630 мВ, что соответствовало активационному потенциалу –865 мВ (табл. 4.11).

Таблица 4.11

Модельные и фактические значения ОВП и pH электрохимически активированной воды в системе капельного орошения

Показатель		Католит			Анолит		
		l = 0,3 м	l = 30 м	l = 60 м	l = 0,3 м	l = 30 м	l = 60 м
ОВП							
Модельные значения	ОВП, мВ	–630,0	–628,00	–613,00	890,00	889,00	877,00
	Уровень активационного потенциала, мВ	–865,0	–863,00	–848,00	655,00	654,00	642,00
Оценка опытного среднего	$\overline{\text{ОВПср.}}$, мВ	–630,0	–631,00	–610,00	892,00	888,00	878,00
	Дисперсия, S^2	33,0	25,00	33,00	161,00	25,00	96,00
	Стандартное отклонение, S, мВ	5,7	5,00	5,70	12,70	5,00	9,80
	Ошибка средней	1,8	1,60	1,80	4,00	1,60	3,10
	Доверительный интервал (±), мВ	3,3	2,90	3,30	7,30	2,90	5,70
Оценка разностей	ОВП-$\overline{\text{ОВПср.}}$, мВ	0	–3,00	3,00	2,00	–1,00	1,00
	$\frac{\text{ОВП}-\overline{\text{ОВПср.}}}{\text{ОВПср.}}\cdot 100$, %	0	0,35	–0,35	0,31	–0,15	0,16
pH							
Модельные значения	pH	10,530	10,520	10,480	3,000	3,010	3,070
	Уровень активационного потенциала	3,100	3,090	3,050	–4,430	–4,420	–4,360
Оценка опытного среднего	$\overline{\text{pHср.}}$	10,550	10,530	10,460	3,000	3,000	3,050
	Дисперсия, S^2	0,002	0,025	0,012	0,001	0,001	0,001
	Стандартное отклонение, S	0,050	0,160	0,110	0,030	0,030	0,030
	Ошибка средней	0,016	0,051	0,035	0,008	0,010	0,011
	Доверительный интервал (±)	0,030	0,090	0,060	0,020	0,020	0,020
Оценка разностей	pH-$\overline{\text{pHср.}}$	0,020	0,010	–0,020	0	–0,010	–0,020
	$\frac{\text{pH}-\overline{\text{pHср.}}}{\text{pHср.}}\cdot 100$, %	0,650	0,320	–0,660	0	0,230	0,460

Активационный потенциал анолита на выходе из установки составлял +655 мВ, что соответствовало фактическому значению измененного ОВП +890 мВ. Соответственно, значение pH электрохимически обработанной воды на выходе из установки по католиту составляло 10,53, а по анолиту 3,0 (см. табл. 4.11). Эти значения и послужили опорной точкой для проведения модельных расчетов.

Исследования показали, что активационный потенциал хорошо сохраняется в капельных трубопроводах. И в опытах и по модельным расчетам ОВП электрохимически активированной воды в начале капельной линии был фактически равен полученному на выходе из установки заряду, а в середине 60-метровой капельной линии снижался всего на 1-4 мВ.

Только к концу капельной линии ОВП электрохимически активированной воды снижался на 13-20 мВ. Следует признать, что эксперимент проводился в лабораторных условиях, длина капельной линии не превышала 60 м, а установка для электрохимической обработки воды подключалась непосредственно к капельному трубопроводу. Это не соответствует условиям производства, но вполне достаточно для проверки точности прогнозных решений предложенной нами модели.

Приведенные в таблицах данные подтверждают соответствие модельных и полученных в опыте значений. Расхождения в средних значениях ОВП католита или анолита, полученных опытным путем и в результате модельных расчетов не превышали 3 мВ, тогда как значения доверительных интервалов для опытного среднего находились в пределах 2,9-7,3 мВ. Различия значений pH, определенных по модели и в результате проведения натурного эксперимента не превышали 0,65% и также находились в границах доверительного интервала. Результаты исследования сопоставимости опытных и модельных данных о состоянии электрохимически активированной воды с раствором минеральных удобрений приведены в прилож. 10, 11. Анализ представленных данных показывает, что рассчитанные по модели значения ОВП и измененного pH электрохимически активированной воды с раствором удобрений существенно ниже активационного показателя воды на выходе из установки-активатора. Например, ОВП католита с раствором сульфата калия в концентрации 0,05 % на первом капельном водовыпуске поливного трубопровода был на 15 мВ меньше, чем на выходе из установки-активатора, ОВП

анолита с добавлением сульфата калия в той же концентрации снижался на 227 мВ. Приготовление 0,05%-ного раствора суперфосфата на основе католита в соответствии с модельными расчетами обеспечивает сохранение ОВП на первом капельном водовыпуске на уровне –508 мВ, что на 122 мВ меньше активационного потенциала на выходе из установки-активатора.

До 80 мВ снижения активационного потенциала анолита на первом капельном водовыпуске прогнозирует предложенная модель при приготовлении 0,05-%-ного раствора суперфосфата. Схожие прогнозы модель выдает и для вариантов с растворами мочевины в разной концентрации, а также по значениям pH. Следует признать, что такое поведение модели в полной мере соотносится с установленными закономерностями снижения активационного потенциала электрохимически обработанной воды при приготовлении на ее основе растворов.

Другим аспектом адекватности отражения в модели реальных свойств объекта является общее снижение динамики изменения показателей-характеристик электрохимически активированной воды с раствором минеральных удобрений по длине капельной линии. Так, если при прогоне по капельной линии чистого католита различия в значениях ОВП на первом и последнем капельном водовыпуске составляли 17 мВ, то с раствором сульфата калия, не более 9 мВ. Такое, почти двукратное, снижение динамики изменения ОВП католита с раствором минеральных удобрений, прогнозируемое по модельным расчетам, хорошо согласуется с общими закономерностями релаксации электрохимически активированной воды и приготовленными на ее основе растворами.

Исследование соответствия прогнозируемых и реальных параметров состояния электрохимически активированной воды в системе капельного орошения показали и хорошую количественную сходимость полученных результатов. Например, различия в предсказанных по модели значениях и фактических, измеренных ОВП электрохимически активированной воды с раствором сульфата калия не превышали 3 мВ. Схожие результаты были получены при сравнении модельных и опытных значений ОВП электрохимически активированной воды с раствором суперфосфата и карбимида (мочевины).

Такой же результат был получен и при сравнении опытных и модельных значений pH электрохимически активированной во-

ды с раствором минеральных удобрений. Все разности прогнозируемых и реальных значений pH не превышали 6,7 % от уровня активации (метастабильного изменения pH в результате проведения электрохимической обработки) и находились в пределах доверительного интервала опытных средних.

Таким образом, всестороннее сравнение поведения модели с фактическими, полученными в результате опыта, данными, позволяет сделать следующие обоснованные выводы:

модель адекватно отражает качественные изменения параметров активации, измененного ОВП и pH, в системе капельного орошения, которые хорошо согласуются с общими закономерностями релаксации католита или анолита с раствором минеральных удобрений;

нелинейность изменения ОВП и pH электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений по длине капельной линии хорошо согласуется с особенностями неравномерного расхода воды вдоль капельного трубопровода, наблюдаемыми в том же направлении;

в количественном выражении прогнозируемые значения ОВП и pH электрохимически активированной воды хорошо согласуются с полученными результатами экспериментальной проверки. Максимальные различия модельных и опытных средних не превышали 1,5 % от уровня активации по ОВП и 6,7 % – по pH. Все разности модельных и фактических значений показателей-характеристик электрохимически активированной воды находились в пределах доверительного интервала опытного среднего.

В совокупности это подтверждает практическую применимость модели и возможность ее использования при проектировании систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды.

5. ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ И АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ С МОДУЛЕМЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ОРОСИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ

5.1. Расчет конструктивных параметров поливных модулей системы капельного орошения с поливом электрохимически активированной водой

Экспериментальная верификация параметров обобщенной модели релаксации электрохимически активированной воды и построенной на ее основе модели параметров состояния электрохимически активированной воды в системе напорных водоводов капельного орошения обеспечивает возможность практического использования предложенного алгоритма проектирования систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды. Предложенный алгоритм обладает определенной степенью универсальности и может быть использован как для расчета параметров конструкции, рассмотренной в разделе 2.1 монографии, так и для проектирования любых других конструкций систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды. Принципиальные различия проектирования систем капельного орошения с конструктивно объединенной и пространственно-разнесенной схемами компоновки комплекса водоподготовки отсутствуют.

Одной из ключевых задач проектирования систем капельного орошения является расчет конструктивных параметров поливных модулей. Типизированная схема компоновки поливного модуля современной системы капельного орошения включает распределительный трубопровод и поливные капельные линии с интегрированными капельными водовыпусками. При этом, как с позиций рационального использования компонентов системы, так и для удобства выполнения агротехнических мероприятий, целесообразно проектировать поливные участки прямоугольной или квадратной формы. В этом случае поливные трубопроводы рас-

полагают перпендикулярно распределителю, а поливной модуль характеризуется двумя линейными параметрами: протяженностью распределительного трубопровода и протяженностью поливного трубопровода с интегрированными капельницами.

Классический расчет поливного модуля системы капельного орошения заключается в совокупном определении протяженности и соотношения длины распределительного и поливного трубопроводов, диаметров распределительного и поливных трубопроводов, шага раскладки и подсоединения поливных трубопроводов к распределительному, расстояния между капельными водовыпусками и производительности капельниц. Главным агротехническим требованием при этом является возможность обеспечения заданной равномерности подачи оросительной воды разноудаленными капельными водовыпусками. Современные требования к равномерности распределения оросительной воды по поливному участку довольно жесткие и, как правило, ограничиваются диапазоном в 5 % от поливной нормы или производительности капельных водовыпусков [22]. Исходя из требований равномерности, и с учетом напорно-расходных характеристик капельных водовыпусков, определяют допустимые потери напора. Анализ указанных показателей для целого ряда фактически реализуемых в регионе конструкций поливных трубопроводов с интегрированными капельницами показал, что допустимые потери напора в пределах поливного модуля существенно зависят от компенсирующей характеристики капельниц. Например, для наиболее доступных из ценового диапазона капельных трубопроводов с самыми простейшими, некомпенсированными капельницами, допустимые потери напора, обеспечивающие заданную равномерность, не превышают 2,6 м. Полукомпенсированные капельные водовыпуски, с более совершенной конструкцией лабиринтов обеспечивают возможность сохранения равномерности вылива в пределах 5,0 % при перепаде напоров до 6,0 м. Наиболее совершенные конструкции компенсированных капельных водовыпусков обеспечивают сохранение равномерности производительности капельниц при изменении напора в системе до 25 м.

Особенностью расчета систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды является необходимость учета закономерностей релаксации, т. е. изменения активационного потенциала электрохимически обработанной

воды в процессе перемещения от установки-активатора к капельным водовыпускам. При расчете конструктивных параметров поливных модулей необходимо учитывать разницу уровней активации электрохимически обработанной воды на первом, наименее удаленном от установки-активатора и последнем, наиболее удаленном от установки-активатора капельном водовыпуске. Исследования показали, что динамика падения активационного потенциала и изменение гидравлических потерь напора в системе капельного орошения разнонаправлены. Изменение параметров конструкций поливного модуля, сопровождающееся ростом гидравлических потерь напора, обеспечивают лучшее сохранение активационного потенциала. И наоборот, изменение параметров конструкций поливного модуля, сопровождающееся снижением гидравлических потерь напора, усиливают падение активационного потенциала электрохимически обработанной воды. Данная закономерность наглядно подтверждается рис. 5.1-5.4, на которых количественная оценка падения активационных потенциалов и потерь напора представлена в функции изменения различных конструктивных параметров поливного модуля.

На рис. 5.1 показан график зависимости потерь напора и ОВП электрохимически активированной воды от производительности капельных водовыпусков для типизированного модуля системы капельного орошения площадью 1 га, с диаметром распределительного трубопровода 0,1 м, расстоянием между смежными соединениями поливных трубопроводов с распределительным 1,5 м, диаметром поливного трубопровода 0,016 м и расстоянием между смежными капельными водовыпусками 0,3 м. Из приведенного графика видно, что с увеличением производительности капельных водовыпусков сохранность активационного по-

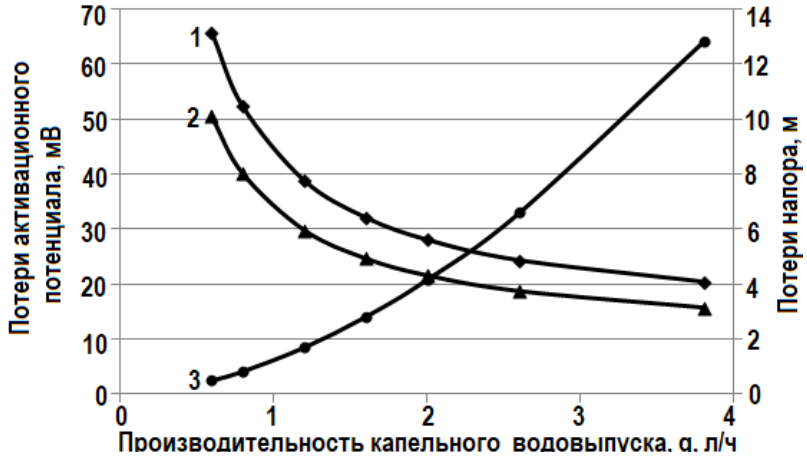

Рис. 5.1. График зависимости потерь напора и ОВП электрохимически активированной воды от производительности капельных водовыпусков (1 – ΔОВП (католит), 2 – ΔОВП (анолит), 3 – ΔН общий)

тенциала электрохимически обработанной воды повышается наряду с существенным увеличением потерь напора. Следует признать, что динамика снижения потерь активационного потенциала и повышения потерь напора с увеличением производительности капельниц носит явно выраженный нелинейный характер и определяет области приоритетного поиска компромиссных решений.

На рис. 5.2 представлен график зависимости потерь напора и ОВП электрохимически активированной воды от расстояния между капельными водовыпусками. Зависимость здесь наблюдается обратная: с увеличением межосевого расстояния смежных капельных водовыпусков потери напора нелинейно снижаются, а падение активационного потенциала возрастает практически по линейной зависимости.

Рис. 5.2. График зависимости потерь напора и ОВП электрохимически активированной воды от расстояния между капельными водовыпусками (поливной модуль 1 га, D = 0,1 м, S = 1,5 м, d = 0,016 м, q = 1,2 л/ч; (1 – ΔОВП (католит), 2 – ΔОВП (анолит), 3 – ΔН общий)

Аналогичная динамика изменения потерь напора и активационного потенциала электрохимически обработанной воды прослеживается с увеличением диаметра поливного трубопровода, график которого представлен на рис. 5.3. Из приведенных на рисунке данных видно, что с увеличением диаметра поливного трубопровода потери напора снижаются по четко выраженной параболической ветви, а потери активационного потенциала возрастают по слабо выраженной нелинейной зависимости.

На рис. 5.4 показан график зависимости потерь напора и ОВП электрохимически активированной воды от диаметра распределительного трубопровода. Приведенные на рисунке кривые дают наглядное представление о характере изменения потерь напора с увеличением диаметра трубопровода, позволяют выделить четко выраженные участки с динамичным снижением потерь на-

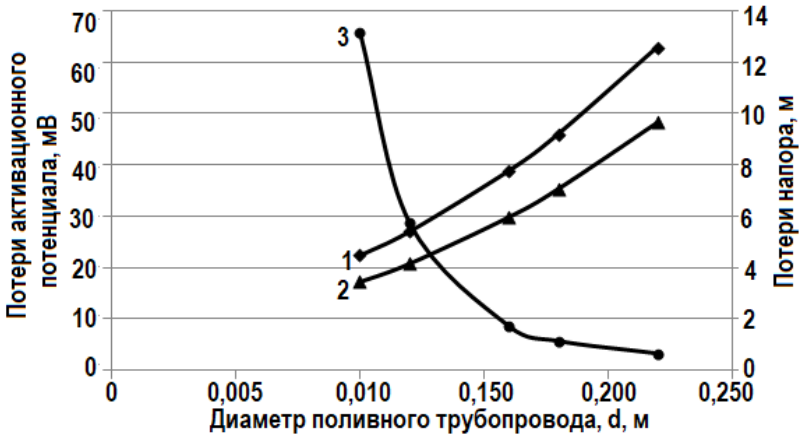

Рис. 5.3. График зависимости потерь напора и ОВП электрохимически активированной воды от расстояния между капельными водовыпусками (поливной модуль 1 га, D = 0,1 м, S = 1,5 м, s = 0,3 м, q = 1,2 л/ч; (1 – ΔОВП (католит), 2 – ΔОВП (анолит), 3 – ΔН общий)

пора и последующей пологой веткой, когда дальнейшее увеличение диаметра уже не дает значимого эффекта. В тоже время отмечается, что потери активационного потенциала увеличиваются по кривой с растущей динамикой.

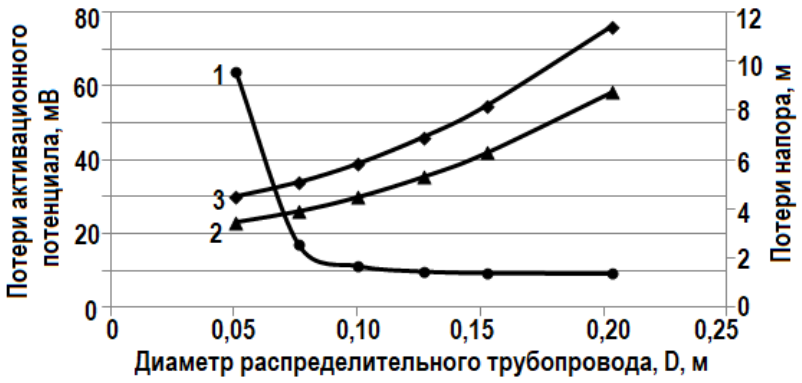

Рис. 5.4. График зависимости потерь напора и ОВП электрохимически активированной воды от расстояния между капельными водовыпусками (поливной модуль 1 га, S = 1,5 м, d = 0,016 м, s = 0,3 м, q = 1,2 л/ч; (1 – ΔОВП (католит), 2 – ΔОВП (анолит), 3 – ΔН общий)

Допустимый диапазон изменения активационного потенциала, характеризующегося уровнем ОВП или pH водной среды, определяется дифференцированно, для каждой культуры с учетом технологии применения электрохимически активированной воды. Например, согласно опубликованным результатам исследований [105, 116] для томатов рекомендуется использовать капельное орошение в сочетании с электрохимической активацией оросительной воды, обеспечивающих возможность подачи в прикорневую зону анолита с параметрами ОВП = + 570…+ 600 мВ при pH среды на уровне 5,1-5,3 и католита с параметрами ОВП = – 220…– 250 мВ при pH не более 7,8-7,9. Из приведенных данных следует, что допустимый диапазон изменения ОВП в пределах

одного поливного модуля не должен превышать 30 мВ. Это довольно жесткие условия, налагающие существенные ограничения на проектирование систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды.

Расчеты кривых изменения потерь напора и падения активационного потенциала на рис. 5.1-5.4 приведены при фиксированных конструктивных параметров поливных модулей капельного орошения. В тоже время предложенный алгоритм проектирования систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды предполагает варьирование значений всех параметров во всех возможных комбинациях. Результаты расчетов по предложенному алгоритму для трех типизированных поливных модулей капельного орошения, представлены в табл. 5.1 и в качестве примера визуализированы на рис. 5.5. В табл. 5.1 приведены результаты подбора конструктивных параметров поливного модуля системы капельного орошения с возможностью использования для полива электрохимически активированной водой на орошаемую площадь 1 га. В качестве примера расчеты приведены для орошаемой культуры – томатов, с допустимым диапазоном изменения ОВП поливной воды не более 30 мВ.

Расчеты показали, что типизированная конфигурация поливного модуля системы капельного орошения, включающая использование 100-метрового распределительного трубопровода диаметром 0,1 м, 1,5-метровую раскладку капельных линий длиной 100 м с интегрированными некомпенсированными капельными водовыпусками производительностью 1,2 л/ч и межосевым расстоянием 0,3 м, не обеспечивает выполнение заданных условий. Падение активационного потенциала католита при этом достигает 38,8 мВ, что выходит за пределы допустимого диапазона. Увеличение производительности капельных водовыпусков до 2,0 л/ч при прочих равных условиях позволяет сохранять активационной потенциал воды в заданных пределах, однако потери напора при этом возрастают до 4,17 м, что не позволяет обеспечить заданную (5%-ную) равномерность вылива при использовании некомпенсированных капельниц.

Из приведенных в табл. 5.1 результатов расчета видно, что соблюдение заданных требований по равномерности вылива капельниц, допустимым пределам снижения активационного потенциала выполняется при использовании 200-метрового распределительного трубопровода диаметром 0,1 м и 50-метрового поливного

Таблица 5.1

Результаты подбора конструктивных параметров поливного модуля системы капельного орошения с возможностью полива электрохимически активированной водой (орошаемая культура – томаты)

Конфигурация	Варьируемый параметр							Оценочный показатель			условия выполняются?
	диаметр распределительного трубопровода, D, м	длина распределительного трубопровода, L, м	шаг раскладки поливных трубопроводов, S, м	диаметр поливного трубопровода, d, м	длина поливного трубопровода, l, м	расстояние между капельницами, s, м	расход воды одной капельницей, q, л/ч	снижение активационного потенциала анолита $\lvert\Delta ОВП\rvert <$ 30 мВ	снижение активационного потенциала католита $\lvert\Delta ОВП\rvert <$ 30 мВ	падение напора $\Delta H < \Delta H_{доп.}$	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Орошаемая площадь 1,0 га											
Поливной трубопровод с некомпенсированными капельными водовыпусками (Lin, $\Delta H_{доп.} < 2,6$ м)											
Типизированная	0,1	100	1,5	0,016	100	0,3	1,2	–29,8	38,8	1,71	Нет
Результаты перебора доступных конфигураций	0,1	100	1,5	0,016	100	0,3	1,6	–24,6	32,1	2,82	
	0,1	100	1,5	0,016	100	0,3	2,0	–21,5	28,0	4,17	
	0,1	100	1,5	0,018	100	0,3	2,0	–24,8	32,3	2,73	
	0,1	100	1,5	0,022	100	0,3	2,0	–32,6	42,4	1,54	
	0,1	200	1,5	0,022	50	0,3	2,0	–31,4	40,8	1,71	
	0,1	200	1,5	0,018	50	0,3	2,0	–24,4	31,8	1,89	
	0,1	200	1,5	0,016	50	0,3	2,0	–21,5	28,0	2,10	
	0,1	200	1,5	0,016	50	0,3	2,6	–18,9	24,6	3,33	
	0,1	200	1,5	0,016	50	0,3	1,6	–24,2	31,6	1,42	
	0,1	200	1,5	0,012	50	0,3	1,6	–18,2	23,7	2,41	Да

Продолжение табл. 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Результаты перебора доступных конфигураций	0,1000	200	1,5	0,012	50	0,3	2,0	–16,6	21,7	3,57	Нет
	0,1270	200	1,5	0,012	50	0,3	2,0	–23,0	30,0	2,48	Да
	0,1270	200	1,5	0,012	50	0,2	2,0	–21,2	27,6	5,04	Нет
	0,1270	200	1,5	0,012	50	0,2	1,6	–22,3	29,1	3,41	
	0,1270	200	1,5	0,012	50	0,2	1,2	–24,2	31,5	2,06	
	0,1000	200	1,5	0,012	50	0,2	1,2	–17,8	23,2	2,97	
	0,1000	200	1,5	0,016	50	0,2	1,2	–23,6	30,7	1,75	
	0,1000	200	1,5	0,016	50	0,2	1,6	–20,3	26,4	2,89	
	0,1000	200	1,5	0,018	50	0,2	1,6	–22,9	29,8	2,60	Да
	0,1000	200	1,5	0,018	50	0,2	0,8	–35,4	46,1	0,77	Нет
	0,1000	200	1,5	0,016	50	0,2	0,8	–30,2	39,3	0,86	
	0,1000	200	1,5	0,012	50	0,2	0,8	–21,5	28,0	1,46	Да
	0,0762	200	1,5	0,012	50	0,2	0,8	–17,2	22,3	3,19	Нет
	0,0762	200	1,5	0,012	50	0,2	0,6	–20,9	27,2	1,93	Да
Орошаемая площадь 1,5 га											
Поливной трубопровод с некомпенсированными капельными водовыпусками (Lin, $\Delta H_{доп.} < 2,6$ м)											
Типизированная	0,1000	150	1,5	0,016	100	0,3	1,2	–30,6	39,8	2,38	Нет
Результаты перебора доступных конфигураций	Нет решений, отвечающих заданным условиям										
Поливной трубопровод с полукомпенсированными капельными водовыпусками (Эолос, $\Delta H_{доп.} < 6$ м)											
Типизированная	0,1000	150	1,5	0,016	100	0,3	1,2	–30,6	39,8	2,38	Нет
Результаты перебора доступных конфигураций	0,1000	150	1,5	0,016	100	0,3	1,6	–25,4	33,1	3,93	
	0,1000	150	1,5	0,016	100	0,3	2,0	–22,3	29,0	5,81	Да
	0,1000	150	1,5	0,016	100	0,3	2,6	–19,4	25,3	9,20	Нет

Продолжение табл. 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Результаты перебора доступных конфигураций	0,1000	150	1,5	0,016	100	0,2	1,2	–24,5	32,0	4,83	Нет
	0,1000	150	1,5	0,016	100	0,2	1,6	–20,9	27,2	8,00	
	0,1000	150	1,5	0,016	100	0,5	1,6	–33,7	43,9	1,61	
	0,1000	100	1,5	0,016	150	0,5	1,6	–34,6	45,0	3,29	
	0,1000	100	1,5	0,016	150	0,5	2,0	–29,5	38,4	4,87	
	0,1000	100	1,5	0,016	150	0,5	2,6	–24,8	32,3	7,70	
	0,1000	100	1,5	0,018	150	0,5	2,6	–28,9	37,7	4,86	
	0,0762	100	1,5	0,018	150	0,5	2,6	–25,1	32,7	7,64	
	0,1000	100	1,5	0,018	150	0,3	2,6	–22,0	28,6	11,87	
	0,1000	100	1,5	0,018	150	0,3	2,0	–25,8	33,6	7,50	
	0,1000	100	0,7	0,018	150	0,3	2,0	–21,6	28,2	12,06	
	0,1000	100	0,7	0,018	150	0,3	1,6	–25,8	33,6	8,16	
	0,1270	100	0,7	0,018	150	0,3	1,6	–28,8	37,5	5,32	
	0,1270	100	0,7	0,016	150	0,3	1,6	–24,4	31,8	8,30	
	0,1270	100	0,7	0,016	150	0,3	1,2	–29,9	39,0	5,01	
	0,1270	100	0,7	0,012	150	0,3	1,2	–20,3	26,5	17,29	
	0,1270	150	0,7	0,012	100	0,3	1,2	–20,1	26,2	6,62	
	0,1270	150	0,7	0,012	100	0,3	1,0	–22,5	29,3	4,81	Да
	0,1270	150	0,7	0,012	100	0,3	0,8	–26,0	33,8	3,26	Нет
Орошаемая площадь 2,0 га											
Поливной трубопровод с полукомпенсированными капельными водовыпусками (Эолос, $\Delta H_{доп.} < 6$ м)											
Типизированная	0,1000	200	1,5	0,016	100	0,3	1,2	–31,1	40,5	3,58	Нет
Результаты перебора доступных конфигураций	Нет решений, отвечающих заданным условиям										

Окончание табл. 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Поливной трубопровод с компенсированными капельными водовыпусками ($\Delta H_{доп.} < 25$ м)											
Типизированная	0,1000	200	1,5	0,016	100	0,3	1,2	–31,1	40,5	3,58	Нет
Результаты перебора доступных конфигураций	0,1000	200	1,5	0,016	100	0,3	1,2	–31,1	40,5	3,58	
	0,1000	200	1,5	0,016	100	0,3	1,6	–25,9	33,8	5,93	
	0,1000	200	1,5	0,016	100	0,3	2,0	–22,8	29,7	8,76	Да
	0,1000	200	1,5	0,016	100	0,3	2,6	–20,0	26,0	13,87	
	0,1000	200	1,5	0,016	100	0,3	3,8	–16,9	22,1	26,94	Нет
	0,1270	200	1,5	0,016	100	0,3	3,8	–23,3	30,3	15,68	
	0,1270	200	1,5	0,016	100	0,2	3,8	–21,4	27,9	31,89	
	0,1270	200	1,5	0,016	100	0,2	2,6	–23,5	30,7	16,41	
	0,1270	200	0,7	0,016	100	0,2	2,6	–15,7	20,4	32,00	
	0,1270	200	0,7	0,016	100	0,2	1,6	–19,9	26,0	13,68	Да
	0,1270	200	0,7	0,016	100	0,2	1,2	–23,6	30,7	8,27	Нет
	0,1270	200	0,7	0,012	100	0,2	1,2	–17,2	22,4	16,45	Да
	0,1270	200	0,7	0,012	100	0,2	0,8	–21,3	27,7	8,09	
	0,1270	200	0,7	0,012	100	0,2	0,6	–25,4	33,1	4,89	Нет
	0,1270	200	0,7	0,012	100	0,2	1,6	–15,1	19,7	27,22	
	0,1270	100	0,7	0,012	200	0,2	1,6	–14,8	19,2	126,76	
	0,1270	100	0,7	0,016	200	0,2	1,6	–20,1	26,1	35,69	
	0,1270	100	0,7	0,016	200	0,2	1,2	–24,1	31,4	21,58	
	0,1000	100	0,7	0,016	200	0,2	1,2	–21,1	27,5	27,35	
	0,1000	100	0,7	0,018	200	0,2	1,2	–25,4	33,1	19,28	
	0,0762	100	0,7	0,018	200	0,2	1,2	–23,3	30,4	41,72	

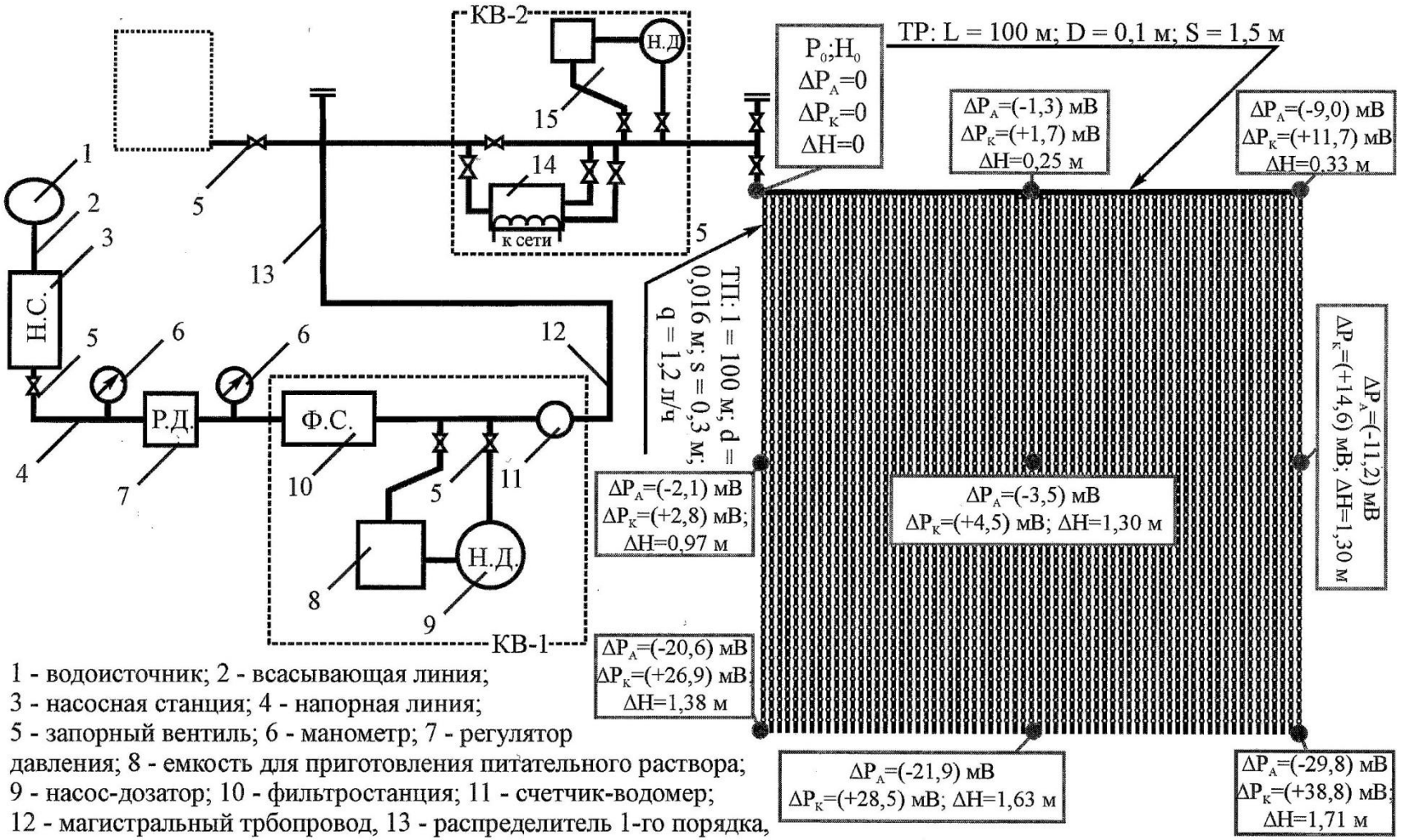

Рис. 5.5. Результаты моделирования совокупных потерь напора и снижения активационного потенциала ЭХАВ в системе капельного орошения (площадь 1 га, типизированная конфигурация параметров системы)

трубопровода диаметром 0,022 м в сочетании с производительностью капельниц 2,0 л/ч, шагом раскладки поливных трубопроводов 1,5 м и расстоянием между смежными капельницами 0,3 м. Падение активационного потенциала католита при этом составляет 28,0 мВ, анолита – 21,5 мВ, а потери напора не превышают 2,1 м. В таблице представлены еще ряд конфигураций, обеспечивающих выполнение заданных условий при производительности капельных водовыпусков 1,6, 0,8 и 0,6 л/ч, что позволяет подобрать капельные линии практически для любых почвенных условий.

В табл. 5.1 приведены результаты подбора конструктивных параметров поливного модуля системы капельного орошения с возможностью использования для полива электрохимически активированной водой на орошаемую площадь 1,5 га. Расчеты показали, что использование поливного трубопровода с некомпенсированными капельными водовыпусками (типа *Lin*, $\Delta H_{доп.} < 2$,6 м) не обеспечивает возможность положительного согласования конструктивных параметров одновременно по критериям допустимых потерь напора и падения активационного потенциала. Использование типизированной конфигурации, с использованием распределительного трубопровода длинной 150 м и диаметром 0,1 м, 16-миллиметровых поливных трубопроводов длиной 100 м, расстановкой капельных водовыпусков с расходом 1,2 л/ч через 0,3 м позволяет удержать потери напора в допустимых пределах (2,38 м), однако падение активационного потенциала анолита и католита при этом достигает 30,6-39,8 мВ. Любые изменения конфигурации, обеспечивающие ускорение движения потока, приводили к резкому повышению потерь напора за пределы допустимого диапазона.

Замена капельных линий с некомпенсированными капельницами на поливные трубопроводы с более совершенной конструкцией капельных водовыпусков, обеспечивающей прогрессивные расходно-напорные характеристики и соблюдение условия равномерности вылива при перепаде давлений до 6 м, позволяет решить проблему и подобрать конструктивные параметры поливного модуля, позволяющие сохранить активационный потенциал электрохимически обработанной оросительной воды в заданных пределах. В частности, задача решается при увеличении производительности капельниц до 2,0 л/ч при сохранении прочих конструктивных параметров. Изменение ОВП анолита при этом не превышало 22,3 мВ,

католита – 29,0 мВ, а потери напора составили 5,81 м, что меньше допустимого значения для данного типа капельниц.

Расчеты показали, что даже использование поливных трубопроводов с полукомпенсированными капельными водовыпусками не обеспечивает возможность решения компромиссной задачи при организации поливного модуля площадью 2 га. Использование типизированных конструктивных параметров с расчетной длиной распределительного трубопровода 200 м и диаметром 0,1 м, расчетной длиной поливных трубопроводов 100 м диаметром 0,016 м, производительностью капельниц 1,2 л/ч и их расстановкой через 0,3 м, позволяет ограничить потери напора в пределах 3,58 м, однако снижение ОВПпри этом достигает 31,1-40,5 мВ. Изменение конструктивных параметров и, в частности, повышение производительности капельниц до 2,0-2,6 л/ч, позволяет сократить потери активационного потенциала до допустимого уровня 20,0-29,7 мВ, однако потери напора при этом возрастают до 8,76-13,87 м. Заданная равномерность вылива капельниц в пределах поливного модуля при этом может обеспечиваться только в случае использования конструкций капельниц с мембранной компенсацией расходов. Допустимые потери напора у таких капельниц достигают 25 м и более.

Перебор различных конструктивных параметров поливного модуля системы капельного орошения с площадью полива 2,0 га и решение компромиссной задачи по предложенному алгоритму позволили выявить еще ряд конфигураций, обеспечивающих возможность полива электрохимически активированной водой. В частности компромиссные решения были найдены для конфигураций с расходом капельниц 1,6 и 0,8 л/ч, диаметром поливного трубопровода 0,012 м, диаметром распределительного трубопровода 0,127 м, а также для конфигураций с шагом раскладки поливных трубопроводов 0,7 м.

Таким образом, использование предложенного алгоритма позволяет успешно решать практические задачи и осуществлять подбор конфигураций с конструктивными параметрами системы, обеспечивающими сохранение активационного потенциала в заданных пределах и заданную равномерность вылива капельниц на орошаемом участке.

5.2. Результаты производственного проектирования и апробации системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды

5.2.1. Производственный расчет системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды для полива томатов в легких пленочных теплицах

Производственная апробация предложенного алгоритма расчета систем капельного орошения с модулем электрохимической активации на основе результатов компьютерного моделирования распределения активационных потенциалов оросительной воды и решения компромиссной задачи согласования результатов модельных расчетов с допустимыми потерями напора и падением активационного потенциала проводилась в ЛПХ "Толочко Ф. Ю." рис. 5.6-5.7.

Рис. 5.6. Производственная апробация предложенного алгоритма расчета систем капельного орошения с модулем электрохимической активации

Рис. 5.7. Капельное орошение с модулем электрохимической активации томата сорт Гибрид Пинк Парадайз F1

Хозяйство специализируется на производстве томатов в условиях защищенного грунта с использованием легких пленочных теплиц весенне-летнего и летне-осеннего оборотов. Тепличный блок представлен типичной каркасной конструкцией, размером 6 на 50 м, в котором ленточным способом (0,4 × 1,0 м) высаживается рассада томатов. Система капельного орошения в хозяйстве имеет типизированную конфигурацию и включает комплекс водозабора и подачи оросительной воды, комплекс водоподготовки

и приготовления питательной смеси, водоподводящий комплекс, поливные модули капельного орошения. Все указанные элементы между собой гидравлически соединены.

В качестве источника воды для полива сельскохозяйственных культур на опытном участке используется скважина. Качество воды из источника соответствует требованиям, предъявляемым к поливной воде. Оросительная сеть представлена магистральным трубопроводом диаметром 3 дюйма и протяженностью 40 м, непосредственно соединенному с распределительными трубопроводами поливных модулей. Поливной модуль спроектирован для орошения томатов в пределах одного тепличного блока и представляет собой совокупность 4-х поливных трубопроводов длинной 50 м каждый, разложенных на расстоянии 1,4 м друг от друга и распределительного трубопровода общей протяженностью 9 м. Диаметр поливного трубопровода 0,016 м, капельные водовыпуски расположены через 0,2 м, производительность каждой капельницы 2,6 л/ч. Капельницы некомпенсированного типа. Диаметр распределительного трубопровода 2 дюйма.

Поставленная задача сводилась к необходимости дооборудования одного из поливных модулей имеющейся системы капельного орошения установкой для электрохимической активации оросительной воды с возможностью реализации установленного технологического регламента периодического полива томатов электрохимически активированной водой. В соответствии с предложенным алгоритмом в ходе решения поставленной задачи были рассмотрены следующие основные вопросы:

расчет параметров установки для электрохимической активации оросительной воды;

компромиссное согласование потерь напора и активационного потенциала электрохимически активированной оросительной воды для поливного модуля системы капельного орошения. Проверка возможности выполнения технологического процесса для имеющейся конфигурации поливного модуля;

оценка дополнительных потерь напора при дооборудовании системы установкой для электрохимической активации оросительной воды. Проверка возможности выполнения технологического процесса с имеющимся насосным оборудованием.

Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 5.2.

Ключевыми расчетными параметрами оборудования для элек-

трохимической активации оросительной воды являются геометрические размеры основных его элементов: внутреннего диаметра

Таблица 5.2

Результаты расчета системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды в ЛПХ "Толочко Ф. Ю."

Показатель	Значение показателя
Параметры установки ЭХАВ	
Внутренний диаметр полой катодной камеры	0,044 м
Длина катодной и анодной камер	1,0 м
Диаметр анодной камеры	0,024 м
Результаты компромиссного согласования параметров поливного модуля	
Модуль изменения ОВП анолита ($ЭХАВ_А$), мВ	6,7
Условие $ЭХАВ_А < 30$ мВ выполняется?	Да
Модуль изменения ОВП католита ($ЭХАВ_К$), мВ	8,7
Условие $ЭХАВ_К < 0$ мВ выполняется?	Да
Потери напора ($Н_{ПМ}$), м	1,62
Условие $Н < 2,6$ м выполняется?	Да
Проверка работоспособности системы с имеющимися мощностями насосного оборудования	
Геодезический подъем с учетом глубины скважины и рельефа местности, $Н_г$	9 м
Потери напора в узле водоподготовки, $Н_1$	1,2 м
Потери напора в магистральном трубопроводе, $Н_2$	1,1 м
Потери напора в подводящей части распределительного трубопровода (с учетом местных сопротивлений на участке соединения распределительного трубопровода с магистральным), $Н_{Р-1}$	0,21
Потери напора в узле электрохимической активации оросительной воды, $Н_{ЭХАВ}$	3 м
Потери напора в поливном модуле ($Н_{ПМ}$)	1,62 м
Суммарные потери напора $Н_{ПМ} = Н_г + Н_1 + Н_2 + Н_{Р-1} + \ldots Н_{ЭХАВ} + Н_{ПМ}$	16,3 м
Минимальное рабочее давление капельниц	7 м
Минимальное потребное давление на насосе, $Н_{min}$ (16 + 17)	23,13
Номинальное давление на насосе, $Н_{НАС.}$	40 м
Условие $Н_{min} < Н_{НАС.}$ выполняется?	Да
Максимальное рабочее давление капельниц	30 м
Максимальное давление на насосе, $Н_{max}$(16 + 21)	46,3 м
Условие $Н_{max} > Н_{НАС.}$ выполняется?	ДА
Номинальное рабочее давление капельниц	20-25 м
Номинальное потребное давление на насосе, $Н_n$ (16 + 24)	36,3-41,3 м
Условие $Н_n = Н_{НАС.}$ выполняется?	Да

полого катода, внешнего диаметра анода, длинны катодной и анодной камеры. Соотношение между внутренним диаметром полого катода и длинной активационных камер в зависимости от производительности установки определяли по формуле 2.1:

$$D_к = 0{,}6 \cdot \sqrt[4]{Q^2 / H_0 \left(1 - 11{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot L\right) / \Delta_1 \sqrt[3]{\Delta_1}} =$$

$$= 0{,}6 \cdot \sqrt[4]{0{,}0007 3^2 / 28_0 \left(1 - 11{,}5 \cdot 10^{-4} \cdot 1\right) / 0{,}004 \sqrt[3]{0{,}004}} = 0{,}044 м.$$

Отсюда диаметр анода равен:

$D_a = D_к - 2(\Delta_1 + \Delta_2 + \delta) = 0{,}044 - 2(0{,}004+0{,}004+0{,}002) = 0{,}024.$

Компромиссное согласование потерь напора и активационного потенциала электрохимически активированной оросительной воды для поливного модуля системы капельного орошения проводилось с учетом:

агротехнических требований к допустимым потерям активационного потенциала оросительной воды при капельном орошении томатов, установленным в пределах 30 мВ по значениям ОВП [105, 116];

напорно-расходных характеристик некомпенсированных капельных водовыпусков поливных трубопроводов, используемых в хозяйстве;

допустимого уровня дифференциации производительности капельных водовыпусков в пределах орошаемого участка.

Предложенный алгоритм компромиссных расчетов основан на использовании разработанной модели параметров состояния электрохимически активированной воды в системе напорных водоводов капельного орошения и синхронизированной с ней гидравлической модели системы капельного орошения. Расчеты по предложенным моделям с использованием известных конструктивных параметров поливного модуля имеющейся в хозяйстве системы капельного орошения показали, что падение ОВП анолита не превышает 6,7 мВ, католита – 8,7 мВ, а потери напора в пределах поливного модуля составляют 1,62 м. С учетом напорно-расходных характеристик используемых капельниц такой перепад напоров обеспечивает заданную (более 95 %) равномерность вылива в пределах поливного модуля, а падение показателей, характеризующих активационный потенциал электрохимически обработанной воды, находятся в допустимых для культуры пределах.

Конструкция установки для электрохимической активации оросительной воды обеспечивает предельные значения совокупных местных потерь напора не более 2-3 м. С учетом совокупных потерь напора на магистральном трубопроводе (1,1 м) и поливном модуле (1,62 м), потерь напора в узле водоподготовки (1,2 м), потерь напора в водоподводящей части распределительного трубопровода (0,21 м), геодезического подъема (9 м с учетом глубины скважины и рельефа местности) общие потери напора в модернизированной системе не превысят 16,3 м. Ориентируясь на необходимость обеспечения рабочего напора капельных водовыпусков в пределах 7-25 м, минимальный допустимый напор, создаваемый насосным оборудованием должен быть не ниже 23,13 м. Характеристики насосного оборудования, смонтированного на участке, приведены в табл. 5.3 и подтверждают возможность выполнения технологического процесса при дооборудовании имеющейся в хозяйстве системы установкой для электрохимической активации оросительной воды.

Таблица 5.3

Характеристика насосного оборудования, смонтированного на орошаемом участке

Показатель	Значение показателя
Марка насоса	Водолей БЦПЭ 1,2-40У
Тип	Погружной
Номинальная производительность	4,3 $м^3$/ч
Номинальный напор	40 м
Максимальный напор	60 м
Потребляемая мощность	1340 Вт
Максимальный потребляемый ток	6,1 А
Максимальная температура жидкости	35 ºС
Количество рабочих колес	6
Масса нетто	16,4 кг

Таким образом, дооборудование смонтированной на участке системы капельного орошения модулем для электрохимической активации оросительной воды позволяет гарантированно реализовать технологический процесс полива томатов электрохимически активированной водой или приготовленными на ее основе растворами с соблюдением всех агротехнических требований и агромелиоративных режимов.

5.2.2. Результаты оценки экономической эффективности и инвестиционной привлекательности применения систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды (на примере томатов)

Любое прикладное исследование имеет конечной целью какое либо практическое применение, возможность которого оценивается удобством и результативностью использования разрабатываемого продукта в условиях реальной деятельной системы. Результативность использования конечного продукта исследований может характеризоваться показателями, выражающими количественную или качественную оценку объективно существующих эффектов. В условиях жесткого ограничения и конкурентной борьбы за ресурсы важным показателем, характеризующим целесообразность внедрения инновационных продуктов, является экономическая прибыль.

Оценка экономической эффективности технических систем сегодня является неотъемлемым этапом проектной деятельности. Введение модуля электрохимической активации оросительной воды в систему капельного орошения отражается не только на алгоритме проведения проектных расчетов, изменяются и параметры самой системы. Изменение параметров выражается, например, в перекомпоновке системы капельного орошения, оптимизации геометрии орошаемых участков, изменении диаметров подводящих и поливных трубопроводов. Все это отражается на затратах, которые необходимо будет вложить в производство при реализации проекта. Кроме того, важно помнить, что система капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды является частью материальных средств производства, а значит, частью производственного процесса. Собственно, технология производственного процесса, напрямую зависит от свойств средств производства; и если технические характеристики средств производства изменены, то и параметры выполнения технологического процесса также не могут оставаться незыблемыми. Поэтому при проведении анализа экономической эффективности продукта прикладных научных исследований важно рассматривать условия его применения в целом. С этой целью нами были проведены комплексные испытания системы капельного орошения, спроектированной по предложенному алгоритму с модулем электрохимической активации оросительной воды, в условиях реального произ-

водства. Испытания проводили в посевах томата, выращиваемых в условиях защищенного грунта.

Одним из ключевых экономических показателей, характеризующих применимость результатов инновационной деятельности в условиях производства, является сумма понесенных затрат. Расчет затрат материальных ресурсов проводили по технологическим картам с учетом специфики возделывания подзимнего оборота томатов в легких пленочных теплицах. При расчете затрат учитывались такие статьи расходования денежных средств, как оплата труда, закупка горюче-смазочных материалов, оплата электроэнергии, затраты на проведение технического обслуживания и текущий ремонт, амортизацию основных средств, расходы на семена, минеральные удобрения, пестициды, укрывной материал и т. д. (табл. 5.4). Нормативы расхода топлива, рекомендуемые тарифные ставки, нормы выработки определялись по справочной литературе и техническим характеристикам применяемых узлов и агрегатов.

Таблица 5.4

Структура затрат на выращивание томатов в условиях защищенного грунта при формировании производства с "ЭХАВ" и без "ЭХАВ"

Статьи расходования денежных средств	Вариант производства			
	без "ЭХАВ"		с "ЭХАВ"	
	руб./га	% от общей суммы затрат	руб./га	% от общей суммы затрат
Затраты на оплату труда	162300	13,7	193400	16,6
Материальные затраты, всего	699200	58,8	627600	53,9
в т. ч.: на семена	250000	21,0	250000	21,5
на минеральные удобрения	112400	9,5	112400	9,7
на пестициды	97300	8,2	25700	2,2
на укрывной материал	207000	17,4	207000	17,8
прочие материальные затраты	32500	2,7	32500	2,8
Затраты на горюче-смазочные материалы и электроэнергию	93300	7,8	102800	8,8
Затраты на техническое обслуживание и текущий ремонт	56400	4,7	59200	5,1
Амортизация основных средств	142500	12,0	153400	13,2
Общехозяйственные расходы	35100	3,0	27100	35100,0
Всего затрат	1188800	100,0	1163500	100,0

Анализ основных экономических статей расходования средств на производство томатов при капельном орошении с использовани-

ем для полива электрохимически активированной воды показал, что совокупные затраты в пересчете на 1 га посевной площади составляют более миллиона рублей. В варианте "без применения электрохимически активированной оросительной воды" (классическая комплектация системы капельного орошения) наиболее значимыми оказались затраты на семена (250,0 тыс. руб. или 21,0 % от суммы совокупных затрат), на укрывной материал (207,0 тыс. руб. или 17,4 % от суммы совокупных затрат) и на оплату труда (162,3 тыс. руб. или 13,7 % от суммы совокупных затрат). Следует признать, что такой уровень затрат на оплату труда объясняется невысоким уровнем механизации теплиц такого типа и, как следствие, большой потребностью в ручном труде.

Кроме того, значительную долю в формировании производственных затрат при возделывании томатов в условиях защищенного грунта занимали расходы на минеральные удобрения (112,4 тыс. руб. или 9,5 % от суммы совокупных затрат) и пестициды (97,3 тыс. руб. или 8,2 % от суммы совокупных затрат), затраты на горюче-смазочные материалы и оплату электроэнергии (93,3 тыс. руб. или 7,8 % от суммы совокупных затрат) и амортизацию основных средств (142,5 тыс. руб. или 12,0 % от суммы совокупных затрат).

Общая структура производственных и реализационных затрат на возделывание томатов в вариантах с комплектацией системы капельного орошения модулем для электрохимической активации оросительной воды (вариант производства с использованием для полива электрохимически активированной оросительной воды) в целом сохранилась, однако отдельные статьи расходов в количественном плане претерпели некоторые изменения. В частности, прямым следствием внедрения технологии электрохимической активации оросительной воды явилось увеличение затрат на электроэнергию. Величина совокупных расходов на горюче-смазочные материалы и электроэнергию увеличилась до 105,8 тыс. руб, а их доля в суммарных производственных затратах возросла на 1,0 % и достигла 8,8 %.

Другим следствием внедрения технологии электрохимической активации оросительной воды явилось увеличение совокупных расходов на оплату труда. Величина последних в варианте с использованием опытной системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды возросла до 193,4 тыс. руб., а доля в структуре производственных затрат увеличилась до

16,6 %. Это на 2,9 % больше, чем при формировании производства "без использования электрохимически активированной воды".

Еще одним из самых значимых статей расходов, количественная оценка которых изменилась в варианте использования системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды, стали затраты на пестициды. По регламенту технологии возделывания томатов с применением электрохимически активированной воды применение пестицидов можно существенно сокращать, а отдельные из видов, полностью исключить [116]. Это обеспечивает возможность экономии на пестицидах, причем на наиболее дорогостоящих их видах, что сокращает общую потребность в затратах денежных средств по этой статье расходов с 97,3 до 25,7 тыс. руб. Доля затрат на пестициды в общих производственных затратах в варианте "с применением электрохимически активированной оросительной воды" не превышает 2,2 %, что на 6,0 % меньше, чем в варианте "без применения электрохимически активированной оросительной воды". В целом, снижение затрат на пестициды полностью компенсирует возросший уровень расходов на оплату труда, электроэнергию, амортизацию основных средств, техническое обслуживание и текущий ремонт.

Расчеты показали, что сумма производственных затрат на возделывание томатов в варианте, где использовали спроектированную по предложенному алгоритму систему капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды, на 25,3 тыс. руб. меньше в сравнении с вариантом производства "без применения электрохимически активированной воды".

В тоже время продуктивность томатов при использовании для полива электрохимически активированной воды возрастала на 32,1 т/га или 25,95 %, что позволило существенно снизить себестоимость продукции (прилож. 12, табл. 5.5). В соответствии с проведенными расчетами, результаты которых подтверждаются практикой, себестоимость 1 кг томатов в варианте производства "без применения электрохимически активированной воды" составляет 9,6 руб., тогда как при использовании капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды, достигает 7,5 руб. Получается, что использование капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды в условиях легких пленочных теплиц позволяет экономить, в среднем, 2,1 руб. на производстве каждого килограмма томатов.

Таблица 5.5

Экономическая эффективность использования установки для электрохимической активации оросительной воды при выращивании томатов защищенного грунта

Показатель	Вариант производства		Эффект от использования установки для электрохимической активации оросительной воды	
	без "ЭХАВ"	с "ЭХАВ"	нат. ед.	% к контролю
Производственные затраты, руб./га	1188800	1163500	–25300	–2,13
Урожайность, т/га	123,7	155,8	32,1	25,95
Себестоимость продукции, руб./кг	9,6	7,5	–2,1	–21,88
Выручка от реализации, руб./га	4505154	5674236	1169082	25,95
Чистый доход, руб./га	3316354	4510736	1194382	36,01
Рентабельность, %	279,0	387,7	108,7	-

Выручка от реализации томатов в варианте с использованием капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды в пересчете на 1 га посевной площади составила 5674,2 тыс. руб., что обеспечило получение не менее 4510,7 тыс. руб./га чистого дохода. Это более, чем на 1194,3 тыс. руб./га больше, чем величина чистого дохода в варианте "без применения электрохимически активированной воды". Рентабельность производства томатов при использовании капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды возрастает почти на 110 %, достигая рекордных 387,7 %.

Одним из ключевых условий внедрения инновационных продуктов в практику сельскохозяйственного производства в современных экономических реалиях является привлечение инвестиций. В этой связи важно, чтобы инновационные проекты были инвестиционно привлекательными.

Особенности оценки инвестиционной привлекательности инновационных проектов сегодня уже имеют серьезное теоретическое обоснование, которое широко освещено в научной и практической литературе. В наших исследованиях для оценки инвестиционной привлекательности проектов, включающих инновационную технологию капельного орошения с возможностью электрохимической активации оросительной воды, использована классическая работа П. Л. Виленского, выполненная в соавторстве с В. Н. Лившицем и С. А. Смоляком [27].

В качестве обособленных проектов, которые необходимо

оценить с точки зрения инвестиционной привлекательности, были приняты проекты создания производства томатов в легких пленочных теплицах с использованием классической системы капельного орошения (вариант 1, контроль) и системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды (вариант 2). В качестве основных показателей, в достаточной степени характеризующих привлекательность инвестиционных проектов, приняты величина чистого дисконтированного дохода, индекса доходности дисконтированных затрат и срок окупаемости инвестиций. Основным методом для расчета указанных показателей является отслеживание потока платежей: со знаком "+", если платежи составляют доход по проекту и со знаком "–", если платежи составляют затраты по проекту.

Другим важным методом, используемым при оценки привлекательности инвестиционных проектов, является метод дисконтирования потоков, который используется с целью корректного сопоставления разновременных платежей. Дисконтирование разновременных платежей осуществляется в результате умножения их на коэффициент дисконтирования α_1, определяемый как

$$\alpha_1 = \frac{1}{(1+i)^n}, \qquad (5.1)$$

где n – соответствующий номер цикла производства по отношению к дате приведения разновременных денежных потоков, i – определяется как норма дисконта.

Норма дисконта имеет разные определения, которые, в общем случае, характеризуют минимальную норму доходности проекта, реально установленную на рынке инвестиций. Если проект не обеспечивает минимальную норму доходности, он не рассматривается вообще, если обеспечивается – то проводится сравнение альтернативных проектов. В качестве минимальной нормы доходности, в частности, целесообразно использовать доходность альтернативных вариантов вложения денег, например, гарантированный доход от вклада в банке.

Результаты расчетов показателей инвестиционной привлекательности проектов создания производства томатов в легких пленочных теплицах для вариантов "с использованием электрохимически активированной воды" и "без использования электрохимически активированной воды" приведены в табл. 5.6. Все расчеты проведены для расчетной площади реализации проекта 1 га и расчетного периода проекта 3 года.

Таблица 5.6

Оценка привлекательности инвестиционных проектов возделывания томатов при формировании производства с "ЭХАВ" и без "ЭХАВ" (расчетный срок реализации проекта – 3 года, расчетная площадь – 1 га)

Показатель		Вариант производства		Эффект от использования установки для электрохимической активации оросительной воды	
		без "ЭХАВ"	с "ЭХАВ"	нат. ед.	% к контролю
Накопленный дисконтированный отток, тыс. руб.	Инвестиции на: изготовление и монтаж каркаса теплиц	5540,0	5540,0	0	0
	приобретение и монтаж системы капельного орошения	127,0	127,0	0	0
	установку для электрохимической активации оросительной воды	0	72,5	72,5	-
	Затраты на монтаж установки для электрохимической активации оросительной воды	0	7,9	7,9	-
	Накопленные производственные затраты за расчетный период	3832,2	3750,7	–81,5	–2,13
	Всего	9499,2	9498,1	–1,1	–0,01
Накопленный дисконтированный приток, тыс. руб.	Дисконтированная выручка за производственный цикл расчетного периода: 1-й	3850,6	4849,8	999,2	25,95
	2-й	3291,1	4145,1	854,0	25,95
	3-й	2812,9	3542,8	729,9	25,95
	Всего	9954,6	12537,7	2583,1	25,95
Эффективность инвестиционного проекта	Чистый дисконтированный доход, тыс. руб.	455,4	3039,6	2584,2	567,46

Расчеты показывают, что в накопленном за 3 года дисконтированном оттоке денежных средств, который почти достигает 9,5 млн. руб., основные затраты (5540 тыс. руб.) приходятся на инвестиции в строительство каркаса пленочных теплиц с отопительным оборудованием. В сравнении с этими затратами инвестиции на изготовление и монтаж установки для электрохимической активации оросительной воды (72,5 + 7,9 тыс. руб.) видятся незначительными. Сумма капитала, инвестированного на изготовление и монтаж установки для электрохимической активации оросительной воды, полностью компенсируется снижением дисконтированного потока производственных затрат. В результате, накопленный дисконтированный отток денежных средств за 3 года реализации проекта в варианте производства "без применения электрохимически активированной воды" (9499,2 тыс. руб.) и в проекте "с использованием электрохимически активированной воды" (9498,1 тыс. руб.), был практически равным. В тоже время накопленный за три года дисконтированный приток денежных средств в проекте, где для полива использовали систему капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды, был на 2583,1 тыс. руб. или 25,95 % больше, чем при реализации проекта "без применения электрохимически активированной воды".

Чистый дисконтированный доход по проекту, где для полива использовали классическую систему капельного орошения, составил 455,4 тыс. руб., при индексе доходности затрат 1,05. Срок окупаемости инвестиций при этом составил три года. В проекте, где для полива использовали систему капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды, величина чистого дисконтированного дохода достигала 3039,6 тыс. руб. при индексе доходности дисконтированных затрат 1,32. Срок окупаемости проекта с такими параметрами не превышает 2 лет, что однозначно свидетельствует о его преимуществе.

Таким образом, проекты возделывания томатов в легких пленочных теплицах с капельным поливом и модулем электрохимической активации оросительной воды имеют привлекательные инвестиционные параметры. Срок окупаемости проекта, включающего инвестиции на капитальное строительство тепличного хозяйства, систему капельного орошения и оборудование для электрохимической активации оросительной воды, не превышает 2-х лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе типизации известных технических решений проведено теоретическое обоснование конструкции систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды. При этом модуль электрохимической активации оросительной воды рассматривается как конструктивный элемент комплекса водоподготовки. Предлагаются варианты компоновки комплекса водоподготовки по конструктивно объединенной или пространственно-разнесенной схеме.

Анализ результатов научных исследований и практики современного агропроизводства показал, что отсутствие адаптированных алгоритмов и методов проектирования систем капельного орошения с модулем электроактивации оросительной воды, является одной из ключевых причин сдерживания практического освоения экологически ориентированных агротехнологий, основанных на использовании феномена электрохимической активации слабых водных растворов. Одна из основных проблем применения этого феномена непосредственно связана с самой природой электрохимической активации, определяющейся метастабильным состоянием активированных растворов и динамичным изменением (релаксацией) его свойств с течением времени.

Исследованиями установлено, что при проектировании систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды, наряду с решением классической задачи, направленного на обеспечение равномерности вылива капельниц при сохранении перепада напоров в допустимых пределах, важно оценить возможность сохранения активационного потенциала электрохимически активированной воды в соответствии с агротехническими требованиями. Предложен адаптированный алгоритм для расчета систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды, основанный на решении компромиссной задачи при определении параметров системы по результатам гидравлического расчета и по падению активационных потенциалов электрохимически обработанной

оросительной воды.

Решение задач проектирования систем капельного орошения с модулем электрохимической активации воды на основе предложенного алгоритма предполагает разработку эффективной процедуры прогнозирования активационного потенциала электрохимически активированной оросительной воды в системе напорных водоводов капельного орошения. Для этого исследованиями была разработана модель состояний электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений, основанная на совокупном, синхронизированном решении двух подмоделей, имитационной модели перемещения воды в системе напорных водоводов капельного орошения и обобщенной модели релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений.

Экспериментально установлено, что для описания закономерностей изменения ОВП анолита и католита в закрытых системах в процессе релаксации достаточно простых полиномов 3- и 4-й степени (R^2 = 0,98-0,99). В отличие от логарифмических, полученных для описания процессов релаксации в открытых системах, полученные полиномиальные зависимости характеризуются гораздо меньшей динамикой восстановления pH и ОВП электрохимически активированной воды, что в наибольшей степени проявляется на начальных этапах релаксации. Именно это позволяет эффективно использовать закрытые оросительные системы из полимерных материалов (таких, как капельное орошение) для полива сельскохозяйственных культур электрохимически активированной водой.

Экспериментально подтверждено, что приготовление раствора на основе электрохимически активированной воды и различных химических соединений сопровождается существенным изменением динамики восстановления параметров-характеристик электрохимически активированных сред. Установлено, что приготовление раствора на основе сульфата калия способствует увеличению сохранности ОВП и pH католита прямо пропорционально концентрации раствора. В тоже время при приготовлении раствора сульфата калия на основе анолита наибольшие значения коэффициента сохранения ОВП, 95 с/мВ, были отмечены при концентрации 0,05 %, которые с увеличением концентрации снижались до 69 с/мВ. При добавлении суперфосфата в католит наибольшая сохранность активационного потенциала раствора

(75 с/мВ) обеспечивалась при концентрации 0,05 %. В тоже время при использовании анолита для приготовления раствора суперфосфата значение коэффициентов сохранения ОВП и pH возрастало пропорционально концентрации этого химического соединения. Приготовление раствора на основе карбамида (мочевины) способствует увеличению коэффициентов сохранения ОВП и pH прямо пропорционально концентрации раствора как у анолита, так и у католита. Наибольшее значение коэффициента сохранения ОВП католита при концентрации раствора 0,3 % составило 200 с/мВ, а анолита – 180 с/мВ.

Количественный анализ закономерностей релаксации электрохимически активированной воды и приготовленных на ее основе растворов позволил разработать обобщенную модель релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений, которая представлена системой алгебраически связанных зависимостей для определения градиентов фазовых скоростей релаксации и зависимостей "мгновенного" изменения ОВП и pH активированной воды при добавлении минеральных удобрений в разной концентрации.

Экспериментальная верификация параметров обобщенной модели релаксации электрохимически активированной воды и приготовленных на ее основе растворов обеспечила возможность реализации расчетов по модели состояний электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений в системе капельного орошения. Всесторонняя экспериментальная оценка модели показала, что она адекватно отражает качественные изменения параметров активации оросительной воды и приготовленных на ее основе растворов в системе капельного орошения, которые хорошо согласуются с общими закономерностями релаксации католита или анолита и особенностями неравномерного расхода воды вдоль капельного трубопровода. Максимальные различия модельных и опытных средних не превышали 1,5 % от уровня активации по ОВП и 6,7 % – по pH. Все разности модельных и фактических значений показателей-характеристик электрохимически активированной воды находятся в пределах доверительного интервала опытного среднего.

Возможность проведения расчетов по модели состояний электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений обеспечивает практическую реализуемость

алгоритма проектирования систем капельного орошения с модулем электрохимической активации воды. Предложенный алгоритм был использован для расчета конструктивных параметров типизированных поливных модулей капельного орошения площадью 1,0, 1,5 и 2,0 га. Расчеты показали, что соблюдение требований по сохранению активационного потенциала электрохимически активированной воды в пределах поливного модуля налагает существенные ограничения при проектировании систем капельного орошения и требует пересмотра конструктивных параметров отдельных ее элементов.

На основании вышеизложенного производству рекомендуется:

для расчета конструктивных параметров систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды использовать предложенный, адаптированный алгоритм проектирования, основанный на решении компромиссной задачи по результатам гидравлического расчета и по падению активационных потенциалов электрохимически обработанной оросительной воды;

для эффективного решения задач прогнозирования активационного потенциала электрохимически активированной оросительной воды в системе капельного орошения использовать разработанную модель состояний электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений, основанную на алгоритмах компьютерной имитации перемещения воды в системе напорных водоводов капельного орошения и количественных закономерностях релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абезин, В. Г. Система капельного орошения с модулем активации оросительной воды / В. Г. Абезин, С. Я. Семененко, А. Л. Сальников, Н. А. Сальникова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского. комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – Волгоград. – 2013. – № 1(29). – С. 154-158.

2. Абезин, В. Г. Система капельного орошения с модулем электроактивации оросительной воды / В. Г. Абезин, В. В. Карпунин // Достижения науки и техники АПК. – 2007. – № 6. – С. 23-25.

3. Александрова, Э. А. Влияние католита на росторегулирующую способность гумата калия при некорневой обработке озимой пшеницы / Э. А. Александрова, Г. А. Шрамко, Т. В. Князева, Я. С. Черных // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – Т. 1. – № 38. – С. 113-117.

4. Александрова, Э. А. Исследование антиоксидантной активности элетрохимически активированной воды / Э. А. Александрова, Г. А. Шрамко, Б. Е. Красавцев, В. Б. Симкин // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2013. – № 4. – С. 40-43

5. Ахмедов, А. Д. Особенность оценки равномерности водораспределения в низконапорных системах капельного орошения / А. Д. Ахмедов, Е. Ю. Галиуллина, А. А. Темерев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2011. – № 3. – С. 174-180.

6. Баженов, Ю. М. Теоретическое обоснование получения бетонов на основе электрохимически и электромагнитно-активированной воды затворения / Ю. М. Баженов, В. Т. Фомичёв, В. Т. Ерофеев // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. – 2012. – № 2(22). – С. 4.

7. Бахир, В. М. Тезисы докладов и краткие сообщения / В. М. Бахир // Теоретические аспекты электрохимической активации: сб. науч. ст. – М.: МИС-РТ, 1999. – № 21-2. – С. 39-49.

8. Бахир, В. М. Электрохимическая активация: история, состояние, перспективы / В. М. Бахир, Ю. Г. Задорожний, Б. И. Леонов [и др.]. – М.: ВНИИИМТ, 1999. – 256 с.

9. Бахир, В.М. Электрохимическая активация: очистка воды и получение полезных растворов / В. М. Бахир, Ю. Г. Задорожний, Б. И. Леонов [и др.]. – М.: ВНИИИМТ, 2001. – 176 с.

10. Бахир, В. М. Электрохимически активированные водные среды – анолит и католит как средство подавления инфекционных процессов / В. М. Бахир, В. И. Прилуцкий, Н. Ю. Шомовская // Медицинский алфавит. – 2010. – Т. 13. – № 3. – С. 40-42.

11. Бахир, В. М. Электрохимические реакторы РПЭ / В. М. Бахир,

Ю. Г. Задорожний. – М.: Гиперокс, 1991. – 35 с.

12. Белицкая, М. Н. К вопросу о регулировании фитосанитарной ситуации в агроценозах / М. Н. Белицкая // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2004. – № 8. – С. 8-12.

13. Белицкая, М. Н. Установление регламентов применения эха воды в зерновых агроценозах / М. Н. Белицкая, И. Р. Грибуст, Е. Э. Нефедьева // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2012. – № 2. – С. 3-8

14. Белицкая, М. Н. Электроактивированная вода: возможности использования в растениеводстве / М. Н. Белицкая, Е. Э. Нефедьева, И. Г. Шайхиев // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 24. – С. 124-128.

15. Богуславская, Н. В. Получение и исследование влияния электрохимически активированной воды на прорастание семян озимой пшеницы / Н. В. Богуславская // Экологическая безопасность в АПК. – 2006. – № 4. – С. 904.

16. Большаков, А. С. Технологические свойства активированной воды / А. С. Большаков, Л. А. Сарычева, А. А. Борисенко, Т. П. Шаганова // Известия высших учебных заведений. – Пищевая технология. – 1992. – № 2. – С. 56-58.

17. Борисов, В. А. Эффективное применение удобрений / В. А. Борисов, С. С. Литвинов. – Картофель и овощи. – 2014. – № 2. – С. 12-14.

18. Боровиков, В. П. Популярное введение в современный анализ данных в системе Statistica / В. П. Боровиков. – М.: Телеком, 2013. – 288 с.

19. Боровиков, В. П. Прогнозирование в системе Statistica в среде Windows / В. П. Боровиков. – М., 2006. – 214 с.

20. Боровой, Е. П. Аналитический подход к определению параметров контура увлажнения почвы на основе решения уравнения влагопереноса / Е. П. Боровой, Е. А. Ветренко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2009. – № 4. – С. 52-57.

21. Бородычёв, В. В. Алгоритм решения задач управления водным режимом почвы при орошении сельскохозяйственных культур / В. В. Бородычёв, М. Н. Лытов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2015. – № 1. – С. 8-11.

22. Бородычев, В. В. Современные технологии капельного орошения овощных культур: научное издание / В. В. Бородычев – Волгоград: Радуга, 2010. – 241 с.

23. Брандт, З. Статистические методы анализа наблюдений / З. Брандт. – М.: Мир, 1975. – 312 с.

24. Брыкалов, А. В. Оценка влияния электрохимически активированной воды на ферментативную активность семян / А. В. Брыкалов, Е. В. Плющ // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 4. – С. 83.

25. Бывальцев, А. И Свойства активированной воды и ее использование в пищевой технологии / А. И. Бывальцев, Г. О. Магомедов, В. А. Бы-

вальцев // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2008. – № 7. – С. 49-53.

26. Быковский, Н. А. Очистка сульфидсодержащих сточных вод в электролизере с растворимым железным анодом/ Н. А. Быковский, Л. Н. Пучкова, Н. С. Шулаев // Башкирский химический журнал. – 2006. – Т. 13. – № 3. – С. 78-81.

27. Виленский, П. Л. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов / П. Л. Виленский, В. Н. Лившиц, С. А. Смоляк. – М.: Экономика, 2000. – 421 с.

28. Габленко, М. В. Использование электрохимического раствора анолит для очистки сточных вод от синтетических красителей / М. В. Габленко, Н. А. Тимашева, Аммар Шалбак, Ле Туан Шон // Успехи в химии и химической технологии. – 2008. – Т. 22. – № 13(93). – С. 44-47.

29. Гидравлический расчет простого напорного трубопровода: методические указания / Сост. Н. П. Жуков. – Тамбов: ТГТУ, 2009. – 24 с.

30. Гиль, Л. С. Современное промышленное производство овощей и картофеля с использованием систем капельного орошения и фертигации / Л. С. Гиль, В. И. Дьяченко, А. И. Пашковский, Л. Т. Сулима // ЧП "Рута". – 2007. – 390 с.

31. Голованов, А. И. Основы капельного орошения (теория и примеры расчетов) / А. И. Голованов, Е. В. Кузнецов. – Краснодар, 1996. – С. 6-27.

32. Голохваст, К. С. Перспективы использования электрохимической активации растворов / К. С. Голохваст, В. В. Рыжаков, В. В. Чайка, А. Н. Гульков // Вода: химия и экология. – 2011. – № 2. – С. 23-30.

33. Грачев, Ю. П. Математические методы планирования экспериментов / Ю. П. Грачев. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 199 с.

34. Григоров, М. С. Способы и технологии полива для фермерских хозяйств / М. С. Григоров, С. М. Григоров // Природообустройство. – 2008. – № 2. – С. 25-32.

35. Григоров, С. М. Математическая модель капельного орошения / С. М. Григоров, Е. В. Мелихова // Аграрный научный журнал. – 2007. – № 4. – С. 30-32.

36. Григоров, С. М. Предпосевная обработка семян и повышение биологической активности оросительной воды / С. М. Григоров, А. Н. Чушкин, Е. И. Чушкина // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2009. – № 2. – С. 62-70.

37. Дементьев, А. В. Эффективность капельного орошения овощных и плодовых культур / А. В. Дементьев, С. И. Рожнов // Научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава, аспирантов и научных сотрудников по итогам работы за 2001 г. (29.01-01.02.2002 г.) // Волгоград: ВГСХА, 2001. – 89 с.

38. Демин, Л. А. Роль приемов моделирования при решении экстремальных задач / Л. А. Демин // Труды Десятой международной научно-практической конференции Независимого научного аграрноэкономического общества России. – М., 2006. – Вып. 10, т. 1. – С. 130-133.

39. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов – М.:

Агропромиздат, 1983. – 351 с.

40. Дубенок, Н. Н. Капельное орошение огурца / Н. Н. Дубенок, В. В. Бородычев, М. Н. Лытов, О. М. Дмитриенко // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2007. – № 1. – С. 75-78.

41. Дубенок, Н. Н. Особенности водного режима почвы при капельном орошении сельскохозяйственных культур / Н. Н. Дубенок, В. В. Бородычев, М. Н. Лытов, О. А. Белик // Достижения науки и техники АПК. – 2009. – № 4. – С. 22-24.

42. Дубенок, Н. Н. Экспериментальное обоснование возможности снижения пестицидных нагрузок при возделывании томатов в условиях орошения / Н. Н. Дубенок, С. Я. Семененко, М. Н. Лытов, Е. И. Чушкина // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2014. – № 5. – С. 55-58

43. Дуброва, Т. А. Статистические методы прогнозирования / Т. А. Дуброва. – М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 205 с.

44. Еремина, А. Н. Влияние активированной жидкости затворения на гидравлическую активность и твердение цементных систем: дис. …к. т. н. – Томск, 2002.

45. Журба, М. Г. К обоснованию методов обеззараживания природных вод / М. Г. Журба, Ж. М. Говорова, В. М. Бахир, А. Н. Ульянов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2011. – № 4. – С. 37-42.

46. Журба, М. Г. Повышение качества оросительной воды / М. Г. Журба // Технико-экономические аспекты нормирования качества оросительной воды. – М.: Агропромиздат, 1990. – С. 71-77.

47. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

48. Капельное орошение (пособие к СНиП 2.06.03-85). Мелиоративные системы и сооружения. – М.: Союзводпроект, 1986. – 147 с.

49. Карпунин, В. В. Инновационные технологии и технические средства повышения эффективности систем капельного орошения / В. В. Карпунин, А. Н. Чушкин, Е. И. Чушкина // Инновационные технологии повышения эффективности мелиоративных систем и безопасности гидротехнических сооружений. – Волгоград: ПНИИЭМТ, 2010. – С. 14-20

50. Карпунин, В. В. Удобрительное орошение: теория, технология, технические средства / В. В. Карпунин, В. И. Филин, А. П. Сапунков, В. Г. Абезин. – Волгоград: ПНИИЭМТ, 2003. – 443 с.

51. Клейнен, Д. Статистические методы в имитационном моделировании / Д. Клейнен. – М.: Статистика, 1978. – 335 с.

52. Костяков, А. Н. Основы мелиорации / А. Н. Костяков – М.: Сельхозгиз, 1960. – 621 с.

53. Кружилин, И. П. Системы орошаемого земледелия в ландшафтах комплексно мелиорированных почв / И. П. Кружилин // Перспективы развития аридных территорий через интеграцию науки и практики. – М.: ПНИИАЗ, 2008. – С. 26-33

54. Кузнецов, Н. Г. Вводные лекции по математическому моделиро-

ванию и математической теории эксперимента / Н. Г. Кузнецов, С. И. Богданов. – Волгоград: ВГСХА, 2008. – 182 с.

55. Лагутин, В. В. Совершенствование технологий и технических средств возделывания овощных культур с использованием активированной воды: дис. к. т. н. – Волгоград, 2002. – 150 с.

56. Лоу, А. Имитационное моделирование / А. Лоу, Д. Кельтон. – СПб: Питер, 2004. – 847 с.

57. Мелиорация и водное хозяйство. Орошение: справочник / Под ред. Шумакова, Б. Б. – М.: Колос, 1999. – 432 с.

58. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – Л.: Колос, 1980. – 168 с.

59. Науменко, И. И. Проектирование систем капельного орошения с учетом защиты почв от водной эрозии / И. И. Науменко // Почвозащитная технология полива и повышение надежности противопаводковой защиты. – Пущино, 1990. – С. 87-91

60. Новиков, А. Е. Гидравлический расчет лент системы капельного орошения / А. Е. Новиков, М. И. Ламскова, В. А. Моторин, В. В. Некрасова // Природообустройство. – 2014. – № 2. – С. 29-33.

61. Овчинников, А. С. Зона увлажнения почвы как фактор управления ростом корневой системы томатов при капельном орошении / А. С. Овчинников, И. И. Азарьева // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2009. – № 4. – С. 43-47.

62. Овчинников, А. С. Комбинированное орошение сельскохозяйственных культур / А. С. Овчинников, В. В. Бородычев, М. Ю. Храбров, В. М. Гуренко, А. В. Майер // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2015. – № 2(38). – С. 6-13.

63. Овчинников, А. С. Конструктивные особенности систем капельного и внутрипочвенного орошения / А. С. Овчинников, М. П. Мещеряков, В. С. Бочарников // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2007. – № 1. – С. 54-56.

64. Овчинников, А. С. Применение ресурсосберегающих способов полива при возделывании сельскохозяйственных культур / А. С. Овчинников, М. П. Мещеряков // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2007. – № 1. – С. 46-49.

65. Определение оптимальных параметров активации воды для возделывания овощных культур: отчет НИР (№ ГР 01.200.115757) / В. И. Пындак, В. В. Лагутин. – Волгоград: ВГСХА, 2001. – 32 с.

66. Осадченко, И. М. Влияние элекроактивированной воды при предпосевной обработке семян на рост, развитие и продуктивность нута / И. М. Осадченко, О. В. Харченко, В. Н. Чурзин, А. В. Куприянов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2010. – № 1. – С. 53-57.

67. Осадченко, И. М. Повышение посевных качеств семян арбуза, дыни и кабачка с применением биологически активных веществ / И. М. Осадченко, О. В. Харченко, В. Н. Чурзин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2009. – № 2. – С. 48-52.

68. Осадченко, И. М. Технология получения электроактивированной воды, водных растворов и их применение в АПК / И. М. Осадченко, И. Ф. Горлов. – Волгоград. – ВолГАУ, 2010. – 91 с.

69. Осадченко, И. М. Технология получения зеленых кормов путем стимуляции замачивания и проращивания семян пшеницы с использованием электроактивированных растворов / И. М. Осадченко, И. Ф. Горлов, Д. В. Николаев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 1(111). – С. 80-83.

70. Осадченко, И. М. Использование электроактивированных растворов для консервирования зеленных кормов – новые технологии / И. М. Осадченко, И. Ф. Горлов // Совершенствование технологий производства продуктов питания в свете государственной программы развития сельского хозяйства на 2008-2012 гг: материалы Международ. науч.-практ. конф. – Волгоград: ВНИТИММСиППЖ, ВолГАУ, 2008. – С. 305-308.

71. Осадченко, И. М. Разработка способа получения мясного фарша с использованием электроактивированных растворов / И. М. Осадченко, А. С. Филатов, Н. Г. Чамурлиев // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2017. – № 1(45). – С. 109-114.

72. Осадченко, И. М. Перспективный способ хранения мяса в охлажденном состоянии / И. М. Осадченко, И. Ф. Горлов, Е. Ю. Злобина, Д. В. Николаев // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2014. – № 3(113). – С. 111-114.

73. Пасько, О. А. Метаболизм в семенах амаранта *Amaranthus* L. при воздействии электрохимически активированной воды / О. А. Пасько // Сельскохозяйственная биология. – 2013. – № 3. – С. 84-91.

74. Патент № 2219761 Российская Федерация, МПК A01G25/02. Система подготовки воды и подачи питательной смеси в почву при капельном орошении / Карпунин В. В., Сапунков А. П., Салдаев А. М., Абезин В. Г., Карпунин В. В., Лагутин А. Н. // Изобретения. Полезные модели. – 2003. – № 36.

75. Патент № 2518606 Российская Федерация, МПК C02F1/46. Установка для электрохимической активации воды / Конюшков А. Л., Семененко С. Я., Лагутин А. Н., Чушкина Е. И., Кузнецова М. Н.// Изобретения. Полезные модели. – 2010. – № 27.

76. Патент № 2224722 Российская Федерация, МПК C02F1/46. Установка для электрохимической активации оросительной воды, преимущественно для систем капельного орошения / Абезин В. Г., Карпунин В. В., Лагутин А. Н., Рогачев А. Ф., Салдаев А. М., Карпунин В. В. // Изобретения. Полезные модели. – 2004. – № 6.

77. Патент № 2251531 Российская Федерация, МПК C02F1/46. Установ-

ка для электрохимической активации воды и водных растворов преимущественно для систем капельного орошения / Абезин В. Г., Карпунин В. В., Карпунин В. В., Сердюков Д. А., Салдаев А. М.// Изобретения. Полезные модели. – 2005 – № 13.

78. Патент № 2277070 Российская Федерация, МПК C02F1/46. Устройство для электрохимической активации воды и водных растворов / Абезин В. Г., Карпунин В. В., Карпунин В. В., Салдаев А. М. // Изобретения. Полезные модели. – 2005. – №15.

79. Патент № 2332825 Российская Федерация, МПК A02B79/02. Способ возделывания сельскохозяйственных культур при капельном орошении / Абезин В. Г., Карпунин В. В., Карпунин В. В., Сердюков Д. А., Салдаев А. М. // Изобретения. Полезные модели. –2008. – № 25.

80. Патент № 2374832 Российская Федерация, МПК A01G25/02. Оросительная система с модулем активации воды / Абезин В. Г., Карпунин В. В. // Изобретения. Полезные модели. – 2009. – № 34.

81. Патент № 2400436 Российская Федерация, МПК C02F1/46. Модуль электрохимической активации воды / Конюшков А. Л., Карпунин В. В., Алимов А. Г., Карпунин В. В. Лагутин А. Н.// Изобретения. Полезные модели. – 2010. – № 27.

82. Патент № 2494610 Российская Федерация, МПК A01G25/00. Система капельного орошения для плодово-ягодных и лесных питомников / Абезин В. Г., Семененко С. Я., Григоров М. С., Григоров С. М., Марченко С. С. // Изобретения. Полезные модели. – 2013. – № 28.

83. Патент № 2539206 Российская Федерация, МПК A01G9/10. Способ возделывания овощных и бахчевых культур / Пындак В. И., Новиков А. Е., Константинова Т. В., Межевова А. С., Моторин В. А. // Изобретения. Полезные модели. – 2015. – № 2.

84. Патент № 2548970 Российская Федерация, МПК C02F 1/46. Установка для повышения окислительно-восстановительного потенциала питьевой и оросительной воды /Абезин В. Г., Дубенок Н. Н., Семененко С. Я., Чушкин А. Н. // Изобретения. Полезные модели. – 2015. – № 11.

85. Плешаков, В. Н. Методика полевого опыта в условиях орошения / В. Н. Плешаков. – Волгоград: ВНИИОЗ, 1983. – 148 с.

86. Плутахин, Г. А. Практическое применение электрохимически активированных водных растворов / Г. А. Плутахин, М. Аидер, А. Г. Кощаев, Е. Н Гнатко // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 92. – С. 254-264.

87. Помякшева, Л. В. Фертигация земляники на дерново-подзолистых почвах / Л. В. Помякшева // Плодоводство и ягодоводство России. – 2012. – Т. 30. – С. 112-118.

88. Прилуцкий, В. И. Электрохимически активированная вода: аномальные свойства, механизм биологического действия / В. И. Прилуцкий, В. М. Бахир. – М., 1997. – 228 с.

89. Пындак, В. И. Энергосбережение при активации воды / В. И. Пындак, В. В. Лагутин, А. В. Юшкин // Успехи современного естествознания. –

2002. – № 4. – С. 109.

90. Рекомендации по применению усовершенствованных технологий и средств механизации для внесения удобрительных растворов в орошаемом земледелии / Под ред. Р. П. Заднепровского. – Волгоград: ВГСХА, 2002. – 91 с.

91. Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации систем капельного орошения (ВТР-П-28-81) / Л. П. Фадеев, П. Л. Гунько, А. А. Никольская др. – М.: Союзводпроект, 1981. – 195 с.

92. Руководство по эксплуатации: pH-метр pH-150 МИ / ГРБА .414318.001РЭ. – М.: ООО Измерительная техника. – 35 с.

93. Семененко, С. Я. Электрохимическая активация оросительной воды и применение активированных растворов при выращивании зерновых культур / С. Я. Семененко, С. С. Марченко, Е. И. Чушкина // Плодоводство и ягодоводство России. – 2012. – Т. 33. – С. 302-308.

94. Семененко, С. Я. Закономерности релаксации и восстановления свойств электрохимически активированных водных сред в системах с полимерной оболочкой / С. Я. Семененко, А. Н. Чушкин, М. Н. Лытов // Использование мелиорированных земель – современное состояние и перспективы развития мелиоративного земледелия: материалы Международ. науч.-практ. конф. – Тверь: ВНИИМЗ, 2015. – 208-212.

95. Семененко, С. Я. Использование электрохимически активированной воды для повышения урожайности картофеля / С. Я. Семененко, М. Н. Белицкая, С. М. Лихолетов // Аграрная наука. – 2012. – № 5. – С. 21-23.

96. Семененко, С. Я. Исследование воздействия электрохимически активированной воды на морфометрические характеристики томатов / С.Я. Семененко, Е.И. Чушкина // Актуальные вопросы природопользования в аридной зоне Северо-Западного Прикаспия: материалы I Международ. нау.-практ. конф. молодых ученых. – М.: Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук, 2012. – С. 144-147.

97. Семененко, С. Я. Механизм действия электрохимически активированной воды и анализ её применения в разных отраслях сельхозпроизводства / С. Я. Семененко, Е. И. Чушкина, М. Н. Кузнецова, М. В. Мазепа // Современные агротехнологии-2012: тез. докл. Международ. науч.-практ. интернет-конф. – Великий Новгород: Новгородский НИИСХ, 2012. – С. 22-24.

98. Семененко, С. Я. Обеспечение качества плодов томата при капельном орошении с использованием электрохимически активированной воды / С. Я. Семененко, Е. И. Чушкина, М. Н. Лытов, А. Н. Чушкин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2014. – № 3. – С. 73-77.

99. Семененко, С. Я. Оросительные системы с модулем активации воды / С. Я. Семененко, В. Г. Абезин // Научная жизнь. – 2012. – № 3. – С. 126-131.

100. Семененко, С. Я. Особенности релаксации электрохимически активированной воды в открытых и закрытых системах с полимерной оболочкой / С. Я. Семененко, А. Н. Чушкин, В. Ф. Лобойко, М.Н. Лытов // Из-

вестия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – 2015. – №. – С. 175-181.

101. Семененко, С. Я. Применение электрохимически активированной воды для фитосанитарного оздоровления зерновых культур и повышения их урожайности / С. Я. Семененко, М. Н. Белицкая, С. М. Лихолетов // Аграрная Россия. – 2012. – № 10. – С. 20-23.

102. Семененко, С. Я. Продуктивность томатов при капельном орошении с использованием электрохимически активированной воды / С. Я. Семененко, М. Н. Лытов, Е. И. Чушкина, А. Н. Чушкин // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2014. – № 2(14). – С. 1-14.

103. Семененко, С. Я. Разработка проточных устройств для электрохимической активации воды производственного назначения / С. Я. Семененко, А. Л. Конюшков, Е. И. Чушкина, А. Н. Лагутин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2013. – № 2(30). – С. 214-218.

104. Семененко, С. Я. Фитосанитарное оздоровление зерновых и овощных культур с помощью электрохимически активированной воды / С. Я. Семененко, М. Н. Белицкая, С. М. Лихолетов // Успехи современного естествознания. – 2013. – № 1. – С. 78-82.

105. Семененко, С. Я. Эффективность возделывания томатов при капельном орошении с использованием электрохимически активированной воды / С. Я. Семененко, Е. И. Чушкина, М. Н. Лытов, А. Н. Чушкин // Плодородие. – 2014. – № 2. – С. 38-41.

106. Томилов, А. П. Электрохимическая активация – новое направление прикладной электрохимии / А. П. Томилов // Жизнь и безопасность. – 2002. – № 3. – С. 302-307.

107. Труфляк, Е. В. Изучение гидропосева овощных культур с применением электроактивированной воды / Е. В. Труфляк, Н. Ю. Курченко, Д. С. Яркин // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 96. – С. 66-79.

108. Труфляк, Е. В. Посев семян овощных культур и табака гидравлическим способом с использованием электроактивированной воды / Е. В. Труфляк, Е.И. Виневский, Н. Ю. Курченко, И. С. Скоробогаченко // Техника и оборудование для села. – 2015. –№ 1. – С. 10-13.

109. Фролов, Д. В. Эффективность влияния электрохимически активированного раствора при предпосевной вакуумной стимуляции семян при выращивании корма гидропонным способом / Д. В. Фролов, Т. Д. Дерябина, Л. Н. Павлов // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2011. – Т. 4. – № 32-1. – С. 73-75.

110. Харченко, О. В. Применение электрохимически активированных водных растворов в качестве стимуляторов роста семян для ярового ячменя / О. В. Харченко, А. В. Куприянов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2009. – № 3. – С. 40-43.

111. Харченко, О. В. Совершенствование технологии выращивания яч-

меня с использованием электрохимически активированной воды / О. В. Харченко, В. Н. Чурзин, И. М. Осадченко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2007. – № 1. – С. 109-112.

112. Харченко, П. Н. Биотехнология в растениеводстве / П. Н. Харченко // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. – 2011. – № 1. – С. 30-32.

113. Чушкин А. Н. Совершенствование систем капельного орошения активированной водой / А. Н. Чушкин, Е. И. Чушкина // Современные проблемы мелиорации и водного хозяйства. – Москва: ВНИИГиМ. – 2009. – Т. 2. – С. 192-196.

114. Чушкин, А. Н. Механизм биологического действия и опыт применения электрохимически активированных водных сред в сельском хозяйстве / А. Н. Чушкин, С. Я. Семененко, М. Н. Лытов, Е. И. Чушкина // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2015. – № 4(20). – С. 170-185.

115. Чушкин, А. Н. Эффективность применения воды с измененным окислительно-восстановительным потенциалом при подготовке семян овощных культур к посеву / А. Н. Чушкин, Е. И. Чушкина, М. Н. Лытов, А. Н. Лагутин // Известия Нижне-Волжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2015. – № 1(37). – С. 203-206.

116. Чушкина, Е. И. Биофизический способ подавления патогенной микрофлоры при возделывании томатов в условиях капельного орошения / Е. И. Чушкина // Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных мелиоративных технологий: сб. науч. тр. – Рязань: ФГБОУ ВПО РГАТУ, 2014. – С. 47-53.

117. Чушкина, Е. И. Влияние биологически активированной воды на интенсивность роста томатов / Е. И. Чушкина // Материалы Международ. науч.-практ. конф. – Волгоград: ФГБОУ ВПО Волгоградский ГАУ, 2012. – С. 341-345.

118. Швабауэр, В. В. Расчет гидравлических потерь давления в трубопроводе из пластмасс / В. В. Швабауэр, И. В. Гвоздев, М. И. Гориловский // Полимерные трубы. – 2005. – № 1(6) – С. 36-40.

119. Шипуля, А. Н. Исследование влияния электрохимически активированной воды на ростовые процессы / А. Н. Шипуля, Е. В. Волосова, К. Р. Соловьева // Сборник научных трудов Sworld. – 2014. – Т. 27. – № 2. – С. 91-94.

120. Широносов, В. Г. Приготовление питьевой воды высшего качества: анализ и перспектива / В. Г. Широносов, В. В. Минаков, О. В. Широносов, Г. И. Широносова, В. Б. Иванов // Экология и промышленность России. – 2008. – № 3. – С. 4-7.

121. Ширякова, Т. А. Оценка токсичности и эффективности электролизных и электрохимически активированных растворов для обеззараживания сточных вод / Т. А. Ширякова, И. И. Бурак, Е. В. Дроздова, А. В. Фираго, И. Э. Головнев, С. В. Григорьева // Вестник Витебского государственного медицинского университета. – 2015. – Т. 14, № 1. – С. 103-109.

122. Шрамко, Г. А. Влияние длительности электролиза воды и по-

следующей релаксации на электрохимические характеристики католита и анолита / Г. А. Шрамко, Э. А. Александрова, Б. Е. Красавцев, А. С. Цатурян, В. Б. Симкин // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 35. – С. 385-388.

123. Шрамко, Г. А. Совершенствование технологии некорневой подкормки озимой пшеницы с применением электрохимически активированной воды / Г. А. Шрамко, Э. А. Александрова, Т. В. Князева // Труды Кубанского государственного аграрного университета: науч. журнал. – 2011. – № 6(33). – С. 69-72.

124. Штепа, В. Н. Экспериментальное обоснование конструкции установки для электрохимического изменения свойств водных растворов (на примере гальваностоков) / В. Н. Штепа, Р. Е. Кот // Енергетика і автоматика. – 2015. – № 3(25). – С. 26-33.

125. Шуравилин, А. В. Режим капельного орошения плодового сада на светло-каштановых почвах Нижнего Поволжья / А. В. Шуравилин, В. В. Бородычев, М. Н. Лытов, А. В. Сергиенко // Землеустройство, кадастр и мониторинг земель. – 2011. – № 1(73). – С. 75-78.

126. Шурыгин, В. Обоснование научного подхода к расчету параметров гидротранспорта в пластмассовых трубопроводах / В. Шурыгин, Е. Семененко // Полимерные трубы. – 2007. – № 1. – С. 50-56.

127. Ясониди, О. Е. Проектирование систем капельного орошения / О. Е. Ясониди. – Новочеркасск: НИМИ, 1984. – 100 с.

128. Ясониди, О. Е. Фертигация при капельном орошении овощей в теплицах / О. Е. Ясониди, Е. О. Ясониди, М. В. Григоренко // Актуальные вопросы гидротехники и мелиорации на Юге России: сб. науч. тр. – Новочеркасск: НГМА, 2013. – С. 65-73.

129. Electrochemical characterization of carbon felt electrodes for bulk electrolysis / Kato Kan, Kako Kenji, Ikeeta Tokuji (Division of Applied Life Sciences, Graduate School of Agriculture, Kyoto University, Kyoto 606 8502, Japan). J. Electrochem. Soc. – 2000. – 147, № 4. – p. 1449-1453.

130. Goyal, M. R. Trickle irrigation in action / M. R. Goyal, E. L. Rivera, E. Caraballo, C. L. Santiago // Growth characteristics of trickle irrigated vegetables. – Drip. St. Joseph, Mich,' 1985. – T. 1. – P. 249-254.

131. Meshkat, M. Interactive computer trickle irrigation desing systems / M. Meshkat, R. C. Warner // St. Joseph, Mich, 1985. – 30 c.

132. Nakauama, F. S Trickle irrigation for crop production. Design, operation and magagement / F. S Nakauama. – Amsterdam ets: Elsevier, 1986. – 383 c.

133. Semenenko, S. Yielding capacity and quality of tomato fruits at drop irrigation with electrochemically activated water in light-chestnut soils of the lower Volga region / S. Semenenko, V. Borodychev, E. Ivantsova, M. Lytov // 15th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2015. – Book5. – Vol. 1. – PP 1055-1062.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1

Динамика релаксации электрохимически активированной воды при разных начальных уровнях активации

Время релаксации, час	Католит, ОВП = –420 мВ, pH = 10,0		Анолит, ОВП = +680 мВ, pH = 4,6		Католит, ОВП = –650 мВ, pH = 10,5		Анолит, ОВП = +840 мВ, pH = 3,9		Католит, ОВП = –740 мВ, pH = 10,9		Анолит, ОВП = +920 мВ, pH = 3,4	
	редокс-потенциал (ОВП), мВ	pH	редокс-потенциал (ОВП), мВ	pH	редокс-потенциал (ОВП), мВ	pH	редокс-потенциал (ОВП), мВ	pH	редокс-потенциал (ОВП), мВ	pH	редокс-потенциал (ОВП), мВ	pH
0,1	–420	10,00	680	4,65	–650	10,50	840	3,90	–740	10,90	920	3,40
1	–230	9,60	315	5,71	–460	10,10	472	4,97	–552	10,50	548	4,45
3	–150	9,00	250	6,22	–383	9,48	409	5,46	–470	9,88	485	4,95
4	–142	8,97	245	6,28	–375	9,46	376	5,53	–463	9,87	454	5,01
5	–130	8,96	242	6,37	–365	9,46	363	5,60	–455	9,86	441	5,11
7	–25	8,90	238	6,49	–250	9,40	352	5,72	–335	9,80	430	5,18
8	10	8,85	242	6,54	–220	9,33	334	5,79	–312	9,73	410	5,27
9	22	8,79	240	6,61	–190	9,25	312	5,87	–283	9,65	392	5,42
11	40	8,64	240	6,64	–170	9,11	309	5,89	–260	9,51	385	5,49
12	51	8,50	239	6,76	–145	8,94	315	6,01	–240	9,34	371	5,67
14	68	8,31	238	6,84	–109	8,72	316	6,25	–200	9,10	359	5,95
24	98	8,01	237	6,86	–31	8,45	272	6,43	–103	8,69	335	6,24
36	130	7,95	239	6,85	45	8,14	252	6,81	5	8,28	298	6,55
48	153	7,93	237	6,87	102	7,97	245	6,82	102	8,01	265	6,79
72	161	7,93	237	6,92	157	7,95	245	6,82	192	7,89	254	6,83

Приложение 2

Скорость восстановления параметров-характеристик электрохимически активированной воды (V-ОВП, мВ/ч и V-pH, ед./ч) при разных начальных уровня активации

Период релакса-ции, час	Католит, ОВП = –420 мВ, pH = 10,0		Анолит, ОВП = +680 мВ, pH = 4,6		Католит, ОВП = –650 мВ, pH = 10,5		Анолит, ОВП = +840 мВ, pH = 3,9		Католит, ОВП = –740 мВ, pH = 10,9		Анолит, ОВП = +920 мВ, pH = 3,4	
	V(ОВП)	V(pH)	V(ОВП)	V(pH)	V(ОВП)	V(pH)	V(ОВП)	V(pH)	V(ОВП)	V(pH)	V(ОВП)	V(pH)
0,1-1,0	190,0	0,40	365,0	1,06	190,0	0,40	368,0	1,07	188,0	0,40	372,0	1,05
1-3	40,0	0,30	32,5	0,26	38,5	0,31	31,5	0,25	41,0	0,31	31,5	0,25
3-4	8,0	0,03	5,0	0,06	8,0	0,02	33,0	0,07	7,0	0,01	31,0	0,06
4-5	12,0	0,01	3,0	0,09	10,0	0,00	13,0	0,07	8,0	0,01	13,0	0,10
5-7	52,5	0,03	2,0	0,06	57,5	0,03	5,5	0,06	60,0	0,03	5,5	0,03
7-8	35,0	0,05	–4,0	0,05	30,0	0,07	18,0	0,07	23,0	0,07	20,0	0,09
8-9	12,0	0,06	2,0	0,07	30,0	0,08	22,0	0,08	29,0	0,08	18,0	0,15
9-11	9,0	0,07	0	0,01	10,0	0,07	1,5	0,01	11,5	0,07	3,5	0,04
11-12	11,0	0,14	1,0	0,12	25,0	0,17	–6,0	0,12	20,0	0,17	14,0	0,18
12-14	8,5	0,09	0,5	0,04	18,0	0,11	–0,5	0,12	20,0	0,12	6,0	0,14
14-24	3,0	0,03	0,1	0	7,8	0,03	4,4	0,02	9,7	0,04	2,4	0,03
24-36	2,7	0	–0,2	0	6,3	0,03	1,7	0,03	9,0	0,03	3,1	0,03
36-48	1,9	0	0,2	0	4,8	0,01	0,6	0,00	8,1	0,02	2,8	0,02
48-72	0,3	0	0	0	2,3	0,00	0	0,00	3,8	0,01	0,5	0

Приложение 3

Опытные значения ОВП католита при разных условиях хранения, мВ

Условия хранения	Время проведения измерений, ч	Номер измерения (повторность)			
		I	II	III	IV
Закрытый резервуар	0,1	–631	–644	–695	–630
	1	–537	–575	–604	–604
	3	–565	–561	–600	–514
	4	–482	–483	–542	–413
	5	–491	–536	–538	–539
	8	–468	–484	–551	–393
	12	–388	–381	–431	–332
	22-24	–261	–273	–304	–238
	46-48	30	31	32	27
	70-72	140	148	161	151
Открытый резервуар	0,1	–651	–647	–666	–636
	1	–427	–463	–497	–453
	3	–386	–382	–384	–380
	4	–349	–372	–408	–371
	5	–338	–376	–368	–378
	8	–220	–230	–241	–189
	12	–134	–148	–137	–161
	22-24	–29	–32	–32	–31
	46-48	97	104	104	103
	70-72	151	160	169	148

Результаты дисперсионного анализа опытных данных

Группирующий фактор	Сумма квадратов	Свобода	Средний квадрат	$F_{факт.}$	$F_{теор.}$	S_d	$НСР_{05}$
Общая	5403529,2	79	-	-	-	-	-
Условия хранения (группирующий фактор А)	376477,0	1	376476,8	473,38	4,00	6,31	11
Время измерения (группирующий фактор В)	4824387,0	9	536043,0	674,01	2,04	14,10	24
АВ	154947,0	9	17216,4	21,65	2,04	19,94	33
Ошибка	47718,0	60	795,3	-	-	-	-

Приложение 4

Опытные значения pH католита при разных условиях хранения

Условия хранения	Время проведения измерений, час	Номер измерения (повторность)			
		I	II	III	IV
Закрытый резервуар	0,1	9,95	10,73	10,68	10,64
	1	9,92	10,32	10,12	11,36
	3	9,54	10,51	9,46	11,45
	4	9,53	10,57	10,38	9,96
	5	9,65	10,08	10,34	10,41
	8	9,36	10,12	9,74	9,62
	12	9,04	9,65	9,75	9,20
	22-24	8,59	9,09	9,18	9,58
	46-48	8,03	9,10	8,38	9,37
	70-72	7,99	8,31	8,03	9,43
Открытый резервуар	0,1	9,72	10,68	9,75	11,85
	1	9,85	10,26	10,06	10,23
	3	8,97	9,61	9,11	10,23
	4	9,16	9,27	9,33	10,08
	5	8,71	9,89	9,24	10,00
	8	8,59	9,34	8,60	10,79
	12	8,47	8,92	8,72	9,65
	22-24	8,14	8,45	8,56	8,65
	46-48	7,66	8,24	7,79	8,19
	70-72	7,48	8,00	7,55	8,77

Результаты дисперсионного анализа опытных данных

Группирующий фактор	Сумма квадратов	Свобода	Средний квадрат	$F_{факт.}$	$F_{теор.}$	S_d	$НСР_{05}$
Общая	70,300	79	-	-	-	-	-
Условия хранения (группирующий фактор А)	5,304	1	5,30	15,82	4,00	0,13	0,22
Время измерения (группирующий фактор В)	43,840	9	4,87	14,53	2,04	0,29	0,48
АВ	0,992	9	0,11	0,33	2,04	0,41	0,68
Ошибка	20,114	60	0,34	-	-	-	-

Приложение 5

Опытные значения ОВП анолита при разных условиях хранения, мВ

Условия хранения	Время проведения измерений, ч	Номер измерения (повторность)			
		I	II	III	IV
Закрытый резервуар	0,1	818	872	901	769
	1	776	833	774	805
	3	707	782	719	776
	4	667	720	708	773
	5	687	708	686	703
	8	625	677	713	573
	12	575	615	650	532
	22-24	484	486	492	510
	46-48	378	405	412	393
	70-72	326	360	369	325
Открытый резервуар	0,1	787	845	908	820
	1	471	485	543	389
	3	413	428	487	308
	4	378	377	404	345
	5	369	360	418	305
	8	340	344	370	282
	12	295	325	339	301
	22-24	267	270	301	250
	46-48	232	242	271	235
	70-72	226	257	254	243

Результаты дисперсионного анализа опытных данных

Группирующий фактор	Сумма квадратов	Свобода	Средний квадрат	$F_{факт.}$	$F_{теор.}$	S_d	$НСР_{05}$
Общая	3363449	79	-	-	-	-	-
Условия хранения (группирующий фактор А)	1152000	1	1152000,0	706,04	4,00	9,03	15
Время измерения (группирующий фактор В)	1858427	9	206491,9	126,56	2,04	20,20	34
АВ	255124	9	28347,1	17,37	2,04	28,56	48
Ошибка	97898	60	1631,6	-	-	-	-

Приложение 6

Опытные значения pH анолита при разных условиях хранения

Условия хранения	Время проведения измерений, ч	Номер измерения (повторность)			
		I	II	III	IV
Закрытый резервуар	0,1	3,78	3,91	3,76	4,15
	1	3,91	4,19	4,08	4,3
	3	4,14	4,55	4,22	4,73
	4	4,43	4,74	4,57	4,58
	5	4,48	4,75	4,67	4,70
	8	4,63	5,09	4,64	5,16
	12	5,07	5,47	5,23	5,11
	22-24	5,46	5,81	5,45	5,84
	46-48	6,08	6,50	6,34	6,36
	70-72	6,29	6,80	6,79	7,12
Открытый резервуар	0,1	3,71	3,97	3,79	4,13
	1	4,86	5,18	4,88	4,96
	3	5,32	5,36	5,47	5,69
	4	5,26	5,76	5,58	5,52
	5	5,31	5,66	5,39	6,04
	8	5,35	5,87	5,84	6,10
	12	5,84	6,08	6,37	5,75
	22-24	5,99	6,55	6,47	6,71
	46-48	6,54	7,03	6,55	7,16
	70-72	6,58	6,83	6,59	7,28

Результаты дисперсионного анализа опытных данных

Группирующий фактор	Сумма квадратов	Свобода	Средний квадрат	$F_{факт.}$	$F_{теор.}$	S_d	$НСР_{05}$
Общая	72,600	79	-	-	-	-	-
Условия хранения (группирующий фактор А)	9,412	1	9,41	157,74	4,00	0,05	0,09
Время измерения (группирующий фактор В)	57,054	9	6,34	106,25	2,04	0,12	0,20
АВ	2,510	9	0,28	4,68	2,04	0,17	0,29
Ошибка	3,580	60	0,06	-	-	-	-

Приложение 7

Опытные значения ОВП и pH электрохимически активированной воды в системе капельного орошения

Номер измерения (повторность)	Католит			Анолит		
	l = 0,3 м	*l* = 30 м	*l* = 60 м	*l* = 0,3 м	*l* = 30 м	*l* = 60 м
ОВП, мВ						
1	–628	–636	–608	899	890	880
2	–628	–626	–610	893	883	873
3	–628	–629	–607	893	886	874
4	–633	–632	–615	899	888	886
5	–634	–635	–611	885	884	880
6	–628	–628	–609	894	892	881
7	–634	–632	–612	898	892	886
8	–626	–631	–605	889	882	875
9	–641	–639	–622	909	898	890
10	–620	–622	–601	861	885	855
Среднее	–630	–631	–610	892	888	878
pH						
1	10,52	10,53	10,53	3,00	3,02	3,04
2	10,52	10,53	10,38	3,00	2,98	3,05
3	10,56	10,48	10,40	2,99	2,98	3,04
4	10,60	10,63	10,55	3,01	3,00	3,05
5	10,48	10,60	10,37	3,01	3,01	3,07
6	10,55	10,59	10,48	3,02	3,00	3,07
7	10,57	10,58	10,49	3,01	3,03	3,06
8	10,50	10,47	10,45	2,98	2,99	3,03
9	10,66	10,75	10,67	3,04	3,05	3,11
10	10,54	10,14	10,28	2,94	2,94	2,98
Среднее	10,55	10,53	10,46	3,00	3,00	3,05

Приложение 8

Опытные значения ОВП католита и анолита с различными растворами в системе капельного орошения

Номер измерения (повторность	Концентрация раствора								
	0,05 %			0,10 %			0,30 %		
	l = 0,3 м	*l* = 30 м	*l* = 60 м	*l* = 0,3 м	*l* = 30 м	*l* = 60 м	*l* = 0,3 м	*l* = 30 м	*l* = 60 м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Раствор сульфата калия									
ОВП католита									
1	–615	–612	–605	–612	–602	–595	–575	–584	–575
2	–612	–610	–602	–601	–601	–598	–575	–581	–575
3	–608	–609	–604	–606	–601	–593	–577	–575	–571
4	–617	–613	–604	–606	–603	–601	–582	–584	–574
5	–613	–612	–605	–603	–600	–594	–579	–578	–577
6	–613	–614	–609	–602	–603	–596	–581	–579	–579
7	–620	–618	–612	–607	–608	–596	–581	–583	–577
8	–613	–608	–599	–604	–600	–594	–574	–580	–568
9	–613	–612	–605	–606	–604	–598	–577	–579	–575
10	–596	–612	–595	–613	–608	–595	–569	–567	–569
Среднее	–612	–612	–604	–606	–603	–596	–577	–579	–574
ОВП анолита									
1	664	658	661	557	554	537	306	301	292
2	657	660	656	554	548	533	305	300	290
3	656	658	655	549	550	534	303	299	288
4	665	664	655	553	551	536	306	302	290
5	666	666	658	557	546	539	303	300	291
6	665	657	657	552	548	540	306	302	289
7	667	662	656	556	555	537	305	301	292
8	655	660	651	551	549	532	302	299	288
9	673	669	662	563	558	545	307	304	295
10	642	646	639	538	551	537	297	302	285
Среднее	661	660	655	553	551	537	304	301	290
Раствор суперфосфата									
ОВП католита									
1	–505	–506	–495	–439	–442	–426	–400	–397	–382
2	–504	–500	–488	–436	–440	–425	–401	–395	–380
3	–504	–502	–487	–439	–436	–424	–401	–395	–381
4	–510	–505	–492	–440	–440	–431	–404	–395	–385
5	–505	–505	–495	–442	–440	–430	–402	–391	–380
6	–509	–502	–488	–441	–440	–425	–399	–393	–383
7	–507	–508	–495	–443	–440	–430	–402	–397	–385

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	–502	–499	–487	–439	–437	–426	–398	–395	–381
9	–513	–513	–500	–445	–447	–432	–407	–403	–388
10	–501	–490	–483	–436	–438	–421	–396	–389	–375
Среднее	–506	–503	–491	–440	–440	–427	–401	–395	–382
ОВП анолита									
1	815	814	807	763	767	752	696	695	687
2	809	805	802	757	760	747	693	691	689
3	810	807	799	758	764	750	694	689	687
4	816	815	805	760	771	757	698	694	692
5	807	810	796	755	765	758	692	691	684
6	806	814	802	754	760	750	699	692	690
7	818	812	806	759	764	750	698	697	688
8	805	808	797	755	763	746	693	689	684
9	827	820	811	770	774	766	706	706	700
10	797	805	785	749	742	734	681	696	679
Среднее	811	811	801	758	763	751	695	694	688
Раствор карбамида (мочевины)									
ОВП католита									
1	–605	–607	–591	–585	–589	–577	–571	–567	–563
2	–600	–601	–589	–583	–584	–576	–566	–565	–560
3	–601	–604	–590	–584	–582	–578	–564	–564	–559
4	–609	–609	–595	–589	–586	–582	–572	–568	–565
5	–599	–604	–590	–581	–587	–575	–571	–565	–557
6	–608	–604	–595	–590	–581	–576	–571	–561	–561
7	–609	–606	–596	–590	–588	–582	–571	–567	–564
8	–600	–601	–591	–582	–583	–578	–564	–560	–562
9	–613	–616	–601	–597	–591	–586	–574	–573	–572
10	–596	–588	–582	–579	–569	–570	–556	–550	–557
Среднее	–604	–604	–592	–586	–584	–578	–568	–564	–562
ОВП анолита									
1	707	707	694	675	678	663	643	646	640
2	697	700	692	669	670	659	641	643	638
3	702	697	689	672	671	657	639	638	632
4	706	705	695	680	679	669	644	643	638
5	709	707	689	676	676	663	638	642	642
6	703	706	694	670	675	662	635	644	633
7	706	704	699	677	679	665	644	648	643
8	702	701	694	673	668	658	638	639	633
9	711	716	707	688	683	674	648	654	645
10	677	677	697	660	651	660	620	623	626
Среднее	702	702	695	674	673	663	639	642	637

Приложение 9

Опытные значения pH католита и анолита с различными растворами в системе капельного орошения

Номер измерения (повторность	Концентрация раствора								
	0,05 %			0,10 %			0,30 %		
	l = 0,3 м	*l* = 30 м	*l* = 60 м	*l* = 0,3 м	*l* = 30 м	*l* = 60 м	*l* = 0,3 м	*l* = 30 м	*l* = 60 м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Раствор сульфата калия									
pH католита									
1	10,55	10,44	10,52	10,45	10,38	10,36	10,36	10,33	10,22
2	10,44	10,44	10,48	10,37	10,34	10,39	10,26	10,36	10,16
3	10,47	10,44	10,38	10,40	10,35	10,28	10,28	10,32	10,23
4	10,46	10,47	10,47	10,40	10,42	10,45	10,35	10,33	10,32
5	10,52	10,40	10,48	10,39	10,31	10,43	10,38	10,35	10,21
6	10,52	10,41	10,46	10,41	10,42	10,42	10,32	10,37	10,20
7	10,55	10,56	10,53	10,41	10,41	10,38	10,36	10,35	10,26
8	10,42	10,37	10,45	10,33	10,31	10,33	10,25	10,31	10,25
9	10,65	10,67	10,63	10,51	10,54	10,47	10,45	10,48	10,45
10	10,11	10,41	10,10	10,35	10,33	10,08	10,38	10,10	10,19
Среднее	10,47	10,46	10,45	10,4	10,38	10,36	10,34	10,33	10,25
pH анолита									
1	5,82	5,87	5,91	6,89	6,84	6,91	9,30	9,27	9,33
2	5,78	5,84	5,87	6,84	6,80	6,87	9,21	9,27	9,22
3	5,76	5,78	5,85	6,86	6,83	6,87	9,21	9,25	9,21
4	5,82	5,88	5,86	6,87	6,86	6,90	9,24	9,27	9,24
5	5,78	5,79	5,86	6,91	6,87	6,91	9,20	9,33	9,28
6	5,81	5,85	5,90	6,88	6,86	6,91	9,22	9,20	9,22
7	5,84	5,86	5,90	6,90	6,89	6,89	9,25	9,26	9,27
8	5,79	5,79	5,83	6,84	6,81	6,86	9,18	9,20	9,21
9	5,87	5,94	5,95	6,93	6,98	6,96	9,38	9,36	9,44
10	5,74	5,69	5,69	6,59	6,85	6,71	9,22	9,19	9,08
Среднее	5,80	5,83	5,86	6,85	6,86	6,88	9,24	9,26	9,25
Раствор суперфосфата									
pH католита									
1	8,46	8,39	8,43	7,03	6,93	6,94	6,11	6,10	6,12
2	8,37	8,38	8,38	6,96	6,91	6,97	6,05	6,03	6,04
3	8,40	8,40	8,32	6,98	6,91	6,90	6,08	6,03	6,09
4	8,50	8,48	8,37	7,02	6,98	7,02	6,15	6,11	6,11
5	8,36	8,34	8,29	7,07	6,96	6,99	6,12	6,08	6,04
6	8,38	8,43	8,32	6,96	6,90	6,97	6,11	6,11	6,13
7	8,50	8,49	8,43	7,01	6,95	6,98	6,12	6,10	6,09

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	8,36	8,34	8,36	6,97	6,93	6,93	6,06	6,08	6,07
9	8,54	8,51	8,50	7,15	7,03	7,09	6,18	6,19	6,21
10	8,43	8,35	8,32	6,86	7,01	6,73	6,02	5,97	6,01
Среднее	8,43	8,41	8,37	7	6,95	6,95	6,1	6,08	6,09
pH анолита									
1	3,15	3,16	3,24	3,32	3,31	3,34	3,49	3,52	3,56
2	3,13	3,15	3,22	3,30	3,30	3,32	3,45	3,49	3,56
3	3,13	3,16	3,22	3,31	3,30	3,31	3,48	3,46	3,55
4	3,18	3,18	3,24	3,32	3,32	3,35	3,49	3,50	3,58
5	3,18	3,16	3,26	3,32	3,33	3,34	3,50	3,51	3,52
6	3,17	3,15	3,24	3,30	3,29	3,31	3,46	3,50	3,53
7	3,17	3,18	3,25	3,34	3,34	3,33	3,51	3,50	3,56
8	3,15	3,13	3,22	3,30	3,31	3,31	3,46	3,47	3,54
9	3,18	3,20	3,30	3,38	3,36	3,38	3,53	3,54	3,61
10	3,07	3,13	3,12	3,24	3,24	3,30	3,45	3,42	3,50
Среднее	3,15	3,16	3,23	3,31	3,31	3,33	3,48	3,49	3,55
Раствор карбамида (мочевины)									
pH католита									
1	10,34	10,39	10,30	10,34	10,32	10,22	9,98	9,94	9,86
2	10,25	10,31	10,25	10,21	10,26	10,14	9,93	9,92	9,78
3	10,27	10,24	10,23	10,19	10,24	10,13	9,88	9,82	9,87
4	10,41	10,35	10,30	10,29	10,32	10,18	9,99	9,92	9,89
5	10,30	10,42	10,31	10,17	10,26	10,25	9,95	9,81	9,79
6	10,34	10,27	10,25	10,20	10,29	10,15	9,95	9,86	9,89
7	10,38	10,42	10,30	10,28	10,24	10,26	9,94	9,98	9,87
8	10,30	10,29	10,22	10,26	10,22	10,14	9,89	9,89	9,83
9	10,56	10,52	10,43	10,41	10,35	10,33	10,07	10,05	10,01
10	10,26	10,02	10,12	10,18	9,90	10,01	9,62	9,81	9,82
Среднее	10,34	10,32	10,27	10,25	10,24	10,18	9,92	9,9	9,86
pH анолита									
1	3,21	3,23	3,29	3,37	3,37	3,47	3,85	3,88	3,88
2	3,20	3,20	3,30	3,34	3,35	3,43	3,80	3,86	3,87
3	3,18	3,22	3,27	3,36	3,37	3,43	3,80	3,82	3,86
4	3,23	3,24	3,31	3,38	3,41	3,46	3,85	3,85	3,89
5	3,22	3,22	3,26	3,37	3,37	3,46	3,86	3,83	3,84
6	3,18	3,20	3,27	3,35	3,36	3,46	3,82	3,83	3,86
7	3,23	3,23	3,29	3,39	3,39	3,46	3,86	3,88	3,89
8	3,18	3,21	3,29	3,35	3,38	3,44	3,82	3,82	3,86
9	3,25	3,26	3,33	3,43	3,44	3,50	3,90	3,92	3,93
10	3,13	3,19	3,29	3,36	3,36	3,30	3,75	3,83	3,82
Среднее	3,2	3,22	3,29	3,37	3,38	3,44	3,83	3,85	3,87

Приложение 10

Модельные и фактические значения ОВП католита и анолита с различными растворами в системе капельного орошения

Показатель		Концентрация раствора								
		0,05 %			0,10 %			0,30 %		
		$l = 0,3$ м	$l = 30$ м	$l = 60$ м	$l = 0,3$ м	$l = 30$ м	$l = 60$ м	$l = 0,3$ м	$l = 30$ м	$l = 60$ м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Раствор сульфата калия										
ОВП католита										
Модельные значения	ОВП, мВ	–615,00	–614,00	–606,00	–605,00	–604,00	–598,00	–578,00	–577,00	–574,00
	Уровень активационного потенциала, мВ	–850,00	–849,00	–841,00	–840,00	–839,00	–833,00	–813,00	–812,00	–809,00
Оценка опытного среднего	$\overline{ОВПср.}$, мВ	–612,00	–612,00	–604,00	–606,00	–603,00	–596,00	–577,00	–579,00	–574,00
	Дисперсия, S^2	42,00	8,00	22,00	16,00	9,00	6,00	16,00	26,00	13,00
	Стандартное отклонение, S, мВ	6,50	2,80	4,70	4,00	3,00	2,40	4,00	5,10	3,60
	Ошибка средней, мВ	2,10	0,90	1,50	1,30	0,90	0,80	1,30	1,60	1,10
	Доверительный интервал (±), мВ	3,80	1,60	2,70	2,40	1,60	1,50	2,40	2,90	2,00
Оценка разностей	ОВП-$\overline{ОВПср.}$, мВ	3,00	2,00	2,00	–1,00	1,00	2,00	1,00	–2,00	0
	$\frac{ОВП-\overline{ОВПср.}}{ОВПср.} \cdot 100$, %	–0,350	–0,24	–0,24	0,12	–0,12	–0,24	–0,12	0,25	0
ОВП анолита										
Модельные значения	ОВП, мВ	663,00	662,00	652,00	552,00	550,00	539,00	304,00	302,00	289,00
	Уровень активационного потенциала, мВ	428,00	427,00	417,00	317,00	315,00	304,00	69,00	67,00	54,00

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Оценка опытного среднего	$\overline{ОВПср.}$, мВ	661,00	660,00	655,00	553,00	551,00	537,00	304,00	301,00	290,00
	Дисперсия, S^2	76,00	39,00	41,00	43,00	14,00	14,00	9,00	2,00	8,00
	Стандартное отклонение, S, мВ	8,70	6,20	6,40	6,60	3,70	3,70	3,00	1,40	2,80
	Ошибка средней, мВ	2,80	2,00	2,00	2,10	1,20	1,20	0,90	0,40	0,90
	Доверительный интервал (±), мВ	5,10	3,70	3,70	3,80	2,20	2,20	1,60	0,70	1,60
Оценка разностей	ОВП-$\overline{ОВПср.}$, мВ	–2,00	–2,00	3,00	1,00	1,00	–2,00	0	–1,00	1,00
	$\frac{ОВП-\overline{ОВПср.}}{\overline{ОВПср.}} \cdot 100$, %	–0,47	–0,47	0,72	0,32	0,32	–0,66	0	–1,49	1,85
Раствор суперфосфата										
ОВП католита										
Модельные значения	ОВП, мВ	–508,00	–506,00	–494,00	–441,00	–439,00	–425,00	–399,00	–397,00	–381,00
	Уровень активационного потенциала, мВ	–743,00	–741,00	–729,00	–676,00	–674,00	–660,00	–634,00	–632,00	–616,00
Оценка опытного среднего	$\overline{ОВПср.}$, мВ	–506,00	–503,00	–491,00	–440,00	–440,00	–427,00	–401,00	–395,00	–382,00
	Дисперсия, S^2	14,00	38,00	27,00	8,00	9,00	13,00	10,00	14,00	13,00
	Стандартное отклонение, S, мВ	3,70	6,20	5,20	2,80	3,00	3,60	3,20	3,70	3,60
	Ошибка средней, мВ	1,20	2,00	1,60	0,90	0,90	1,10	1,00	1,20	1,10
	Доверительный интервал (±), мВ	2,20	3,70	2,90	1,60	1,60	2,00	1,80	2,20	2,00
Оценка разностей	ОВП-$\overline{ОВПср.}$, мВ	2,00	3,00	3,00	1,00	–1,00	–2,00	–2,00	2,00	–1,00
	$\frac{ОВП-\overline{ОВПср.}}{\overline{ОВПср.}} \cdot 100$, %	–0,27	–0,40	–0,41	–0,15	0,15	0,30	0,32	–0,32	0,16

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
ОВП анолита										
Модельные значения	ОВП, мВ	810,00	809,00	799,00	762,00	761,00	755,00	692,00	691,00	687,00
	Уровень активационного потенциала, мВ	575,00	574,00	564,00	527,00	526,00	520,00	457,00	456,00	452,00
Оценка опытного среднего	$\overline{ОВПср.}$, мВ	811,00	811,00	801,00	758,00	763,00	751,00	695,00	694,00	688,00
	Дисперсия, S^2	69,00	24,00	53,00	32,00	74,00	72,00	41,00	26,00	31,00
	Стандартное отклонение, S, мВ	8,30	4,90	7,30	5,70	8,60	8,50	6,40	5,10	5,60
	Ошибка средней, мВ	2,60	1,50	2,30	1,80	2,70	2,70	2,00	1,60	1,80
	Доверительный интервал (±), мВ	4,80	2,70	4,20	3,30	4,90	4,90	3,70	2,90	3,30
Оценка разностей	ОВП-$\overline{ОВПср.}$, мВ	1,00	2,00	2,00	–4,00	2,00	–4,00	3,00	3,00	1,00
	$\frac{ОВП-\overline{ОВПср.}}{\overline{ОВПср.}} \cdot 100$, %	0,17	0,35	0,35	–0,76	0,38	–0,77	0,66	0,66	0,22
Раствор карбамида (мочевины)										
ОВП католита										
Модельные значения	ОВП, мВ	–603,00	–602,00	–594,00	–585,00	–584,00	–578,00	–566,00	–565,00	–561,00
	Уровень активационного потенциала, мВ	–838,00	–837,00	–829,00	–820,00	–819,00	–813,00	–801,00	–800,00	–796,00
Оценка опытного среднего	$\overline{ОВПср.}$, мВ	–604,00	–604,00	–592,00	–586,00	–584,00	–578,00	–568,00	–564,00	–562,00
	Дисперсия, S^2	31,00	51,00	26,00	30,00	38,00	20,00	30,00	38,00	20,00
	Стандартное отклонение, S, мВ	5,60	7,10	5,10	5,50	6,20	4,50	5,50	6,20	4,50
	Ошибка средней, мВ	1,80	2,20	1,60	1,70	2,00	1,40	1,70	2,00	1,40
	Доверительный интервал (±), мВ	3,30	4,00	2,90	3,10	3,70	2,60	3,10	3,70	2,60

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Оценка разностей	ОВП-$\overline{ОВПср.}$, мВ	–1,00	–2,00	2,00	–1,00	0	0	–2,00	1,00	–1,00
	$\frac{ОВП-\overline{ОВПср.}}{ОВПср.} \cdot 100$, %	0,12	0,24	–0,24	0,12	0	0	0,25	–0,13	0,13
ОВП анолита										
Модельные значения	ОВП, мВ	705,00	704,00	695,00	673,00	672,00	665,00	641,00	640,00	635,00
	Уровень активационного потенциала, мВ	470,00	469,00	460,00	438,00	437,00	430,00	406,00	405,00	400,00
Оценка опытного среднего	$\overline{ОВПср.}$, мВ	702,00	702,00	695,00	674,00	673,00	663,00	639,00	642,00	637,00
	Дисперсия, S^2	93,00	103,00	28,00	54,00	81,00	28,00	59,00	65,00	35,00
	Стандартное отклонение, S, мВ	9,60	10,10	5,30	7,30	9,00	5,30	7,70	8,10	5,90
	Ошибка средней, мВ	3,00	3,20	1,70	2,30	2,80	1,70	2,40	2,60	1,90
	Доверительный интервал (±), мВ	5,50	5,90	3,10	4,20	5,10	3,10	4,40	4,80	3,50
Оценка разностей	ОВП-$\overline{ОВПср.}$, мВ	–3,00	–2,00	0	1,00	1,00	–2,00	–2,00	2,00	2,00
	$\frac{ОВП-\overline{ОВПср.}}{ОВПср.} \cdot 100$, %	–0,64	–0,43	0	0,23	0,23	–0,47	–0,49	0,49	0,50

Приложение 11

Модельные и фактические значения pH католита и анолита с раствором сульфата калия в системе капельного орошения

Показатель		Концентрация раствора								
		0,05 %			0,10 %			0,30 %		
		$l = 0,3$ м	$l = 30$ м	$l = 60$ м	$l = 0,3$ м	$l = 30$ м	$l = 60$ м	$l = 0,3$ м	$l = 30$ м	$l = 60$ м
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Раствор сульфата калия										
pH католита										
Модельные значения	pH	10,4700	10,4700	10,4300	10,4000	10,4000	10,3600	10,3200	10,3200	10,2800
Оценка опытного среднего	$\overline{pHср.}$	10,4700	10,4600	10,4500	10,4000	10,3800	10,3600	10,3400	10,3300	10,2500
	Дисперсия, S^2	0,0204	0,0083	0,0195	0,0026	0,0048	0,0127	0,0039	0,0088	0,0065
	Стандартное отклонение, S	0,1400	0,0900	0,1400	0,0500	0,0700	0,1100	0,0600	0,0900	0,0800
	Ошибка средней	0,0450	0,0290	0,0440	0,0160	0,0220	0,0360	0,0200	0,0300	0,0260
	Доверительный интервал (±)	0,0800	0,0500	0,0800	0,0300	0,0400	0,0700	0,0400	0,0500	0,0500
Оценка разностей	$pH-\overline{pHср.}$	0	–0,0100	0,0200	0	–0,0200	0	0,0200	0,0100	–0,0300
	$\frac{pH-\overline{pHср.}}{\overline{pHср.}} \cdot 100$, %	0	–0,3300	0,6700	0	–0,6700	0	0,6900	0,3500	–1,0500
pH анолита										
Модельные значения	pH	5,8300	5,8300	5,8700	6,8400	6,8400	6,8700	9,2400	9,2400	9,2600

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Оценка опытного среднего	$\overline{pHср.}$	5,8000	5,8300	5,8600	6,8500	6,8600	6,8800	9,2400	9,2600	9,2500
	Дисперсия, S^2	0,0014	0,0049	0,0047	0,0096	0,0025	0,0043	0,0035	0,0030	0,0085
	Стандартное отклонение, S	0,0400	0,0700	0,0700	0,1000	0,0500	0,0700	0,0600	0,0500	0,0900
	Ошибка средней	0,0120	0,0220	0,0220	0,0310	0,0160	0,0210	0,0190	0,0170	0,0290
	Доверительный интервал (±), мВ	0,0200	0,0400	0,0400	0,0600	0,0300	0,0400	0,0300	0,0300	0,0500
Оценка разностей	$pH-\overline{pHср.}$	–0,0300	0	–0,0100	0,0100	0,0200	0,0100	0	0,0200	–0,0100
	$\frac{pH-\overline{pHср.}}{pHср.} \cdot 100$, %	1,8800	0	0,6400	–1,6900	–3,3900	–1,7900	0	1,1000	–0,5500
Раствор суперфосфата										
pH католита										
Модельные значения	pH	8,4200	8,4200	8,3800	6,9800	6,9800	6,9500	6,0900	6,0900	6,0700
Оценка опытного среднего	$\overline{pHср.}$	8,4300	8,4100	8,3700	7,0000	6,9500	6,9500	6,1000	6,0800	6,0900
	Дисперсия, S^2	0,0045	0,0039	0,0041	0,0057	0,0018	0,0089	0,0023	0,0033	0,0033
	Стандартное отклонение, S	0,0700	0,0600	0,0600	0,0800	0,0400	0,0900	0,0500	0,0600	0,0600
	Ошибка средней	0,0210	0,0200	0,0200	0,0240	0,0130	0,0300	0,0150	0,0180	0,0180
	Доверительный интервал (±)	0,0400	0,0400	0,0400	0,0400	0,0200	0,0500	0,0300	0,0300	0,0300
Оценка разностей	$pH-\overline{pHср.}$	0,0100	–0,0100	–0,0100	0,0200	–0,0300	0	0,0100	–0,0100	0,0200
	$\frac{pH-\overline{pHср.}}{pHср.} \cdot 100$, %	1,0100	–1,0100	–1,0500	–4,4400	6,6700	0	–0,7500	0,7500	–1,4700

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
pH анолита										
Модельные значения	pH	3,1600	3,1700	3,2200	3,3100	3,3200	3,3500	3,4900	3,4900	3,5300
Оценка опытного среднего	$\overline{pHср.}$	3,1500	3,1600	3,2300	3,3100	3,3100	3,3300	3,4800	3,4900	3,5500
	Дисперсия, S^2	0,0011	0,0005	0,0019	0,0012	0,0010	0,0007	0,0006	0,0011	0,0010
	Стандартное отклонение, S	0,0300	0,0200	0,0400	0,0300	0,0300	0,0300	0,0200	0,0300	0,0300
	Ошибка средней	0,0110	0,0070	0,0140	0,0110	0,0100	0,0080	0,0080	0,0110	0,0100
	Доверительный интервал (±)	0,0200	0,0100	0,0300	0,0200	0,0200	0,0200	0,0100	0,0200	0,0200
Оценка разностей	$pH-\overline{pHср.}$	–0,0100	–0,0100	0,0100	0	–0,0100	–0,0200	–0,0100	0	0,0200
	$\frac{pH-\overline{pHср.}}{pHср.} \cdot 100$, %	0,2300	0,2300	–0,2400	0	0,2400	0,4900	0,2500	0	–0,5100
Раствор карбамида (мочевины)										
pH католита										
Модельные значения	pH	10,3200	10,3100	10,2800	10,2300	10,2300	10,1900	9,9200	9,9200	9,8900
Оценка опытного среднего	$\overline{pHср.}$	10,3400	10,3200	10,2700	10,2500	10,2400	10,1800	9,9200	9,9000	9,8600
	Дисперсия, S^2	0,0085	0,0186	0,0064	0,0061	0,0158	0,0076	0,0139	0,0061	0,0043
	Стандартное отклонение, S	0,0900	0,1400	0,0800	0,0800	0,1300	0,0900	0,1200	0,0800	0,0700
	Ошибка средней	0,0290	0,0430	0,0250	0,0250	0,0400	0,0280	0,0370	0,0250	0,0210

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Оценка опытного среднего	Доверительный интервал (±)	0,0500	0,0800	0,0500	0,0500	0,0700	0,0500	0,0700	0,0500	0,0400
Оценка разностей	$pH-\overline{pHср.}$	0,0200	0,0100	–0,0100	0,0200	0,0100	–0,0100	0	–0,0200	–0,0300
	$\frac{pH-\overline{pHср.}}{pHср.} \cdot 100$, %	0,6900	0,3500	–0,3500	0,7100	0,3600	–0,3600	0	–0,8000	–1,2200
pH анолита										
Модельные значения	pH	3,2200	3,2300	3,2800	3,3800	3,3900	3,4200	3,8400	3,8400	3,8800
Оценка опытного среднего	$\overline{pHср.}$	3,2000	3,2200	3,2900	3,3700	3,380	3,4400	3,8300	3,8500	3,8700
	Дисперсия, S^2	0,0011	0,0004	0,0004	0,0007	0,0007	0,0029	0,0017	0,0011	0,0009
	Стандартное отклонение, S	0,0300	0,0200	0,0200	0,0300	0,0300	0,0500	0,0400	0,0300	0,0300
	Ошибка средней, мВ	0,0110	0,0060	0,0060	0,0080	0,0080	0,0170	0,0130	0,0110	0,0100
	Доверительный интервал (±)	0,0200	0,0100	0,0100	0,0200	0,0200	0,0300	0,0200	0,0200	0,0200
Оценка разностей	$pH-\overline{pHср.}$	–0,0200	–0,0100	0,0100	–0,0100	–0,0100	0,0200	–0,0100	0,0100	–0,0100
	$\frac{pH-\overline{pHср.}}{pHср.} \cdot 100$, %	0,4800	0,2400	–0,2400	0,2500	0,2500	–0,5000	0,2800	–0,2800	0,2800

Приложение 12

Урожайные данные по вариантам опыта

Повторность	Урожайность, т/га	
	вариант производства без "ЭХАВ" (контроль)	вариант производства с "ЭХАВ"
1	119,5	147,2
2	125,4	144,4
3	120,1	167,2
4	129,8	164,4
Среднее	123,7	155,8

Результаты дисперсионного анализа урожайных данных

Дисперсия	Сумма квадратов	Степень свободы	Средний квадрат	$F_{факт.}$	$F_{теор.}$	Ошибка средней, Sd	$НСР_{05}$
Сумма	2539,4	7,0					
Вариантов	2060,8	1,0	2060,8	25,8	5,9	6,3	12,2
Ошибка	478,5	6,0	79,8				

Заключение. Статистическая обработка урожайных данных методом дисперсионного анализа подтвердила существенность действия фактора на продуктивность томатов. Прибавка средних по повторениям урожайных данных, 31,5 т/га, больше наименьшей существенной разности на 5-% ном уровне значимости, 12,2 т/га (вероятность достоверности опровержения нулевой гипотезы 95 %).

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение……... 3
1. Проблемы и перспективы развития технологий применения электрохимически активированных водных сред в сельском хозяйстве…..... 6
1.1. Народно-хозяйственное значение и область применения феномена электрохимической активации…….…….. 6
1.2. Проблемы применения электрохимически активированных водных сред в сельском хозяйстве…….. 10
1.3. Анализ тенденций развития систем капельного орошения и опыт их использования для полива электрохимически активированной водой ……. 15
2. Конструкции систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды……..... 22
2.1. Конструктивные особенности систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды……... 22
2.2. Перспективные технические решения конструкций модуля..... 29
3. Теоретическое обоснование алгоритма проектирования систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды……..... 43
3.1. Алгоритм расчета систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды…… 43
3.2. Модель состояния электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений в системе капельного орошения…… 53
3.3. Особенности построения гидравлической модели системы капельного орошения для проведения расчетов в рамках предложенного алгоритма……..…….. 69
4. Экспериментальная идентификация параметров модели релаксации электрохимически активированных водных сред в системе капельного орошения……... 73
4.1. Постановочные вопросы и программа экспериментальных исследований……..…… 73
4.2. Лабораторное оборудование и методики исследований……. 77
4.3. Закономерности релаксации электрохимически активированной воды в открытых системах …… 81
4.4. Закономерности релаксации электрохимически активированной воды в закрытых системах……. 87
4.5. Закономерности релаксации поликомпонентных водных сред в закрытых системах……..... 94

4.6. Обобщенная модель релаксации электрохимически активированной воды и водных растворов минеральных удобрений…….. 102
4.7. Оценка соответствий модельных и реальных параметров состояния электрохимически активированной воды в системе капельного орошения……..... 112
5. Производственное проектирование и апробация системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды……... 119
5.1. Расчет конструктивных параметров поливных модулей системы капельного орошения с поливом электрохимически активированной водой……..... 119
5.2. Результаты производственного проектирования и апробации системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды…….. 132
5.2.1. Производственный расчет системы капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды для полива томатов в легких пленочных теплицах……... 132
5.2.2. Результаты оценки экономической эффективности и инвестиционной привлекательности применения систем капельного орошения с модулем электрохимической активации оросительной воды (на примере томатов) …… 137
Заключение……... 145
Литература……. 149
Приложение……..... 160

С. Я. Семененко, М. Н. Лытов, А. Н. Чушкин,
С. С. Марченко, Е. И. Чушкина

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ КАПЕЛЬНОГО ОРОШЕНИЯ
С МОДУЛЕМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ ВОДЫ

В авторской редакции

Ответственный за выпуск **С. А. Корпушов**
Компьютерная верстка **В. Г. Гирявенко**

Подписано в печать 09.04.18.
Объем 13,0 уч.-изд. л. Формат 60x84/16.
Тираж 500 (первый завод 50). Заказ 2.

400062, Волгоград, Университетский проспект, 97.
Копировально-множительное бюро ФНЦ агроэкологии РАН.