

16+

Энергоэффективность как индикатор научно-технического и экономического потенциала общества

МОНОГРАФИЯ

Аубакирова Ф.Х., Буклешев Д.О., Велькин В. И., Воржев В.Б., Денисов К.С., Драбенко В.А., Драбенко В.А.,
Драбенко Д.В., Ершов В.В., Руденко Н.В.

**НАУЧНАЯ ОБЩЕСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ
ПРОФЕССИОНАЛЬНАЯ НАУКА**

**Энергоэффективность как индикатор научно-
технического и экономического потенциала
общества**

Монография

www.scipro.ru
Нижний Новгород, 2018

УДК 693.547: 624.131

ББК 31.19

Э65

Рецензенты:

Сагитов Рамиль Фаргатович — кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе в ООО «Научно-исследовательский и проектный институт экологических проблем»

Авторы:

Аубакирова Ф.Х., Буклешев Д.О., Велькин В. И., Воржев В.Б., Денисов К.С., Драбенко В.А., Драбенко В.А., Драбенко Д.В., Ершов В.В., Руденко Н.В.

Энергоэффективность как индикатор научно-технического и экономического потенциала общества [Электронный ресурс]: монография. – Эл. изд. – Электрон. текстовые дан. (1 файл pdf: 133 с.). - Нижний Новгород: НОО "Профессиональная наука", 2018. – Режим доступа: <http://scipro.ru/conf/monographenergetics.pdf>. Сист. требования: Adobe Reader; экран 10".

ISBN 978-5-907072-10-7

Монография посвящена исследованиям в области энерго- и ресурсосбережения, развития энергосбережения и повышения энергоэффективности, являющимися важнейшими факторами, обеспечивающими эффективность функционирования отраслей топливно-энергетического комплекса и экономики в целом.

Материалы монографии будут полезны преподавателям, научным работникам, специалистам предприятий и учреждений, а также студентам, магистрантам и аспирантам.

При верстке электронной книги использованы материалы с ресурсов: Designed by Freepik

© Авторский коллектив, 2018 г.

ISBN 978-5-907072-10-7



9 785907 072107

© Издательство НОО Профессиональная наука, 2018 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ.....	8
ГЛАВА 2. ПРОГРАММНОЕ И АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ.....	22
ГЛАВА 3. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В АГРОПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ	38
ГЛАВА 4. МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОСАДКИ ВОЗДУШНОГО СУДНА В РАЗЛИЧНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ	59
ГЛАВА 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И МЕТАЛЛО-ФРАКТОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ И РОСТА КОРРОЗИОННЫХ ТРЕЩИН ПОД НАПРЯЖЕНИЕМ В СВАРНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ.....	76
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	118
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	119
СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ.....	130

Введение

Приоритетными задачами государственной политики являются надежное обеспечение страны топливно-энергетическими ресурсами, повышение эффективности их использования и снижение антропогенного воздействия топливно-энергетического комплекса на окружающую среду. Энерго- и ресурсосбережение в рамках реализации задачи по развитию энергосбережения и повышению энергоэффективности являются важнейшими факторами, обеспечивающими эффективность функционирования отраслей топливно-энергетического комплекса и экономики в целом.

В рамках реализации задачи по содействию инновационному развитию топливно-энергетического комплекса поддержка разработки и внедрения конкурентоспособной техники и технологий, обновления, модернизации и ввода новых мощностей в топливно-энергетическом комплексе рассматривается Министерством энергетики Российской Федерации в качестве одной из важнейших задач, ключевыми направлениями решения которой служат усиление инвестиционной активности в части инноваций и применения наилучших доступных технологий.

Первоочередное внимание при реализации инновационной политики уделяется созданию и внедрению энергоэффективных технологий, в том числе наилучших доступных, направленных на решение первоочередных проблем ускоренного развития топливно-энергетического комплекса и учитывающих приоритетные направления развития науки, технологий и техники в Российской Федерации.

Данная монография состоит из 5-ти глав.

В первой главе «Энергосбережение в строительстве» автор поднимает вопросы энергоемкости в строительной сфере. Автор отмечает, что одним из необходимых условий достижения приемлемого для развитых стран уровня энергоемкости экономики является развитие энергоэффективного строительства, рационализация потребления энергии в существующем и строящемся фонде зданий. Применение инновационных энергоэффективных технологий и энергосберегающего оборудования в строительстве позволит повысить уровень жизни граждан, приведет к экологической стабильности окружающей среды.

Во второй главе «Программное и алгоритмическое обеспечение энергоэффективных систем» авторы акцентировали внимание на развитии

математического моделирования и совершенствование программного обеспечения для расчета комплексных энергетических систем на основе возобновляемых источников энергии. Авторы отмечают, что проблема энергообеспечения касается электроснабжения объектов, находящихся в отдаленных районах, для которых установить связь с существующей энергосетью посредством линий электропередач не представляется возможным или же нерентабельно. Автономное энергоснабжение является востребованным в различных секторах экономики и географических регионах России, но требует реализации новых решений, направленных на повышение топливной и экологической эффективности при производстве электроэнергии и тепла. Одним из способов решения указанных проблем, отмечают авторы, является использование комбинированных энергетических установок, позволяющих объединить преимущества агрегатов, работающих на углеводородном топливе, электронакопительных устройств, а также возобновляемых источников энергии.

Третья глава «Перспективные направления использования возобновляемых источников энергии в агропромышленном комплексе» посвящена исследованиям нетрадиционных возобновляемых источников энергии для электроснабжения производственных объектов крестьянских фермерских хозяйств, где использование электроэнергии от централизованной энергосистемы затруднено или невозможно. Авторы показали, что для обеспечения требуемой надёжности и бесперебойности электроснабжения такие системы электроснабжения целесообразно проектировать на базе гибридных солнечно-ветро-дизельных энергетических установках. Авторами был предложен адаптивный алгоритм управления режимами работы с учетом обеспечения баланса мощностей между источниками и приемниками при текущих погодных условиях. Рассмотрен вариант построения указанных установок, реализующих предложенный алгоритм. Выбраны характеристики и проведен сравнительный анализ ветроэнергетических установок с горизонтально и с вертикально расположенной осью вращения. Доказано, что для обеспечения технологического цикла производства сельхозпродукции на малых фермерских хозяйствах целесообразно применение вертикально-осевых ветроэнергетических установок. Показано, что для мобильных систем автономного электроснабжения объектов фермерского хозяйства в условиях удаления от стационарных государственных систем электроснабжения целесообразно использование перспективные вертикально-осевых ветрогенераторов Maglev и ветровой турбины Болотова. Предложена конструкция вихревой ветроэнергетической установки с улучшенными технико-

экономическими характеристиками для электроснабжения объектов агро-промышленного комплекса.

В четвертой главе «Методический подход к построению динамической модели посадки воздушного судна в различных метеорологических условиях» авторы отмечают, что в настоящее время задача повышения качества метеорологического обеспечения при управлении метеозависимыми авиационными военными формированиями является одной из основных задач прикладной метеорологии. Одним из путей разрешения вышеуказанной проблемы является построение динамической системы «летчик – воздушное судно (ВС) – окружающая среда» с целью моделирования процесса посадки ВС в различных метеорологических условиях и получения численных значений риска, возникающего при этом.

Пятая глава "Экспериментальное и металло-фрактографическое исследование образования и роста коррозионных трещин под напряжением в сварных элементах магистральных трубопроводов" посвящена проблемам коррозионного растрескивания под напряжением (КРН), которое является разновидностью коррозионной повреждаемости металлов, развивающейся под воздействием определенной коррозионно-активной среды и статических или низкочастотных циклических напряжений растяжения (приложенных или остаточных) путем образования трещин без выраженных признаков сопутствующей разрушению пластической деформации и наличия продуктов коррозии.

Авторский коллектив:

Аубакирова Ф.Х. (Глава 1. Энергосбережение в строительстве)

Денисов К.С., Велькин В.И. (Глава 2. Программное и алгоритмическое обеспечение энергоэффективных систем)

Руденко Н.В., Ершов В.В., Воржев В.Б. (Глава 3. Перспективные направления использования возобновляемых источников энергии в агропромышленном комплексе)

Драбенко В.А., Драбенко В.А., Драбенко Д.В. (Глава 4. Методический подход к построению динамической модели посадки воздушного судна в различных метеорологических условиях)

Буклешев Д.О. (Глава 5. Экспериментальное и металло-фрактографическое исследование образования и роста коррозионных трещин под напряжением в сварных элементах магистральных трубопроводов)

Глава 1. Энергосбережение в строительстве

В настоящее время энергосбережение и энергоэффективность относятся к приоритетным направлениям развития строительной индустрии. Сейчас застройщиков интересует не только стоимость квадратных метров строящейся недвижимости, но и стоимость эксплуатационных расходов в течение всего жизненного цикла здания. Следует также отметить, что уровень энергопотребления зданий имеет и экологический аспект: уменьшение потребления тепловой энергии зданиями влечёт сохранение природных ресурсов и уменьшение загрязнения окружающей среды в результате сжигания топлива. Также актуальность энергосбережения в строительной отрасли связана с постоянно возрастающей стоимостью энергетических ресурсов и необходимостью целесообразно использовать невозобновляемые источники энергии. В связи с этим при проектировании новых зданий, а также при реконструкции или капитальном ремонте существующих зданий вопросу повышения их энергоэффективности уделяется большое внимание.

Разработке энергетической концепции проектирования зданий посвящено большое количество теоретических работ и экспериментальных исследований. Различные способы энергосбережения зданий изучали Аверьянов В.К., Береговой А.М., Богословский В.Н, Богуславский Л.Д., Бутовский И.Н., Васильев Г.П., Гагарин В.Г., Подолян Л.А., Табунщиков Ю.А., Шаврин В.И., Шкаровский А.Л. и другие.

Согласно [78], показателем энергетической эффективности здания является удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию, которая численно равна расходу тепловой энергии на отопление и вентиляцию на 1 м³ отапливаемого объема здания в единицу времени при перепаде температуры в 1°C. Здание отвечает требованию энергосбережения при выполнении следующего условия:

$$q_{от} \leq q_{от}^{тр} \quad (1)$$

где $q_{от}$ – расчетная (фактическая) удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, Вт/(м³ °C);

$q_{от}^{тр}$ – нормируемая (базовая) удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания, Вт/(м³°C), определяемая по [78] для различных типов жилых и общественных зданий.

Расчетный удельный расход тепловой энергии на отопление здания $q_{от}$, кДж/(м³·°C·сут), определяется по формуле

$$q_{om} = \frac{10^3 \cdot Q_h^y}{V_h \cdot ГСОП} \quad (2)$$

V_h - отапливаемый объем здания;

$ГСОП$ – значение градусо-суток отопительного периода для района постройки;

Q_h^y - потребность в полезной тепловой энергии на отопление здания в течение отопительного периода, МДж, которая, в свою очередь, вычисляется по формуле

$$Q_h^y = [Q_h - (Q_{int} + Q_s) \cdot \nu \cdot \xi] \cdot \beta_h \quad (3)$$

где Q_h - общие теплотери здания через наружные ограждающие конструкции;

Q_{int} - бытовые теплопоступления в течение отопительного периода;

Q_s - теплопоступления через окна и фонари от солнечной радиации в течение отопительного периода;

ν - коэффициент снижения теплопоступлений за счет тепловой инерции ограждающих конструкций;

ξ - коэффициент эффективности авторегулирования подачи теплоты в системах отопления;

β_h - коэффициент, учитывающий дополнительное теплотребление системы отопления.

Таким образом, класс энергосбережения жилых и общественных зданий определяется по относительному отклонению расчетной (фактической) удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания от нормируемого (базового) значения.

Необходимо отметить, что требования к энергосбережению всех типов зданий поэтапно увеличиваются. Проектирование и строительство зданий с низким потреблением энергии может быть достигнуто посредством проведения следующих мероприятий:

- совершенствование архитектурно-планировочных решений;
- применение наружных ограждающих конструкций с необходимым уровнем теплозащиты;
- внедрение эффективных инженерных систем для обеспечения микроклимата в помещениях;
- применение возобновляемых источников энергии;
- повышение качества проектирования зданий.

Рассмотрим перечисленные мероприятия подробнее.

1.1. Архитектурно-планировочные решения зданий, направленные на энергосбережение

Объемно-планировочные решения зданий (выбор оптимальной формы здания, его ориентация по сторонам света, расположение и назначение площадей) имеют существенное влияние на его энергопотребление. Путем оптимального учета в тепловом балансе здания тепло-энергетического воздействия солнечной радиации и ветра на различно ориентированные поверхности [99] появляется возможность определиться с ориентацией и габаритами наиболее энергоэффективного здания, т.е. здания с минимальными теплопотерями в холодный период года и минимальными теплопоступлениями в теплый период года. В общем случае, оптимальным образом учесть воздействие термодинамических параметров наружного климата в тепловом балансе здания можно для любого характерного периода времени. При этом важно иметь в виду, что изменение формы, размеров и ориентации здания с целью оптимального учета влияния наружного климата в его тепловом балансе не требует изменения площадей или объема здания, т.е. они остаются фиксированными. Оптимальная форма здания характеризуется коэффициентом компактности, который вычисляется по формуле:

$$k_{\text{комп}} = \frac{A_n^{\text{сум}}}{V_h} \quad (4)$$

где $A_n^{\text{сум}}$ - сумма площадей всех наружных ограждающих конструкций отапливаемой части здания, м²;

V_h - отапливаемый объем здания, равный объему, ограниченному внутренними поверхностями наружных ограждающих конструкций здания, м³.

Расчетный показатель компактности для жилых и административных зданий, как правило, не должен превышать нормируемых значений, приведенных в нормативных документах [79].

Согласно формулы (4), для здания с меньшим строительным объемом отношение площади наружных ограждений к строительному объему окажется больше по сравнению со зданием с большим строительным объемом. Т.е. малоэтажные здания получаются менее компактными и поэтому их удельные затраты тепловой энергии на отопление (отнесенные к 1 м² площади или 1 м³ строительного объема) в течение отопительного периода оказываются выше по сравнению с многоквартирными жилыми домами, расположенными в том же климатическом районе.

Также следует отметить, что из-за более развитой поверхности малоэтажных домов и их меньшей компактности, удельные потери тепловой энергии в них оказываются выше удельных потерь тепловой энергии многоквартирных домов, даже при одинаковом уровне теплоизоляции наружных ограждающих конструкций (стен, окон, покрытий и т.д.), одном и том же перечне применяемых строительных материалов в составе ограждающих конструкций, одинаковом конструктивном решении наружных ограждающих конструкций. По этой причине, для малоэтажных зданий конструктивные решения должны предусматривать более высокий уровень теплоизоляции наружных ограждающих конструкций по сравнению с высотными многоквартирными зданиями.

Другим способом уменьшения удельных затрат тепловой энергии здания является создание его архитектурного облика с минимальным числом выступающих частей. Все выступающие части здания (эркеры, ниши, ризалиты, пилястры, сандрики и др.) увеличивают отношение площади поверхности наружных ограждающих конструкций к строительному объему здания и тем самым увеличивают расход тепловой энергии на отопление в течение отопительного периода. Например, при сравнении двух зданий, равных по площади и строительному объему, но различных по конфигурации в плане: у здания простой формы (например, квадратного) теплоотдача оказывается меньше [39].

Основные архитектурно-планировочные и объемно-пространственные решения здания, направленные на энергосбережение, можно сформулировать следующим образом:

- выбор оптимальной формы здания, характеризующейся пониженным коэффициентом компактности и обеспечивающей минимальные теплопотери в зимний период и минимальные теплопоступления в летний период года;
- выбор оптимальной ориентации зданий по сторонам света с учетом господствующего направления ветра в зимний период с целью нейтрализации отрицательного воздействия климата на здание и его тепловой баланс;
- сокращение площади наружных ограждающих конструкций путем уменьшения периметра наружных стен за счет отказа от изрезанности фасадов, выступов и других «архитектурных проемов»;
- максимальное остекление южных фасадов и минимальное остекление северных фасадов зданий;
- применение светопрозрачных наружных ограждающих конструкций с повышенными теплозащитными характеристиками;

- максимальное использование естественного освещения помещений для снижения затрат электрической энергии;
- эффективное использование площади и объема здания, четкая функциональная связь помещений без излишних коридоров, холлов и темных помещений.

1.2. Конструктивные решения зданий, направленные на энергосбережение

Одним из путей снижения энергопотребления зданиями является улучшение их теплозащиты, т.е. обеспечение необходимого уровня теплозащиты наружных ограждающих конструкций здания. Потери тепловой энергии через наружные ограждающие конструкции здания, которые еще называют трансмиссионными потерями тепловой энергии, являются наиболее значительными в структуре затрат тепловой энергии на отопление здания. При достижении необходимого уровня теплоизоляции оболочки здания возможно уменьшение материальных затрат на его отопление до 40-50% [92].

Существует два направления для снижения теплопотерь ограждающими конструкциями: проектирование и строительство новых энергоэффективных зданий, которые отвечают требованиям современных строительных норм и реконструкция уже существующих зданий для того, чтобы их параметры также отвечали новым более повышенным нормам тепловой защиты. Стоит отметить, что существующий жилой фонд крупнопанельных многоэтажных домов, построенных ещё в советское время, содержит существенный потенциал энергосбережения, так как уровень тепловой защиты таких домов значительно ниже современных требований и теплотехнические характеристики ограждающих конструкций (наружных стен, окон, дверей, перекрытий, кровельных покрытий) не удовлетворяют действующим требованиям строительной теплотехники. В настоящее время на постсоветском пространстве лишь малая доля жилых домов соответствует принятым нормам тепловой защиты зданий, а существенная часть жилого фонда требует обновления и модернизации.

Применение энергоэффективных утеплителей и материалов в составе наружных стен, перекрытий и покрытий является одним из способов увеличения энергетической эффективности ограждающих конструкций жилых, производственных и общественных зданий. Виды утепления зданий различаются конструктивными решениями, а также используемыми материалами в конструкциях.

Целесообразным и эффективным способом увеличения тепловой защиты построенных и эксплуатируемых зданий является дополнительное наружное утепление ограждающих конструкций. При проведении реконструкции существующих или проектировании новых зданий используют тепловую изоляцию из энергоэффективных материалов, при этом располагают ее с наружной стороны ограждающих конструкций. Чаще всего применяют: теплоизоляционные плиты из минеральной ваты и плиты, изготовленные из базальтовых горных пород, блоки из пеностекла, ограждения с применением экструдированного пенополиэтилена в качестве утеплителя и другие.

Следует отметить, что часто при возведении зданий должного внимания утеплению ограждающих конструкций не уделяется. Вот некоторые причины этого: не всегда используются энергоэффективные строительные материалы; иногда нарушается технология укладки материалов; быстрые темпы возведения зданий; увеличивающиеся объемы сдачи зданий в эксплуатацию; сокращение сроков строительства. Надо иметь в виду, что на практике оценку тепловых потерь можно будет произвести только после годового цикла эксплуатации здания при полном его теплотехническом обследовании. На повышение тепловой защиты старых зданий требуются единовременные вложения материальных средств, которые составляют 5-10% от стоимости дома, но экономический эффект от реализации таких мероприятий может достигать, как ранее было сказано, до 50% экономии на отоплении. При этом срок окупаемости затрат на повышения тепловой защиты старых зданий составляет 5-10 лет [92].

Каждая страна разрабатывает и устанавливает нормативные требования к характеристикам теплоизоляции наружных конструкций с учетом климатических особенностей. В результате ужесточения требований к тепловой защите зданий и сооружений стали широко применяться различные многослойные конструктивные решения ограждающих конструкций. По причине использования энергоэффективных утеплителей достигаются высокие значения сопротивления теплопередаче таких конструкций без их утолщения. В настоящее время при строительстве жилых и общественных зданий применяются разные теплоизоляционные материалы, энергоэффективные светопрозрачные конструкции и фасадные системы, а также современные технологии возведения монолитных зданий с несъемной опалубкой.

Основным показателем, характеризующим уровень тепловой защиты ограждающих конструкций, является сопротивление теплопередаче, R_0 , которое должно соответствовать требуемым значениям. Нормируемое

сопротивление теплопередаче R_0^{TP} определяется по [78] в зависимости от типа ограждающих конструкций, климатического района и назначения здания:

$$R_0^{TP} = a \cdot ГСОП + b \quad (5)$$

$ГСОП$ – значение градусо-суток отопительного периода для района постройки;

a, b – коэффициенты, значения которых принимаются по данным [78] для соответствующих групп зданий.

В соответствии с нормативным документом, приведенное сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций R_0 должно быть не ниже требуемого значения R_0^{TP} :

$$R_0 \geq R_0^{TP} \quad (6)$$

Приведенное сопротивление теплопередаче ограждающей конструкции может быть определено по формуле:

$$R_0 = \frac{1}{\alpha_B} + R_1 + R_2 + R_n + \frac{1}{\alpha_H} \quad (7)$$

$R_1, R_2, \dots, R_n = \frac{\delta_n}{\lambda_n}$ – термические сопротивления отдельных слоев ограждающей конструкции;

δ_n – толщина материального слоя ограждения, м;

λ_n – коэффициент теплопроводности материального слоя, Вт/м²·°С;

α_B, α_H – коэффициенты теплоотдачи внутренней и наружной поверхности ограждения соответственно, расчётные величины α_B, α_H приведены в нормативных документах [78].

1.3. Инженерное оборудование зданий, направленное на энергосбережение

Для снижения неэффективного использования энергоресурсов отдельно рассматриваемых зданий посредством инженерного оборудования рекомендуется проводить следующие мероприятия в отопительных системах, направленные на повышение энергоэффективности:

- установка общедомовых приборов учета тепловой энергии;
- установка автоматизированных индивидуальных тепловых пунктов с узлом управления для регулирования подачи теплоносителя в систему отопления в зависимости от погодных условий;

- применение балансировочных клапанов на стояках систем отопления, которые способствуют равномерному распределению теплоносителя внутри здания;

- использование терморегуляторов (термостатов) для обеспечения комфортной температуры воздуха внутри помещений [26].

Установка узлов учета тепловой энергии в системах отопления зданий является обязательным и необходимым мероприятием для повышения энергетической эффективности. Узлы учета определяют фактическое значение потребленной тепловой энергии, а также могут автоматически изменять подачу тепла в систему отопления здания в зависимости от температуры наружного воздуха. Также узлы учета тепловой энергии предоставляют возможность для формирования информационно-аналитической базы данных и обеспечения мониторинга действующих систем отопления с целью получения данных о фактических затратах энергоресурсов, их дальнейшего анализа и регулирования.

Наличие индивидуального теплового пункта (ИТП) в каждом здании является обязательным вне зависимости от наличия централизованного теплового пункта (ЦТП). Однако, в этом случае ИТП следует устраивать для выполнения функций, отсутствующих в ЦТП, но необходимых для присоединения инженерных систем здания к внешним тепловым сетям.

Регулирование отпуска тепла в системы отопления производится посредством контроллера отопления (электронного регулятора). Этот прибор предусматривает управление исполнительными механизмами в зависимости от информации, полученной от установленных датчиков. Исполнительными механизмами являются регулирующие клапаны, оснащенные электроприводом. Они могут уменьшать или увеличивать уровень температуры теплоносителя в системе отопления на основании данных о температуре наружного воздуха и воздуха внутри помещений, времени суток. Также они обеспечивают требуемую температуру горячей воды. Применение регулятора обеспечивает комфортную температуру внутри помещений и качественное регулирование тепловой нагрузки в зависимости от отопительного температурного графика.

Передача тепловой энергии от внешних тепловых сетей теплоносителю систем отопления и горячего водоснабжения здания может происходить в теплообменниках. Применение более современных и эффективных теплообменников позволяет полностью получать и использовать подаваемую энергию. Например, пластинчатые теплообменники имеют существенно более высокий коэффициент теплопередачи по сравнению с кожухотрубными

[94]. Это дает возможность уменьшить размеры оборудования за счет уменьшения поверхности теплообмена. Вследствие чего, возможно уменьшение затрат при устройстве тепловых пунктов.

Часто предусматривается устройство автоматизированных узлов управления. Автоматизированный узел управления дает возможность сделать подачу тепла в системы отопления оптимальной, в отличие от нерегулируемых систем. Подача тепла будет производиться в необходимом объеме для обеспечения комфортных условий внутри помещений с учетом изменения температуры наружного воздуха. К тому же, если произвести настройку оборудования за счет электронного регулятора, можно получить дополнительную экономию тепловой энергии в ночное время, когда возможно поддерживать чуть более низкую температуру воздуха в нежилых, общественных зданиях, что приводит к экономии материальных затрат на тепловую энергию.

Однако, часто автоматическое регулирование системы через управление коэффициентом смешения влечёт за собой изменение расхода теплоносителя. А изменение параметров и расхода теплоносителя, скажется на гидравлическом режиме и может привести к перераспределению тепловыделения и изменению средней температуры отопительных приборов. Чтобы достичь оптимального распределения теплоносителя, снижения потребление тепловой энергии, сбалансированного по расходу и режиму работы стояков системы отопления, необходима установка автоматических или ручных балансировочных клапанов [100]. Например, из-за изменения гидравлического режима в однотрубной системе отопления может произойти перераспределение выделения тепловой энергии. Количество тепловыделения будет меньше у отопительных приборов, которые расположены ближе к обратному трубопроводу. Это можно устранить, используя автоматические регуляторы расхода на стояках.

В двухтрубной системе отопления, изменение гидравлического режима не приведет к перераспределению тепловыделения в разных частях здания, а приведет к дополнительному изменению средней температуры радиатора. В результате крутизна регулирования возрастет. Это устраняется применением на стояках автоматических регуляторов перепада давления [100].

Для возможности индивидуального регулирования режима работы отопительных приборов на них устанавливаются радиаторные термостаты, которые автоматически обеспечивают желаемую температуру воздуха внутри помещения.

Принимая во внимание существующий опыт применения вышеперечисленного энергосберегающего оборудования в системах отопления и исследования ведущих специалистов, можно определить среднюю величину возможной экономии тепловой энергии при выполнении каждого мероприятия [100]:

- 20% при установке автоматизированного узла управления;
- 5% при установке ручных или автоматических балансировочных клапанов;
- 15% при использовании термостатов;
- 40% при выполнении всех перечисленных мероприятий.

Современное оборудование систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха способно значительно повысить энергетическую эффективность здания за счет рационального использования тепловой и электрической энергии. Опыт использования такого оборудования [40] показывает, что оно вполне окупается и приносит выгоду. В общественных зданиях наиболее успешно применяются воздухообрабатывающая установка с регенерацией или рекуперацией тепла вытяжного воздуха, системы вентиляции с изменяющимся расходом воздуха, теплонасосные системы.

Значительное количество тепловой энергии вытяжного воздуха может быть использовано утилизаторами теплоты в системах вентиляции. Поэтому установка такого оборудования считается одним из основных энергосберегающих мероприятий с большим потенциалом экономии.

Вентиляционные воздухоподготавливающие установки с возможностью использования тепловой энергии вытяжного воздуха при сравнении с обычными приточными вентиляционными системами имеют следующие преимущества: значительная экономия энергии, необходимой для подогрева наружного воздуха (в зависимости от типа оборудования); аэродинамическая устойчивость вентиляционной системы; сбалансированный объем подаваемого и вытяжного воздуха [40]. Принцип работы утилизаторов заключается в подогреве наружного подаваемого воздуха за счет использования теплоты вытяжного воздуха в холодное время года и охлаждении приточного воздуха за счет энергии вытяжного воздуха в теплое время года при наличии в помещении кондиционера (сплит-системы). Процесс передачи энергии делится на 2 типа. Первый тип теплообмена – рекуперативный. Такой теплообмен происходит через стенку (поверхность), при этом вытяжной воздух нагревает эту стенку с одной стороны, а с другой стороны приточный воздух получает эту энергию от стенки, то есть непосредственного контакта или смешения двух потоков воздуха не происходит. Такой процесс обмена

энергией происходит в пластинчатом теплообменнике и утилизаторе теплоты с промежуточным теплоносителем. Второй тип теплообмена – регенеративный. Этот процесс характеризуется тем, что одна и та же поверхность сначала нагревается вытяжным воздухом, а затем передает тепловую энергию приточному воздуху, т.е. воздушные потоки проходят по этой поверхности по очереди. Роторные утилизаторы тепла используют этот механизм передачи энергии. При примерно одинаковых размерах установок утилизаторов теплоты самую высокую эффективность имеют регенеративные утилизаторы тепловой энергии (80-90%), эффективность пластинчатых утилизаторов тепла составляет до 65-70%, а утилизаторов теплоты с промежуточным теплоносителем – 45-55% [1].

Особенностью системы вентиляции с изменяющимся расходом воздуха или, как её ещё называют, адаптивной системы вентиляции, является обеспечение оптимального баланса между энергоэффективностью и надлежащей вентиляцией. Такие системы обеспечивают хорошее качество воздуха внутри помещений и позволяют существенно экономить энергию. Адаптивные системы вентиляции целесообразно устанавливать в помещениях с часто меняющимся числом людей, например, в учебных помещениях, аудиториях, спортзалах, магазинах, отелях [6]. Эти системы позволяют не только получить долгосрочные сбережения при новом строительстве, но и модернизация систем вентиляции в существующих зданиях может снизить тепловую нагрузку и нагрузку на охлаждение. Адаптивные системы вентиляции используют два типа оборудования: оборудование для контроля фактического числа находящихся в помещении людей и автоматизированная система вентиляции (воздухоподогревающая установка и индивидуальные воздушные клапаны), работающая на основании полученных данных.

В настоящее время применение тепловых насосов в качестве источника энергии для работы систем отопления, вентиляции и кондиционирования, а также горячего водоснабжения является необходимым мероприятием для достижения высокого уровня энергоэффективности здания [16]. Тепловые насосы, особенно в сочетании с другим энергосберегающим оборудованием, позволяют существенно снизить затраты на энергию. При правильной и продуманной эксплуатации теплонасосные системы могут быть эффективными как для индивидуальных жилых домов, так и для многоэтажных и общественных зданий.

Тепловой насос используется для нагрева (например, воздуха или воды) из-за того, что для его работы требуется меньше энергии, чем он способен отдавать. Большая часть энергии, которую обеспечивает тепловой

насос, берется из окружающей среды, и лишь небольшую часть составляет электроэнергия. Подаваемая тепловая энергия может быть в три-четыре раза больше, чем затраченная электрическая, поэтому коэффициент преобразования теплоты теплонасосной системы равен 3...4. Напротив, электрический нагревательный прибор имеет коэффициент преобразования теплоты равный 1, так как вся тепловая энергия получается из электрической [93].

Тепловые насосы по принципу работы делятся на компрессионные и абсорбционные. Компрессионные тепловые насосы работают при помощи механической энергии (полученной из электроэнергии), а абсорбционные тепловые насосы используют тепловую энергию (полученную из электроэнергии или при сжигании топлива) как источник энергии. В зависимости от теплоносителя во входном и выходном контуре теплонасосные системы подразделяют на несколько типов: воздух-вода, воздух-воздух, вода-воздух, вода-вода, грунт-воздух, грунт-вода [13]. Например, кондиционеры (сплит-системы) относятся к типу воздух-воздух, то есть если воздух в помещении необходимо подогреть, то тепловой насос получает тепловую энергию из наружного воздуха и выделяет тепло в воздух внутри помещения. В качестве низкопотенциального источника тепла может использоваться воздух (воздушные тепловые насосы), грунт (геотермальные тепловые насосы), вода (тепловые насосы, использующие тепло водоема), вторичное тепло (тепловые насосы, использующие тепло вытяжного воздуха или тепло сточных вод).

1.4. Повышение качества проектирования зданий, направленное на энергосбережение

При проектировании энергоэффективных зданий необходимо учитывать многообразие и изменчивость факторов и процессов, определяющих тепловой режим здания, то есть необходим системный подход при решении данного вопроса.

Составляющие, от которых зависит воздушный комфорт помещений, воздействуют на человека взаимосвязано и часто зависят друг от друга, что обуславливает необходимость комплексного нормирования, а не нормирования преимущественно температурно-влажностных параметров, как это зачастую имеет место в практике проектных организаций. Исторически сложилось, что нормирование теплозащитных характеристик ограждающих конструкций зданий проводится поэлементно. При этом с увеличением опыта нормирования повышалась детализация требований к отдельным его

конструкциям. Следует отметить, что в условиях современного строительства поэлементное нормирование, усложняя строительство и увеличивая его стоимость, является недостаточным для обеспечения эффективного сбережения энергии зданием [20]. Поэтому комплексное нормирование теплозащитных характеристик всей оболочки здания является оптимальным и крайне необходимым.

При расчете удельного расхода тепловой энергии на отопление здания за отопительный период в [78] используется множество дополнительных величин, которые уводят проектировщика от анализа оболочки здания. После учета потерь тепла на вентиляцию, бытовые тепловыделения, поступления от солнечной радиации, применяя ряд коэффициентов, учитывающих форму здания, регулируемость отопления, рекуперацию вентиляции и т.д., влияние теплозащитных свойств отдельной ограждающей конструкции приближается к погрешности расчета. Данная методика расчета удельного расхода тепловой энергии сложна и перенасыщена второстепенными деталями. Она привела к тому, что проектировщики и строители перестали ощущать влияние отдельных изменений проекта на нормируемую величину в целом, из-за чего соблюдение нормативных требований стало формальностью, реализуемой зачастую подгонкой коэффициентов.

Известно, что интегрированные системы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха нашли свое применение в небольших коммерческих и общественных зданиях, а также в малоквартирном строительстве. Однако нередко эти системы, оборудованные по последнему слову техники, потребляют гораздо больше энергии, чем необходимо, и даже превышают проектные показатели энергопотребления. Согласно результатам анализа данной проблемы [19] и их сопоставления с данными других исследователей, это может быть вызвано слабой системной интеграцией. Проектировщики различных конструкций и систем не учитывают или не имеют методики полной интеграции всех элементов здания с целью минимизации энергопотребления, а в современных условиях часто не имеют финансовых и рыночных стимулов для проведения полной интеграции. Хочется отметить, что рациональное решение проблемы энергосбережения возможно лишь при системном подходе к проектированию зданий, начиная от их правильного расположения на участке и заканчивая инженерными системами здания.

Таким образом, одним из необходимых условий достижения приемлемого для развитых стран уровня энергоемкости экономики является развитие энергоэффективного строительства, рационализация потребления энергии в существующем и строящемся фонде зданий. Применение

инновационных энергоэффективных технологий и энергосберегающего оборудования в строительстве позволит повысить уровень жизни граждан, приведет к экологической стабильности окружающей среды.

Глава 2. Программное и алгоритмическое обеспечение энергоэффективных систем

Несмотря на развитость электроэнергетической системы России, проблема энергообеспечения остается одной из важнейших в настоящее время. Главным образом данная проблема касается электроснабжения объектов, находящихся в отдаленных районах, для которых установить связь с существующей энергосетью посредством линий электропередач не представляется возможным или же нерентабельно.

На сегодняшний день энергообеспечение таких автономных потребителей реализуется главным образом с помощью бензиновых и дизельных генераторных установок, использование которых связано с большими затратами топлива и негативным воздействием на окружающую среду. Кроме того, при эксплуатации данного оборудования отсутствует возможность оптимизации их работы в условиях изменяющегося графика нагрузки с целью улучшения топливно-экологических показателей.

Таким образом, автономное энергоснабжение является востребованным в различных секторах экономики и географических регионах России, но требует реализации новых решений, направленных на повышение топливной и экологической эффективности при производстве электроэнергии и тепла.

Одним из способов решения указанных проблем является использование комбинированных энергетических установок, позволяющих объединить преимущества агрегатов, работающих на углеводородном топливе, электронакопительных устройств, а также возобновляемых источников энергии.

Широкое внедрение установок с возобновляемыми источниками энергии затрудняют ряд проблем. Основной проблемой при применении установок ВИЭ является стохастичность таких источников энергии, как солнечное излучение, ветер, приливы, сток малых рек, тепло окружающей среды. Непостоянство характеристик ветра, солнца или волн зачастую требует правильного расчета и подбора оборудования. Для повышения эффективности комплексных систем ВИЭ необходимо знать оптимальный состав основного и вспомогательного оборудования. Наиболее рациональным способом для нахождения эффективного состава комплекса установок возобновляемой энергетики является применение математического моделирования и электронно-вычислительных машин.

В настоящее время разработано множество компьютерных программ по расчету и подбору энергосистем на базе ВИЭ. При этом каждая из этих программ имеет свои преимущества и недостатки.

В данной работе рассмотрены зарубежные и российские программные комплексы, позволяющие учесть основной недостаток большинства программ, а именно невозможность рассчитать комплексную систему, состоящую из нескольких видов возобновляемых источников энергии.

2.1. Обзор комплексных систем на базе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии

В начале 21 века произошел резкий рост технологий возобновляемых источников энергии и это сильно сказалось на доступности систем на базе экологически чистых источников энергии. Капитальные затраты на приобретение установок ВИЭ для электроснабжения являются большими, но имеют приемлемый срок окупаемости (в зависимости от географического расположения и тарифов электроэнергии), что привело к повышению спроса на альтернативные источники энергии. Однако есть факторы, ограничивающие распространение возобновляемой энергетики. К ограничивающим факторам следует отнести то, что широкий круг потребителей не ознакомлен с новыми технологиями, мало отечественных производителей, выпускающих компоненты системы, что приводит к покупке импортного оборудования по более высокой цене.

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии имеют также свои недостатки. Например, у солнечных установок – это высокая стоимость и изменение количества солнечной энергии, поступающей на поверхность земли в течение дня, у ветряных генераторов – стохастичность скорости ветра, у жидкотопливных генераторов (ЖТГ) – стоимость приобретения и эксплуатационные издержки. Вследствие этого для устойчивого энергоснабжения применяют комбинированные системы, которые включают в себя два и более источников энергии, что позволяет использовать преимущества всех компонентов [24].

Обычно комбинируют солнечно-ветряные, ветро-дизельные и солнечно-ветро-дизельные системы, содержащие два и более ВИЭ. Также возможно увеличение количества компонентов системы с учетом местных, региональных или территориальных возможностей. Данные комбинированные системы ВИЭ будут востребованы лишь в конкретных географических условиях (наличие соответствующих источников энергии), целесообразность

таких систем зависит от вида установок ВИЭ, соотношений мощности и стоимости оборудования.

Оптимизация состава оборудования комплексной системы по типу и мощности каждого вида оборудования ВИЭ является одним из важных условий целесообразности и эффективности энергосистемы.

Оптимизация состава комбинированной энергетической системы ВИЭ по типам и мощностям подразумевает собой определение установленной мощности каждого вида оборудования ВИЭ и их количественный состав.

При комбинированной системе энергогенерации определенный состав оборудования и соотношения долей мощности ВИЭ определяются тремя важными факторами [27]:

- 1) энергетическим потенциалом рассматриваемых источников энергии (на основе многолетних климатических данных, площади размещения, региона, территории);
- 2) удельными технико-экономическими показателями ВИЭ;
- 3) стоимостными параметрами оборудования ВИЭ в составе гибридной установки.

Известно, что в системах энергоснабжения многие бытовые электрические приборы подключаются в сеть переменного тока с напряжением 220 В (кондиционер, освещение, холодильник, микроволновая печь, стиральная машина т.д.). Поэтому такие комплексные системы, кроме фотоэлектрических преобразователей, должны содержать контроллер заряда-разряда, аккумуляторные батареи и инвертор. Инвертор необходим для преобразования постоянного напряжения в переменное напряжение. Кроме того, необходимо иметь систему автоматического пуска и остановки генератора в зависимости от напряжения на клеммах аккумуляторов.

Во многих регионах страны количество поступающей солнечной энергии и наличие ветра оказываются в противофазе (т.е. при ярком солнце, ветра, как правило, отсутствуют, а если сильный ветер появляется, то солнца, как, как правило, нет). Вследствие этого для надежного электрообеспечения автономных потребителей и уменьшения установленной мощности ветрогенератора и фотоэлектрической панели, а также емкости АКБ, эффективно применение комбинированной солнечно-ветряной электростанции.

Преимущество использования комбинированных систем можно заметить при круглогодичном применении. Тогда зимой основную электроэнергию вырабатывает ветроэнергетическая установка, а летом большая часть покрывается фотоэлектрическими панелями, а при недостатке

электроэнергии и от ВЭУ, и от ФЭП подключается жидкотопливный генератор (ЖТГ). Обычно ЖТГ применяются в качестве резервного источника, когда вырабатываемой мощности недостаточно для полного покрытия нагрузки. Также с помощью ЖТГ можно заряжать аккумуляторную батарею, если ее напряжение опустилось до критического уровня.

Автономные электростанции, включающие в себя лишь жидкотопливные генераторы, не пригодны для покрытия неравномерного графика энергопотребления, которая в течение суток резко меняется в зависимости от времени суток, например, в ночное время потребление минимальное, а в утреннее и в вечернее время – максимальное. Использование дизель- или бензогенератора как резервного источника питания в комбинированной системе является оптимальным решением. В комбинированной системе ветро-солнечная станция вырабатывает электроэнергию при наличии ветра и солнца, покрывая необходимую нагрузку или накапливая излишки энергии в АКБ.

2.2. Зарубежные программные обеспечения по расчету гибридных энергетических систем

Зарубежный опыт показывает, что применение комплексных систем на основе ВИЭ совместно с традиционными топливными генераторами является оптимальным решением для энергоснабжения потребителей. В сравнении с топливными генераторами, применение комплексных систем на основе ВИЭ существенно сокращает потребление топлива, повышает надежность системы и снижает стоимость удельной произведенной электроэнергии.

При рассмотрении зарубежных программных обеспечений по расчету гибридных энергетических систем также необходимо отметить значительный вклад ученых, развивающих направление возобновляемой энергетики, таких как: G. Rauschenbach, Rodolfo Dufo-López, José L. Bernal-Agustín, J.A. Carta, Orhan Ekren, Tremblay O, A. Hina Fathima, Jonas Allegrini, J. Dekker, Minna Ranjeva, V. Salas, M. P. Musgrove, E. Dursun и многих других [51].

Программный комплекс «HOMER»

Программное обеспечение HOMER представляет собой программу для проектирования энергосистем и сравнения нескольких вариантов компоновки системы с различным составом оборудования на основе технико-

экономического обоснования. Данная программа разработана американской Национальной Лабораторией возобновляемых источников энергии (NREL). Основной вклад в создание и развитие проекта внесли Питер Лилиенталь, Ховард Альт, Энди Круз и Доминик Мороун.

В программном комплексе «HOMER» существует возможность моделирования автономной энергетической системы и энергетической системы с подключением сети, включающую любую комбинацию источников энергии.

В программе HOMER можно выбирать различные установки, такие как фотоэлектрические панели, гидроэлектростанции, ветроэнергетические установки, дизель генератор, электрическая сеть, также водородные топливные элементы и инвертор. С помощью дизель-генератора потребитель может получить и электрическую, и тепловую энергии. Тепловую энергию можно выработать путем использования тепла двигателя. HOMER учитывает возможность подключения энергосистемы на базе ВИЭ к электрической сети, способность отдавать избыточную электроэнергию в сеть и принимать энергию при дефиците из централизованной сети. В солнечно-водородной системе, например, электролизер преобразует избыток мощности фотоэлектрических преобразователей в кислород и водород, который накапливается в водородном аккумуляторе для использования в дальнейшем в топливных элементах во время дефицита электроэнергии от фотоэлектрической панели. На рисунке 0.1 приведена принципиальная схема солнечно-водородной системы.

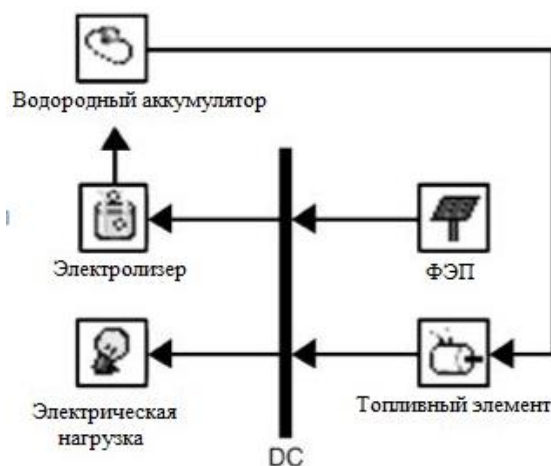


Рисунок 0.1. Принципиальная схема солнечно-водородной энергосистемы

Ламберт Т. и другие авторы в своей работе описывают стадии выполнения расчета в программе «HOMER» [7]. Расчет энергосистемы на базе

ВИЭ выполняется в 3 стадии: моделирование, оптимизация и анализ чувствительности (рисунок 0.2).

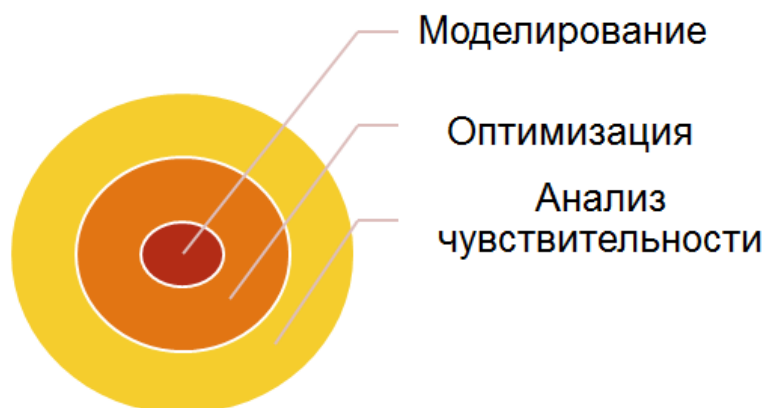


Рисунок 0.2. Стадии выполнения расчета энергосистемы на базе ВИЭ в программе

На стадии «Моделирование» программа осуществляет следующие расчеты:

1. вычисление потоков энергии от каждого компонента системы.
2. Для каждого часа сравнение тепловой и электрической мощности, необходимой потребителю, с энергией, которую система может обеспечить в этот час.
3. Подсчет всех капиталовложений, такие как начальные капиталовложения, затраты на ремонт, на эксплуатацию и обслуживание, топливо и издержки.

На стадии «Оптимизация» выполняется:

1. Имитация различных конфигураций, отбрасывание неосуществимых, ранжирование возможных из них в соответствии с общей приведенной стоимостью.
2. Определение наилучшей конфигурации системы, удовлетворяющие заданным пользователем ограничениям по минимальной общей приведенной стоимости.
3. Расчет размера или количества каждого компонента.
4. Выбор проектировщиком оптимального варианта, который отвечает всем экономическим и техническим требованиям.

На стадии «Анализ чувствительности» программа «HOMER» выполняет следующие функции:

1. Показывает чувствительность выходных параметров от входных параметров.

2. Помогает оценить параметры, которые проектировщик не способен контролировать, например, средняя скорость ветра, будущая цена на топливо, срок службы установок и цены электро- или тепловой энергии.

3. Позволяет проектировщику определить степень воздействия этих факторов на поведение, целесообразность, надежность и экономику конкретной конфигурации системы.

Во время расчета и моделирования HOMER сравнивает различные варианты компоновки энергосистем с возобновляемыми и традиционными источниками энергии. Таким образом, рассматривают текущие и капитальные затраты. На рисунке 0.3 приведен пример расчета гидро-ветро-солнечной системы [4].

Большое количество ученых использовали программу «HOMER» для расчета и анализа гибридных энергетических систем на основе возобновляемых источников энергии, среди которых следует выделить работу И. Б. Рамдхана по оптимизации производства электроэнергии гибридной системой (солнечная, дизельная и накопительная) с использованием HOMER для населенного пункта Бирет, Южное побережье Мавритании [10]. Рохит Сен и др. в своей работе рассмотрели четыре вида возобновляемых источников, а именно малую гидроэнергетику, солнечные фотоэлектрические системы, ветровые турбины и биодизельные установки [14]. На основе HOMER в статье определяется оптимальный состав оборудования без подвода электрической сети и сравнивается с подводом централизованной электрической сети. Полученное решение показывает, что гибридная система возобновляемых источников энергии без подвода электрической сети может быть экономичной альтернативой, и эта система будет надежной, технико-экономически обоснованной и экологически безопасной.

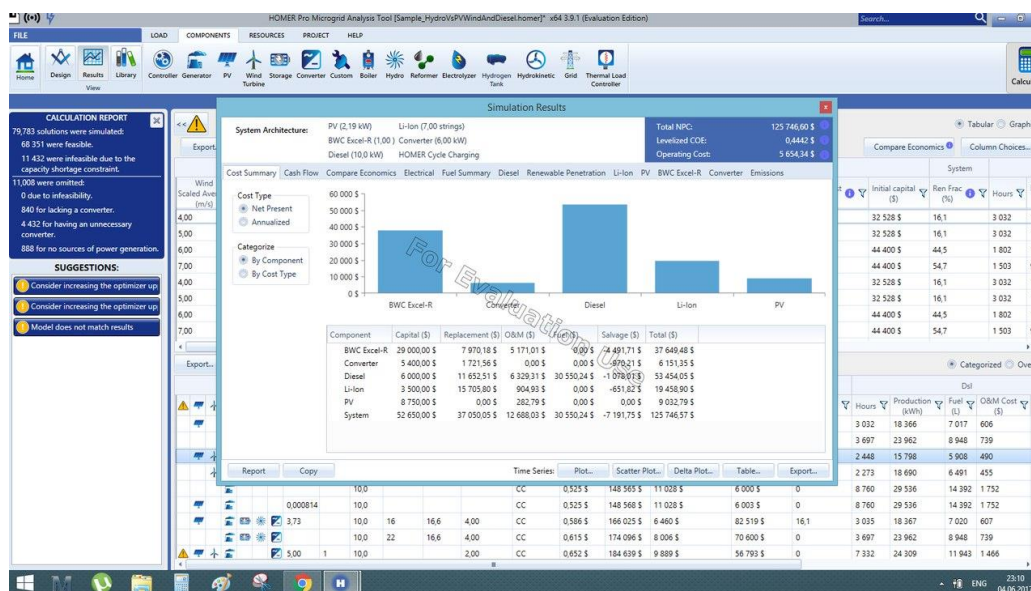


Рисунок 0.3. Окно расчета программного обеспечения «HOMER»

В работах В.И. Велькина и др. показаны ряд недостатков программы «HOMER» для отечественного потребителя [29]:

- Высокая стоимость приобретения лицензированного программного обеспечения. Стоимость лицензии сроком на один месяц варьируется в диапазоне 63-185 долл./мес.
- Используются американские единицы измерения.
- В расчете не учитывается количественный состав оборудования.
- Нет возможности рассмотрения нескольких моделей установок и производителей установок в одном расчете.

Программное обеспечение HOGA

Разработчиками программы *Hybrid optimization by genesis algorithm* (HOGA, Испания) являются Родольфо Дюфо-Лопес, Хосе Л. Бернал-Агустин.

Программа моделирования и оптимизации систем электроснабжения, использующих ВИЭ и АБ. Оптимизация достигается путем минимизации суммарных затрат системы на протяжении всего цикла эксплуатации. Для решения оптимизационной задачи применяется генетический алгоритм. Математическая модель включает в себя ФЭП, ВЭУ, АКБ, ДЭС, микро-ГЭС топливные элементы, электролизер и т.д. [3].

На рисунке 2.4 представлено окно ввода данных программного комплекса HOGA.

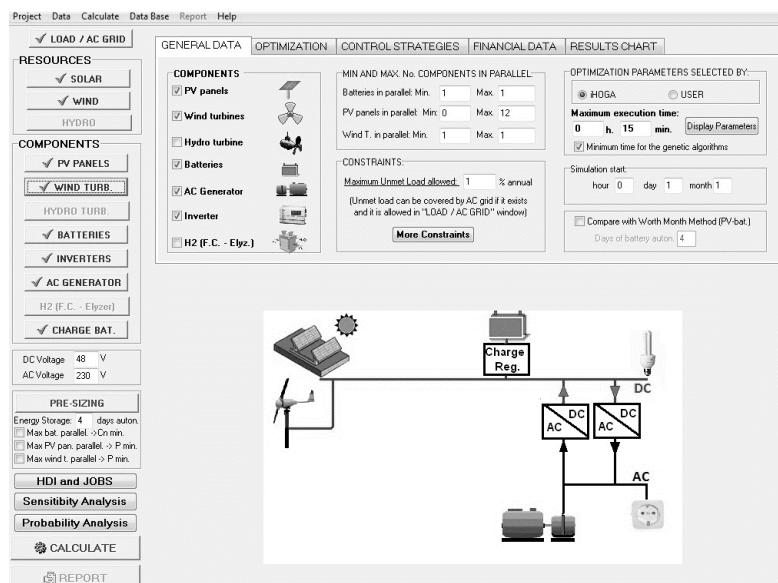


Рисунок 2.4. Окно ввода данных программного комплекса HOGA.

Программное обеспечение RETScreen

Программное обеспечение RETScreen представляет собой программу, которая предназначена для исследования систем с использованием возобновляемых источников энергии. Данная программа применяется для анализа потребления электроэнергии, воды и топлива, выработки электроэнергии, возможности энергосбережения и сокращения вредных выбросов, для технико-экономического анализа и для оценки энергетической эффективности [11]. Программное обеспечение RETScreen разработано Министерством природных ресурсов Канады. В основную группу разработчиков входят Динеш С. Парах, Кевин Бурк и Майкл Росс.

Данная программа позволяет обнаруживать и выявлять потенциальные объемы энергосбережения, оценивать и оптимизировать различные энергетические проекты. Оценка проектов осуществляется в 5 этапов, которые включают в себя энергетически анализ, анализ себестоимости, эмиссионный анализ, экономический анализ, а также показателей риска для различных видов возобновляемых источников энергии и энергоэффективных технологий. На рисунке 0.5 приведена графическая схема осуществления анализа.

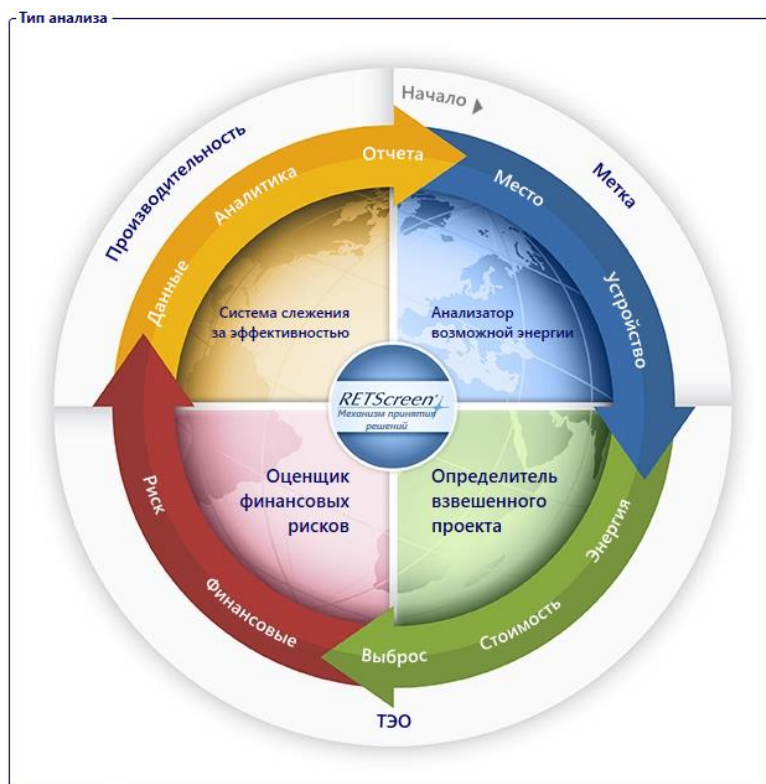


Рисунок 0.5 Графическая схема осуществления анализа в программном комплексе RETScreen

Программное обеспечение доступно на 36 языках (в том числе русский), а также включает климатические базы данных, подробное руководство пользователя и инженерный электронный учебник.

До 2016 года программный комплекс RETScreen включал в себя две программы «RETScreen Plus» и «RETScreen 4», которые распространялись на бесплатной основе. На рисунках 0.6-0.7 представлены стартовые окна «RETScreen Plus» и «RETScreen 4».

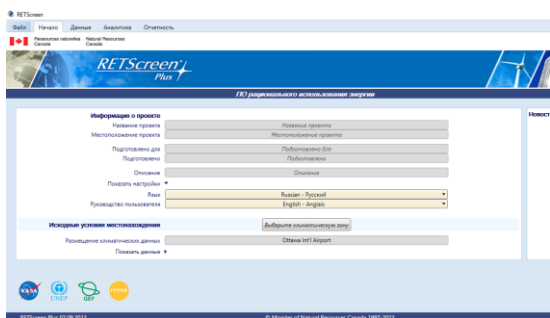


Рисунок 0.6 Стартовое окно «RETScreen Plus»



Рисунок 0.7 Стартовое окно «RETScreen»

В настоящее время программный комплекс RETScreen состоит из программы «RETScreen Expert», которая включает в себя возможности предыдущих версий программ, а также имеет ряд новых функций, таких как:

- **«Анализатор возможной энергии»**

Позволяет определить потенциал производства и экономии энергии для объекта на основе местоположения, является механизмом для предварительного технико-экономического анализа использования одного из видов источников энергии.

- **«Модуль анализа портфеля»**

Данный модуль позволяет проанализировать и сравнить различные объекты, рассчитанные в программном комплексе «RETScreen».

Программа «RETScreen Expert» распространяется на платной основе, в данный момент стоимость составляет 869 долл. США в год.

Основной недостаток программы RETScreen – не позволяет определить оптимальный состав оборудования, а лишь провести анализ уже рассчитанного проекта.

Программное обеспечение «RETScreen» широко используется для анализа и внедрения проектов с использованием источников чистой энергии. Например, А. Мирзахосеини и др. привели экологическое, техническое и финансовое обоснование солнечных электростанций в соответствии с ориентацией на энергетические субсидии в Иране на основе программы RETScreen [8]. Ю. Пан и др. рассмотрели четыре возможных сценария энергоснабжения, используя программу RETScreen, был учтен экономический анализ, а также внедрение возобновляемых источников [9].

2.3. Отечественные программные обеспечения по расчету комплексных энергетических систем на основе ВИЭ

Автономное энергоснабжение является актуальной задачей в различных регионах России, но для этого требуются новые технологии, которые направлены на рациональное использование топлива и на улучшение экологической ситуации при выработке электроэнергии и тепла.

Одним из методов решения вышеописанных проблем является применение комплексных энергосистем на базе ВИЭ, включающих в себя различные виды установок. При этом для выбора оптимального состава

оборудования комплексной энергосистемы целесообразно использование современного программного обеспечения.

Среди отечественных ученых, внесших значительный вклад в развитие возобновляемой энергетики, Ю.С.Васильев, Д.С.Стребков, О.С. Попель, П.П. Безруких, В.В. Елистратов, В.И.Виссарионов и многие другие.

Проблемами поиска оптимального состава оборудования для энергообеспечения автономных объектов занимаются Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева и Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина. Например, в политехническом университете Петра Великого В.В. Елистратов и М.А. Конищев разработали модель ветродизельной электростанции для автономного энергоснабжения северных территорий России. Модель ветродизельной станции выполнена в Matlab SIMULINK [48].

В институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, который находится в г.Иркутске, также ведется разработка программного комплекса по расчету систем на основе ВИЭ. В частности можно выделить таких ученых как Клер А.М. и Карамов Д.Н. . Ими была разработана методика комплексной оптимизации ДСЭС, использующих ВИЭ и АБ, дан подход к учету надежности при решении задачи комплексной оптимизации ДСЭС. Разработан программно-вычислительный комплекс реализующий данную методику комплексной оптимизации. ПВК создан с использованием инструмента имитационного моделирования Matlab/Simulink [51].

После анализа зарубежного и отечественного опыта с учетом всех преимуществ и недостатков в Уральском федеральном университете началась разработка отечественного программного комплекса для поиска оптимального состава оборудования комплексной системы энергообеспечения на основе ВИЭ [28]. На сегодняшний день зарегистрированы три программы:

- «Автоматизированный расчет кластера ВИЭ» (АРК-ВИЭ), написанная в среде пакета Microsoft Excel [77].
- Программа «VIZPO-RES» выполнена в среде «Adobe Flash Professional CS6» на языке программирования Action Script 3.0 и экспортирована в формат «EXE» [75].
- Программа расчета и визуализации оптимальной комплексной системы возобновляемых источников энергии (RES) "VizProRES" [76].

Эти программы были разработаны на кафедре атомных станций и возобновляемых источников энергии УрФУ.

Данные программы предназначены для нахождения оптимального состава оборудования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для энергоснабжения автономных (удаленных) объектов с учетом технических и экономических параметров оборудования, на основе реальных природно-климатических данных выбранного региона.

Последней версией программного комплекса по расчету систем на основе ВИЭ является «VizProRES 2017» выполнена в среде «Microsoft Visual Studio 2015» на языке программирования C#.

Программа «VizProRES 2017» позволяет определить наилучший вариант энергообеспечения автономного объекта с учетом технических и экономических параметров основного и вспомогательного оборудования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), используя реальные природно-климатические данные выбранного региона и учитывая недельное и годовое изменение графика потребления электроэнергии.

Выбор оптимального состава ВИЭ ведется по составу источников энергии из различных сочетаний ветроэнергетических установок (ВЭУ), солнечных фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), аккумуляторных батарей (АКБ) и централизованной электрической сети (ЭЭС).

Программа рассчитана на поставщиков и производителей оборудования ВИЭ, растущий сегмент потребителей из мелких и средних собственников жилья, дилеров сети реализации оборудования НВИЭ, а также для территориальных и муниципальных энергетических структур, заинтересованных в снижении расходов на энергетические нужды и внедрении возобновляемых источников энергии.

Функциональные возможности программы «VizProRES 2017»:

1. расчет оптимального состава оборудования на базе ВИЭ с учетом недельного и годового изменения графика потребления электроэнергии, для заданного географического района;
2. выполнение графического анализа различных вариантов компоновки системы;
3. моделирование поведения системы за весь расчетный период, учитывая суточные колебания выработки энергии;
4. сохранение рассчитываемого варианта, для последующей его загрузки и продолжения работы без потери введенных ранее данных.

5. возможность включения в расчет фотоэлектрических панелей, ветроэнергетических установок, топливных генераторов, АКБ, инверторов и централизованной электрической сети.

При нахождении оптимального состава оборудования целевой функцией является минимум приведенных затрат за период эксплуатации:

$$y(x_1, x_2, \dots, x_i) = a_0 + a_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_i \cdot x_i = y_{min}$$

где x_i – количество единиц оборудования i типа;

a_i – приведенные затраты за период эксплуатации одной установкой i типа;

a_0 – суммарная стоимость топлива потребляемая системой за период эксплуатации;

a_1 – суммарная стоимость электрической энергии от ЭС потребляемой системой за период эксплуатации;

Выбор состава оборудования и задание расчетного периода осуществляется на странице «Главная», которая представлена на рисунке 2.8.

The screenshot shows the 'Главная' (Main) page of the 'VizProRES' program. At the top is a navigation bar with tabs: 'Файл', 'Главная', 'Объект', 'Оборудование', 'Расчет', 'Графика и анализ'. The main title is 'VizProRES' with the subtitle 'Программа для расчета и анализа состава оборудования ВИЭ'. On the left, under 'Выберите состав оборудования' (Select equipment composition), there is a list of equipment types with checkboxes: 'Фотоэлектрическая панель' (checked), 'Ветроэнергетическая установка' (checked), 'Аккумуляторная батарея' (checked), 'Топливный генератор' (checked), 'Электрическая сеть' (checked), and 'Инвертор' (checked). In the center, there are input fields for 'жилой дом, климатические данные (г.Тюмень)' and 'количество жителей: 3 человека, мощность : 10 кВт'. Below these, there are date pickers for 'Период загрузки данных' (с 01.01.1987 по 31.12.2016) and a dropdown for 'Периодичность сбора данных' (Сутки). At the bottom, there are icons representing different types of renewable energy equipment: a solar panel, a battery, a wind turbine, a power line tower, and a DC/AC converter box.

Рисунок 2.8. Скан программы расчета ВИЭ «VizProRES 2017».

В окне «Графика и анализ состава оборудования ВИЭ» осуществляется графический анализ рассчитанного состава оборудования рисунок 2.9.

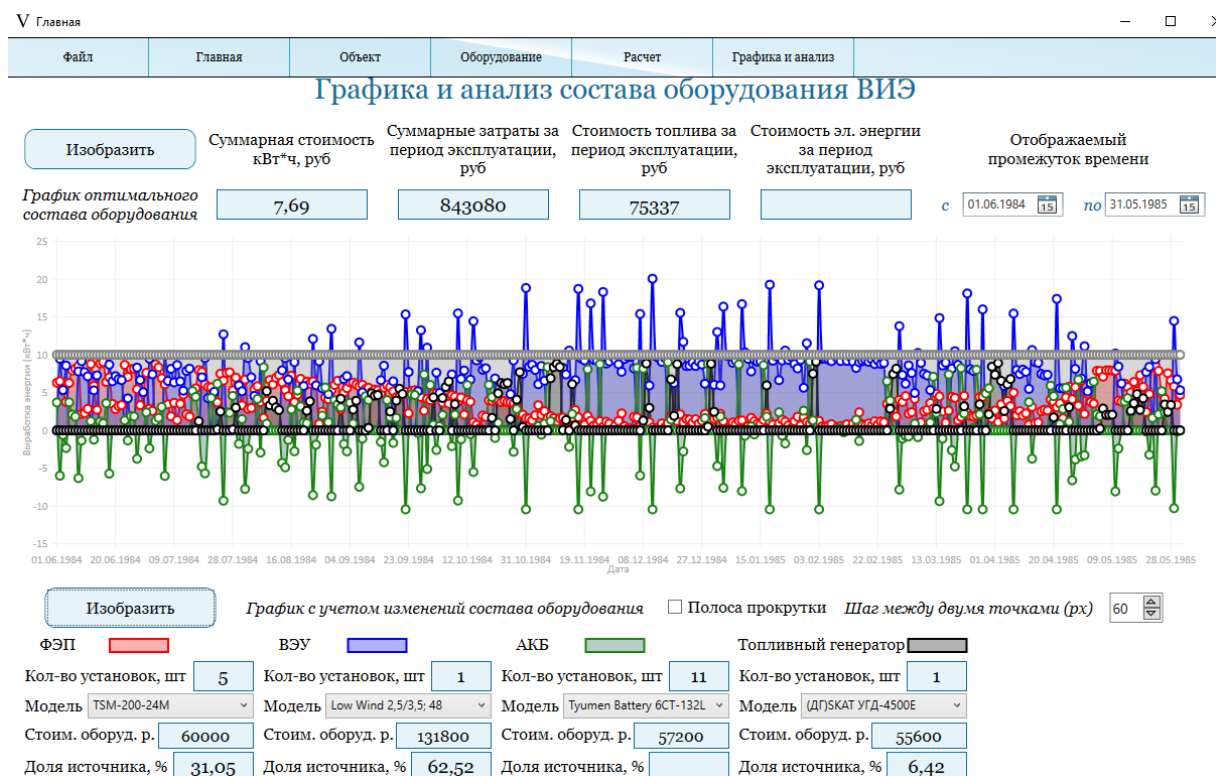


Рисунок 0.9. Окно страницы «Графика и анализ состава оборудования»

При анализе работы программы и сравнения её с зарубежными и существующими аналогами можно выделить следующие преимущества и недостатки программы:

Преимущества:

- нахождение оптимального состава оборудования для энергетической системы на базе ВИЭ;
- моделирование поведения системы с учетом климатических данных за весь расчетный период;
- проведение графического анализа различных вариантов компоновки системы;
- удобный и простой интерфейс, язык интерфейса – русский;
- используются общероссийские единицы измерения;
- учитываются недельные и годовые изменения потребления электроэнергии;
- возможность сравнения с вариантом присоединения потребителя к централизованной электрической сети;
- учитываются расходы на вспомогательное оборудование комплексной системы на базе ВИЭ.

Недостатки:

- нет возможности расчета тепловой части;
- в настоящее время не внедрен расчет микроГЭС в составе комплексной системы ВИЭ;
- не учтено изменение расхода топлива ТГ в зависимости от изменения суточного графика нагрузки и продолжительности работы.

В то же время, перечисленные недостатки являются предметом рассмотрения и совершенствования новой программы расчета комплексных систем ВИЭ.

Роль использования комплексных генерирующих энергетических систем с расширенным рядом ВИЭ для России, с учетом ее огромных пространств, отсутствием на 70% территории страны централизованных источников энергии и усилением в последнее время климатических и политических угроз, возрастает. Внедрение комплексных систем ВИЭ предполагает повышение надежности энергоснабжения удаленных территорий, рост качества жизни децентрализованных потребителей, создание новых рабочих мест, формирование предпосылок к снижению потребления органических топлив и загрязнения окружающей среды.

В связи с принятием Закона № 261 «Об энергосбережении, о повышении энергетической эффективности...», постановлений Правительства РФ № 449 от 28.05.2013 г. «О механизме поддержки внедрения ВИЭ в России» и № 47 от 23.01.2015 г. «О стимулировании использования возобновляемых источников энергии», Приказа ФАС № 900/15 от 30.09.2015 «Об утверждении методических указаний по установлению цен (тарифов) на электрическую энергию, произведенную с помощью ВИЭ на квалифицированных генерирующих объектах...», актуализируется задача развития технологий ВИЭ для территорий субъектов Российской Федерации, включенных в перечень технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем, и на территориях, технологически не связанных с Единой энергетической системой России.

До последнего времени не существовало механизма привлечения широких слоев населения для активного участия во внедрении ВИЭ.

Сегодня такой механизм разрабатывается по поручению Правительства РФ от 24.07.2017 «О механизме микрогенерации на основе ВИЭ». Проект закона по стимулированию микрогенерации планируется рассмотреть в 2018 г. совместно с ФАС, Минэнерго и Минэкономразвития РФ. Под микрогенерацией в документе подразумевается выработка мощности до 15 кВт.

Развитие математического моделирования и совершенствование программного обеспечения для расчета комплексных энергетических систем на основе возобновляемых источников энергии является, в связи с изложенным, важнейшей задачей для современной России.

Глава 3. Перспективные направления использования возобновляемых источников энергии в агропромышленном комплексе

В разделе рассмотрены нетрадиционных возобновляемых источников энергии для электроснабжения производственных объектов крестьянских фермерских хозяйств, где использование электроэнергии от централизованной энергосистемы затруднено или невозможно. Показано, что для обеспечения требуемой надёжности и бесперебойности электроснабжения такие системы электроснабжения целесообразно проектировать на базе гибридных солнечно-ветро-дизельных энергетических установках. Предложен адаптивный алгоритм управления режимами работы с учетом обеспечения баланса мощностей между источниками и приемниками при текущих погодных условиях. Рассмотрен вариант построения указанных установок, реализующих предложенный алгоритм. Выбраны характеристики и проведен сравнительный анализ ветроэнергетических установок с горизонтально и с вертикально расположенной осью вращения. Доказано, что для обеспечения технологического цикла производства сельхозпродукции на малых фермерских хозяйствах целесообразно применение вертикально-осевых ветроэнергетических установок. Показано, что для мобильных систем автономного электроснабжения объектов фермерского хозяйства в условиях удаления от стационарных государственных систем электроснабжения целесообразно использование перспективные вертикально-осевых ветрогенераторов Maglev и ветровой турбины Болотова. Предложена конструкция вихревой ветроэнергетической установки с улучшенными технико-экономическими характеристиками для электроснабжения объектов агропромышленного комплекса.

Постановка задачи. В Государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013 — 2020 годы отмечено, что для достижения цели повышения конкурентоспособности российской сельскохозяйственной продукции на внутреннем и внешнем рынках необходимо решение следующих основных задач [69]:

- стимулирование роста производства основных видов сельскохозяйственной продукции, производства пищевых продуктов;
- поддержка малых форм хозяйствования;

- научное обеспечение реализации мероприятий государственной программы;

- стимулирование инновационной деятельности и инновационного развития агропромышленного комплекса.

В Постановлении Правительства Ростовской области «Об утверждении государственной программы Ростовской области «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2014-2017 годы и на период до 2020 года» определены цели и поставлены задачи развития агропромышленного комплекса (АПК) области на перспективу [68].

Решение этих задач требует надежного и бесперебойного электроснабжения производственных объектов фермерских хозяйств (ПОФХ). Поэтому электроснабжению ПОФХ уделяется особое внимание при проектировании и строительстве. На практике возникает множество ситуаций, когда ПОФХ территориально удалены от районов с установившейся структурой Госэнергосистемы. На сегодняшний день свыше 65 % территории нашей страны — зона децентрализованного электроснабжения. В этой зоне проживает более 15 млн. человек. Из 225 млн. кВт установленной мощности электростанций России — 17 млн. кВт приходится на электростанции, работающие в зоне децентрализованного электроснабжения [36].

Кроме этого, существующая структура электроснабжения потребителей АПК имеет следующие недостатки [53]:

- высокий уровень аварийности при передаче электроэнергии;

- невозможность глубокой реконструкции линий и трансформаторных подстанций из-за высокой стоимости работ, материалов и оборудования, силами и средствами энергоснабжающих предприятий;

- подключение к существующим электросетям является очень дорогостоящим. Так согласно существующим тарифам на строительство воздушных линий электропередачи в Ростовской области на первом уровне напряжения длиной 5 км, на организационные, технические мероприятия, а также на оформление соответствующей проектной документации по ориентировочным расчётам потребуется более 1 млн. рублей.

Следовательно, в ближайшей перспективе существующая централизованная структура электроснабжения потребителей АПК не сможет удовлетворять запросам предприятий по производству, переработке и хранению сельскохозяйственной продукции.

Таким образом, строительство ПОФХ с электроснабжением на основе возобновляемых источников энергии в регионах России, где отсутствует централизованное электроснабжение, является актуальной научно-технической задачей.

Материалы исследования. Задача формулируется следующим образом. Разработать технические рекомендации по проектированию систем автономного электроснабжения (САЭ) производственных объектов фермерских хозяйств.

Для решения этой задачи необходимо рассмотрение следующих вопросов:

- выбор возобновляемых источников энергии для построения САЭ;
- разработка алгоритма функционирования и структуры САЭ;
- выбор конструкции ветроэнергетической установки (ВЭУ) для электроснабжения объектов АПК;
- выбор мобильных ВЭУ для электроснабжения объектов АПК;
- разработка конструкции ВЭУ с улучшенными технико-экономическими характеристиками для электроснабжения объектов АПК

3.1 Выбор возобновляемых источников энергии.

Такой выбор целесообразно выполнять с учётом конкретного географического региона. Анализ ресурсов возобновляемых источников энергии России позволяет сделать следующие выводы:

- зонами эффективного применения ВЭУ являются по субъектам Российской Федерации области: Архангельская, Астраханская, Волгоградская, Калининградская, Камчатская, Ленинградская, Магаданская, Мурманская, Новосибирская, Ростовская, Тюменская; края: Краснодарский, Пермский, Приморский, Хабаровский; республики: Дагестан, Калмыкия, Хакасия, Саха (Якутия); автономные округа Ненецкий, Чукотский, Ямало-Ненецкий [23, 72];
- наиболее перспективные регионы в плане использования солнечных энергетических установок (СЭУ): Калмыкия, Ставропольский край, Ростовская область, Краснодарский край, Волгоградская область, Астраханская область и другие регионы на юго-западе, Алтай, Приморье, Читинская область, Бурятия и другие регионы Западной, Восточной Сибири и Дальнего Востока [72, 41].
- наиболее популярны сегодня гибридные солнечно-ветровые установки, представляющие собой комбинацию солнечных панелей с ветрогенераторами и часто дополненные дизельным генератором. Они успешно

заменяют газотурбинные установки малой мощности, мазутные котельные и дизельные генераторы, особенно расположенные в зоне децентрализованной энергетики. К 2020 г. мировой рынок таких установок может составить 65 млрд. долларов. Их использование позволит увеличить к 2035 г. долю возобновляемых источников в производстве электроэнергии с 5% до 15% [62, 12].

Таким образом, для обеспечения требуемой надёжности и бесперебойности электроснабжения САЭ производственных объектов фермерского хозяйства целесообразно проектировать на базе гибридных солнечно-ветродизельных энергетических установок (ГСВДЭУ), поскольку в них используются все преимущества и компенсируются недостатки отдельных источников.

3.2 Разработка алгоритма функционирования и структурной схемы.

При разработке алгоритма функционирования и структуры ГСВДЭУ необходимо учитывать следующие требования [12].

1. Обеспечение бесперебойного электроснабжения ПОФХ в течение гарантийного ресурса не менее 5 лет. При этом генерируемая суммарная мощность должна быть не менее 10 кВт, напряжение должно быть однофазным/трёхфазным номиналом 220/380 В и иметь частоту 50 Гц. Преобразование переменного тока в ток, с характеристиками и параметрами, требуемыми для работы системы пожарной сигнализации и пожаротушения, а также системы охраны (обычно это постоянный ток напряжением 12 В). Источник питания не только преобразует, но и стабилизирует параметры в достаточно жестких пределах – вплоть до 1-2% [73].

2. В состав ГСВДЭУ входят приёмники переменного и постоянного тока. Постоянным током обеспечиваются системы пожарной сигнализации и пожаротушения, а также системы охраны; переменным током – технологическое оборудование ПОФХ.

3. Управление ГСВДЭУ должно осуществляться на основе обеспечения баланса между потребляемой и генерируемой энергией.

4. Выбор установленной мощности ВЭУ, СЭУ и дизель-электрической установки (ДЭУ) необходимо выполнять с учетом того, что ДЭУ должна генерировать весь поток энергии при отсутствии ветра и солнца, а установленная мощность ВЭУ и СЭУ может быть долевой от номинальной согласно конкретным климатическим условиям.

Кроме этого, при разработке алгоритма функционирования ГСВДЭУ необходимо учитывать следующие ресурсные характеристики и стоимостные соотношения [12, 73, 43].

1. Номинальный срок службы ветрогенераторов считается 15 лет, но при правильной эксплуатации и своевременном обслуживании этот срок можно увеличить в два раза.

2. Качественные солнечные панели рассчитаны на работу в течение не менее 25 лет.

3. Номинальный срок службы дизель-генераторов составляет 5-10 лет.

4. В гибридной системе основной источник энергии – это ветрогенератор, т.к. он как минимум в два раза дешевле солнечной панели, поэтому его установить целесообразнее, если позволяют местные условия. Вспомогательным источником энергии является комплект из солнечных фотоэлектрических панелей.

Следовательно, определяющим с точки зрения эффективности функционирования такой ГСВДЭУ является максимизация времени ее автономной и бесперебойной работы при безусловном обеспечении требуемых основных технико-экономических и эксплуатационных характеристик. Для решения этой задачи необходимо реализовать такое управление ГСВДЭУ, при котором максимально полезно используется энергия ветра и солнца, и минимально задействуется резервный источник (ДЭУ), который при этом сохраняет свой ресурс и обеспечивает тем самым автономность и бесперебойность электроснабжения оборудования ПОФХ.

Таким образом, алгоритм управления работой источников электрической энергии ГСВДЭУ должен предполагать выполнение принципа адаптивности, в соответствии с которым электроснабжение приёмников с переменным графиком нагрузки осуществляется от возобновляемых источников энергии, текущие значения выходных параметров которых соответствуют требуемым значениям с учётом текущих условий окружающей среды.

Энергию ветра целесообразно оценивать текущим значением электрической мощности, вырабатываемой ВЭУ ($P_{ВЭУ}$). Энергию солнца – текущим значением электрической мощности, вырабатываемой СЭУ ($P_{СЭУ}$). Суммарную потребляемую нагрузкой электрическую мощность в каждый момент времени можно оценить требуемым текущим значением ($P_{\Sigma, TP}$). Исходя из вышеизложенного, алгоритм управления ГСВДЭУ в общем виде можно представить следующим образом. В зависимости от специфики и важности решаемых станцией задач, а также от климатических условий места

размещения установленные мощности $P_{уст. вэу}$ и $P_{уст. сэу}$ могут быть равны или отличаться по номинальным значениям. При текущем значении электрической мощности $P_{вэу}$, большем текущего требуемого значения $P_{\Sigma, тр}$, приёмники постоянного и переменного тока могут обеспечиваться от ВЭУ. Аналогично – при текущем значении электрической мощности $P_{сэу}$, все приёмники могут обеспечиваться от солнечных батарей.

В общем случае, если суммарное текущее значение $P_{вэу}$ и $P_{сэу}$ превышает текущее значение мощности $P_{\Sigma, тр}$, то уровень вырабатываемой мощности каждым из этих источников обеспечивается соответствующими регуляторами, чтобы обеспечить баланс вырабатываемой и потребляемой мощности, т.е.

$$P_{вэу} + P_{сэу} = P_{\Sigma, тр} . \quad (1)$$

При недостаточном суммарном текущем значении $P_{вэу}$ и $P_{сэу}$ включается в работу ДЭУ и обеспечивает электроснабжение приёмников. Таким образом, ДЭУ как резервный источник задействуется только в случае невозможности покрытия требуемой текущей мощности $P_{\Sigma, тр}$ от ВЭУ и СЭУ. При этом также выполняется баланс вырабатываемой и потребляемой мощности, т.е.

$$P_{вэу} + P_{сэу} + P_{дэу} = P_{\Sigma, тр} . \quad (2)$$

Описанный алгоритм может быть реализован структурной схемой ГСВДЭУ, представленной на рисунке 3.1.

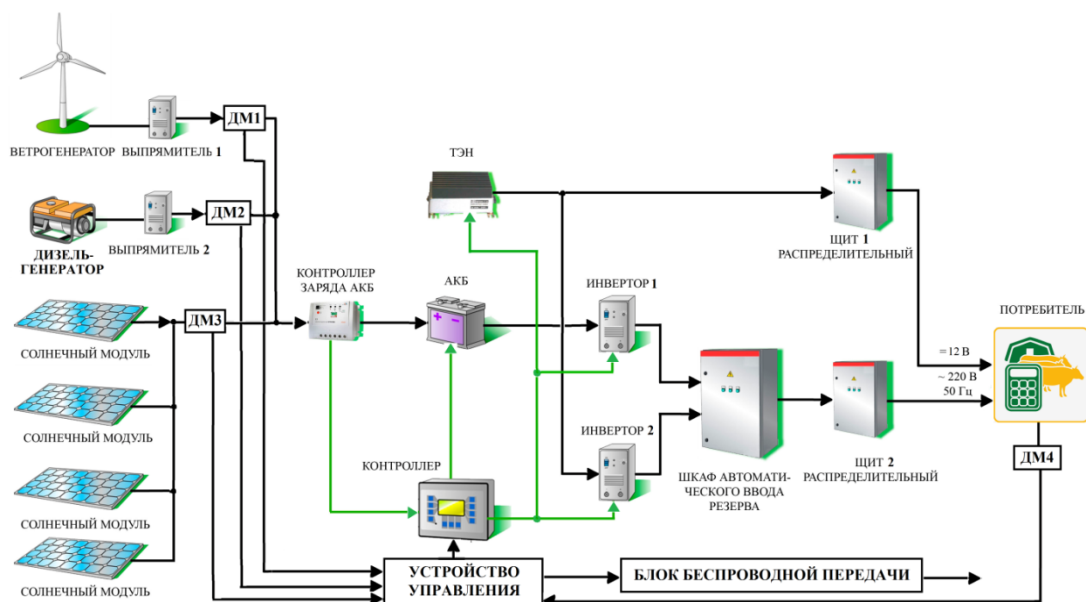


Рисунок 3.1. Структурная схема системы автономного электроснабжения производственных объектов фермерского хозяйства на основе ГСВДЭУ

В состав установки в отличие от известных схем дополнительно введены датчики текущих значений мощности ВЭУ - ДМ1, ДЭУ - ДМ2, СЭУ - ДМ3, а также датчик текущей мощности нагрузки - ДМ4. Для расчёта условий баланса мощностей и управления каналами преобразования энергии служит устройство управления. С целью передачи диспетчеру сигналов о запуске дизель-генератора, окончании запаса топлива, разряде аккумуляторной батареи (АКБ) и др. используется блок беспроводной передачи.

Вывод по п.3.1-3.2. Предложенные алгоритм и структурная электрическая схема ГСВДЭУ позволяют реализовать адаптивное управление режимами работы с учетом обеспечения баланса мощностей между источниками и приемниками при текущих погодных условиях. Такое управление даёт возможность повысить эффективность преобразования энергии, надёжность энергоснабжения приёмников ПОФХ, а также эффективность использования ресурса самой установки.

3.3 Выбор конструкции ветроэнергетической установки для электроснабжения объектов АПК.

Требуется разработать предложения по выбору типа ветрогенератора в составе САЭ, исходя из анализа характеристик известных устройств. Для

решения задачи необходимо:

- провести анализ характеристик известных типов ветрогенераторов;
- разработать предложения по выбору типа генератора в составе САЭ.

В настоящее время в практике достаточно хорошо известны и широко используются два типа ВЭУ: с горизонтальным и вертикальным расположением осей вращения привода установки [64, 32]. Горизонтальные ВЭУ в сравнении с вертикальными характеризуются бóльшим КПД. Недостатком горизонтальных ВЭУ является необходимость поддержания оси ветрогенератора в направлении ветра. В зависимости от конкретных условий потребляемая мощность электроприемников в составе САЭ составляет от 3 до 15 кВт.

Рабочие свойства ВЭУ оцениваются рядом технических характеристик, основными из которых являются [81, 80, 82, 97]: а) экологичность; б) надежность. в) минимальная эффективная скорость ветра; г) стоимость.

Экологичность. Воздействие на окружающую среду со стороны работающих ВЭУ происходит по трем направлениям: создание аэродинамических шумов, генерирование электромагнитных помех и опасность для перемещения птиц в прилегающем воздушном пространстве. По уровню шума ветрогенераторы с вертикальной осью вращения привода существенно превосходят горизонтально приводные ВЭУ.

Экспериментально доказано, что уровень аэродинамических шумов от горизонтально-пропеллерных установок значительно выше, чем у ВЭУ с вертикальной осью вращения. В частности для горизонтальных ВЭУ он составляет 40÷60 дБ, а для вертикальных- 35÷50 дБ [97]. Это позволяет размещать вертикальные ВЭУ в непосредственной близости от жилых помещений, а также на крыше зданий. На рисунке 2 для сравнения приведены уровни шума соответственно от вертикальных ВЭУ фирмы SokolAirVertical и горизонтальных ВЭУ фирмы Energystock для рядов мощностей 3, 5 и 10 кВт [34, 35].

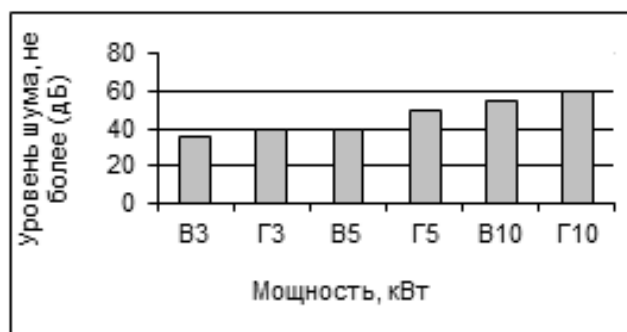


Рисунок 3.2. Уровни шума от вертикальных (В) и горизонтальных (Г) ВЭУ с номинальными мощностями соответственно 3, 5 и 10 кВт

Электромагнитные помехи, создаваемые вертикально-осевыми ВЭУ значительно меньше, чем у ВЭУ горизонтально-осевых [97]. Поэтому их можно размещать вблизи центров, где требования к чистоте эфира достаточно высоки в связи с присутствием навигационного оборудования. Установлено также, что ВЭУ с вертикальной осью вращения для птиц в прилегающем воздушном пространстве, представляют значительно меньшую опасность по сравнению с горизонтальной осью вращения [97].

Надежность. Коэффициент использования энергии ветра для ВЭУ с горизонтальной осью вращения в значительной степени зависит от непрерывной ориентации оси ветрогенератора на изменяющееся направление ветра. Постоянное отслеживание направления ветра обеспечивается системой ориентации, работа которой требует дополнительных энергозатрат [80, 82, 97]. Опыт эксплуатации ВЭУ с горизонтальной осью убедительно доказывает, что до 13% отказов приходится на механизмы в системах ориентации ветроколеса на направление ветра [82]. Отсутствие необходимости отслеживания направления ветра для вертикальных ВЭУ упрощает конструкцию установки, облегчает выполнение комплекса монтажных и наладочных работ и в целом повышает надежность установки.

Минимальная эффективная скорость ветра. Принципиальным отличием вертикальных ВЭУ от горизонтальных является их свойство работать при малых скоростях ветра, начиная со значения 0,3 м/с [80, 82]. Это обстоятельство особенно важно для большинства регионов СНГ, на территории которых слабые ветры имеют место в течение 70-80% времени [54]. На рисунке 3.3 для сравнения приведены значения скоростей срабатывания с места

[15, 16] вышеуказанных фирм и рядов мощностей, а на рисунке 3.4 – значения номинальных оборотов ветрогенераторов.

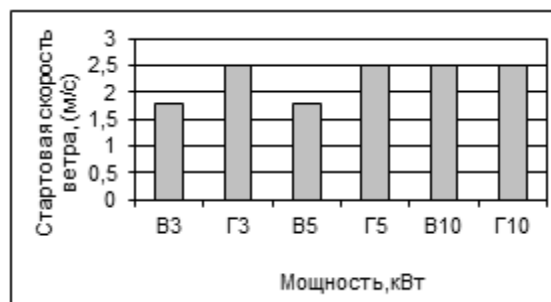


Рисунок 3.3. Значения скоростей страгивания с места вертикальных (В) и горизонтальных (Г) ВЭУ с номинальными мощностями соответственно 3, 5 и 10 кВт

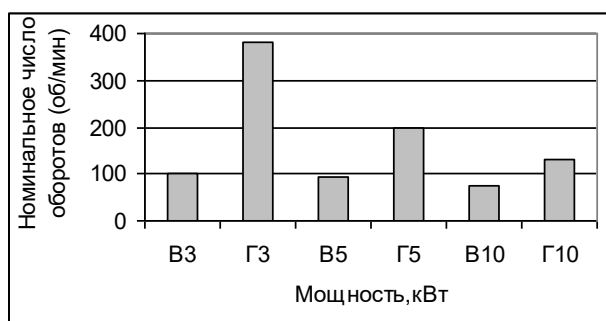


Рисунок 3.4. Значения номинальных оборотов ветрогенераторов вертикальных (В) и горизонтальных (Г) ВЭУ с номинальными мощностями соответственно 3, 5 и 10 кВт

Следовательно, вертикальных ВЭУ имеют свойство вырабатывать в условиях слабых ветров большее количество энергии по сравнению с горизонтальными ВЭУ такой же номинальной мощности.

Стоимость. Сравнение ВЭУ по стоимости показывает, что отличие в цене не является существенным. На рисунке 3.5 для сравнения приведены цены за комплект оборудования ВЭУ вышеуказанных фирм и рядов мощностей [34, 35]. ВЭУ с вертикальной осью вращения на треть дешевле обычных горизонтальных ветряков. При этом эксплуатационные расходы для вертикально-осевых ВЭУ в основном определяются необходимостью смазки в узлах поворотных лопастей [63].

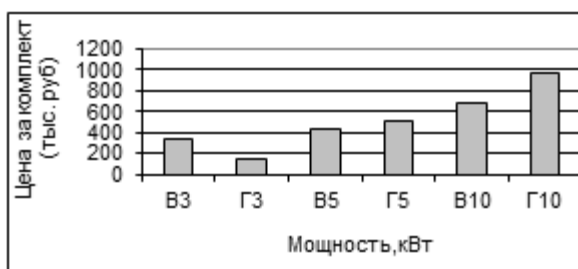


Рисунок 3.5. Цены за комплект оборудования ВЭУ вышеуказанных фирм вертикальных (В) и горизонтальных (Г) ВЭУ с номинальными мощностями соответственно 3, 5 и 10 кВт

Кроме этого, ВЭУ с вертикальной осью вращения позволяют разместить генератор и мультипликатор на фундаменте установки, на разборных мачтах высотой до 4 метров или крышах зданий. Это обеспечивает устойчивость установки, **удобство монтажа и технического обслуживания** при эксплуатации [30, 33].

Выводы по п.3.3. 1. По экологическим свойствам вертикально-осевые ВЭУ имеют существенные преимущества по сравнению с горизонтально-осевыми ВЭУ, поскольку они характеризуются меньшим уровнем аэродинамических шумов и в меньшей степени наносят вред здоровью людей.

2. Вертикально-осевые ВЭУ не нуждаются в непрерывном отслеживании направления воздушного потока и удержании оси ветрогенератора в этом направлении, в результате чего в конструктивном плане они проще и надежнее в эксплуатации.

3. Вертикально-осевые ВЭУ могут эффективно работать при малых скоростях ветра, поэтому они могут широко использоваться на обширных территориях Российской Федерации, где слабые ветры в течение года имеют наибольшую продолжительность по времени.

4. Несмотря на незначительные отличия в стоимости рассматриваемых ВЭУ благодаря свойству вертикально-осевых ВЭУ работать в условиях слабых ветров, они позволяют вырабатывать большее количество энергии и в пересчете на реально выработанную энергию оказываются на треть дешевле горизонтально-осевых.

Таким образом, в составе систем автономного электроснабжения ПОФХ, удаленных от инфраструктуры Госэнергосистемы, в качестве

основных источников целесообразно применять ВЭУ с вертикальной осью вращения вала.

3.4 Выбор мобильных ВЭУ для электроснабжения объектов АПК. Мобильность САЭ ПОФХ существенно зависит от возможности оперативной доставки, монтажа и подготовки к работе ВЭУ на любой рабочей площадке. Следовательно, выбор и обоснование типа ВЭУ как первичного источника энергии является актуальной научно-технической задачей.

Задача формулируется следующим образом. Требуется разработать предложения по выбору типа ветрогенератора в составе мобильной САЭ, исходя из анализа характеристик современных ветроэнергетических установок. Для решения задачи необходимо:

- выполнить анализ условий размещения и эксплуатации ВЭУ;
- выбрать критерии и характеристики для ВЭУ;
- провести анализ характеристик известных типов ветрогенераторов;
- разработать предложения по выбору типа ветрогенератора в составе САЭ ПОФХ.

Анализ условий эксплуатации ВЭУ выполняется на основе решения следующих вопросов:

- среднемесячная и среднегодовая скорости ветра на месте установки ветроагрегата;
- вид нагрузки (среднесуточная и пиковая мощность, периодичность и продолжительность включения нагрузки, необходимость напряжения постоянного и/или переменного токов);
- наличие электросети и ее качество, сохранение частоты и напряжения, бесперебойность электроснабжения;
- доступность места установки ветрогенератора, наличие подъездных путей, возможность подъезда и работы техники для монтажа ветрогенератора;
- возможность работы ветрогенератора с автономной дизельной электростанцией.

Решение первой задачи - выбор ВЭУ для построения энергетической установки - целесообразно выполнять с учётом конкретного географического региона России. Для примера выберем в качестве такого региона Ростовскую область, поскольку анализ ряда источников позволяет сделать вывод о том, что она имеет достаточный для использования потенциал ресурсов ветровой и солнечной энергии [42, 52, 66]. Так карта распределения скорости ветра на высоте 10 м, показанная на рисунке 6, свидетельствует о том,

что средняя скорость ветра в Ростовской области составляет от 3,5 до 5 м/с [42]. Практический интерес представляют сильные ветры (более 15 м/с). Их средняя повторяемость для области составляет 28 дней за год, максимальная – 54 дня [66]. Это позволяют считать Ростовскую область зоной эффективного применения ветроэнергетических установок [42, 52, 66]. В Ростовской области прослеживается следующая закономерность: усиление ветра наблюдается с середины октября по конец апреля, т.е. в осенне-зимний период [52]. Для зимы характерна повышенная средняя месячная скорость ветра 5,3 м/с, летом она снижается до 3,6 м/с, увеличиваясь весной и осенью соответственно до 4,6 и 4,4 м/с [52].

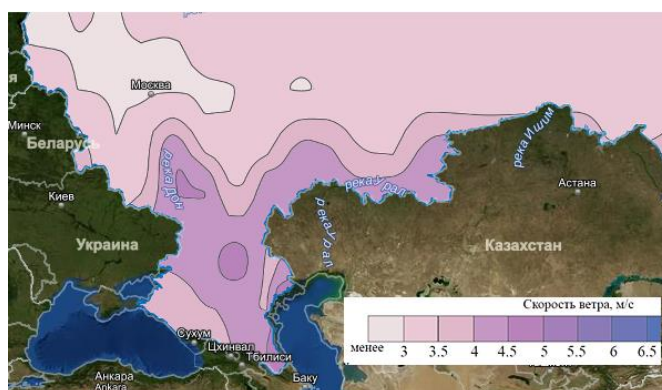


Рисунок 3.6. Карта распределения скорости ветра на высоте 10 м

Характеристика нагрузки. Пусть требуется выполнить электроснабжение теплицы для выращивания ранних овощей. Среднесуточная мощность - 3 кВт, пиковая мощность - 5 кВт, продолжительность включения нагрузки - круглосуточно, напряжение переменного тока должно быть однофазным номиналом 220 В и иметь частоту 50 Гц.

Пусть в месте размещения ВЭУ отсутствует электросеть, место установки ветроагрегата доступно, подъездные пути, возможность подъезда и работы техники для монтажа ветроагрегата ограничены. Кроме этого, накладываются экологические ограничения по уровню шума, который не должен превышать 50 дБ согласно санитарным нормам.

В настоящее время в практике достаточно хорошо известны и широко используются два типа ВЭУ: с горизонтальным и вертикальным расположением осей вращения вала. Эксплуатационные свойства ВЭУ в составе мобильной САЭ ПОФХ с учётом условий Ростовской области целесообразно оценивать с помощью следующих характеристик: экологичность,

надежность, минимальная эффективная скорость ветра, удобство монтажа и технического обслуживания при эксплуатации.

Анализ источников показывает, что уровень шума ветрогенераторов с вертикальной осью вращения существенно ниже, чем у горизонтально приводных ВЭУ. В частности для горизонтальных ВЭУ он составляет 40÷60 дБ, а для вертикальных- 35÷45 дБ [42, 97]. Это позволяет размещать вертикальные ВЭУ в непосредственной близости от жилых помещений, а также на крышах зданий.

Анализ современных ВЭУ с вертикальной осью вращения с учётом указанных выше характеристик позволяет выделить ветрогенератор Maglev, который является одним из лучших в мире по совокупности технических характеристик, он сочетает в себе высокий КПД горизонтальных и преимущества вертикальных ветрогенераторов [15]. Особенность этого верогенератора в том, что в нем использован бесщеточный генератор переменного тока, что уменьшает сопротивление трения, а также комбинация двух роторов Совониуса и Дарье (рисунок 3.7).

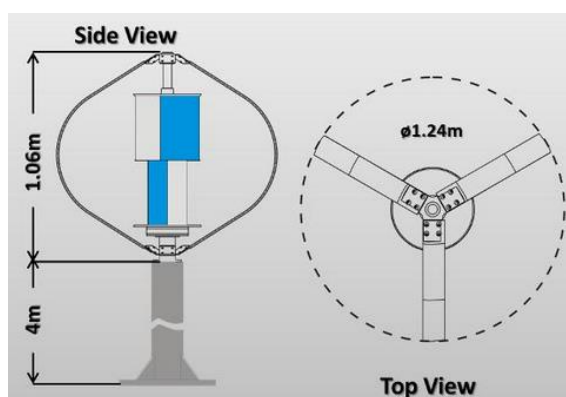


Рисунок 3.7. Конструкция ветрогенератора Maglev 3000

Это обеспечивает страгивание ветрогенератора при скорости ветра 1,5 м/с, и старт генерации при скорости ветра 2-2,5 м/с, что очень важно для Ростовской области, где бывают сравнительно слабые ветра. Например, при скорости ветра 3 м/с он позволяет получить 10-20% номинальной мощности.

За счёт замкнутой формы лопастей и компактности форм ветрогенератор Maglev практически бесшумный, имеет подтверждённую шумовую нагрузку до 20 дБ, электромагнитное излучение и вибрация полностью отсутствуют, поэтому его можно монтировать в непосредственной близости к

жилым помещениям, либо на крышах зданий. Он абсолютно безвреден для птиц, пчел и окружающей среды, может устанавливаться на пути миграции перелетных птиц, в заповедниках. Это отличает его от горизонтальных ветрогенераторов, при использовании которых требуется защита расстоянием из-за повышенной шумности и вибрации [15].

Благодаря вертикальному расположению лопастей для ветрогенератора Maglev не имеет значение резкая смена направления ветра, поэтому его можно использовать в местах с нестабильной розой ветров, он также устойчив к сильным ветрам, заявленная стойкость к ветру до 60 м/с (однако выработка энергии производится в диапазоне скоростей 1-15м/с) [15].

Основным преимуществом вертикального ветрогенератора Maglev является использование технологии магнитной левитации. Горизонтальные генераторы имеют опорный подшипник, а у вертикального ветрогенератора Maglev за счёт принципа магнитной левитации ротор генератора висит в воздухе, поэтому достигается лёгкое страгивание ротора уже при самых малых скоростях ветра. Использование высокоэнергетических магнитов в роторе генератора на основе редкоземельных сплавов дало возможность использования бесщеточного метода снятия энергии, многополюсность расположения магнитов генератора позволяет достигать номинальной мощности на малых оборотах. Ввиду того, что отсутствует механическое трение в опорном подшипнике, нет необходимости в замене щеток генератора и его обслуживании. Это делает данный генератор очень надежным и не требует технического обслуживания до 20 лет (в зависимости от интенсивности ветров) [15]. На выходе генератор выдаёт трёхфазный ток переменного напряжения. Ветрогенератор Maglev имеет универсальную и простую структуру, спроектированную для облегчения транспортировки и возведения, а также требует минимум места для размещения [15].

Интерес представляет вертикально-осевая ветровая турбина Болотова (ВРТБ), которая имеет неподвижный направляющий аппарат и расположенный внутри него вращающийся ротор, образующие модуль турбины. Вал ротора непосредственно соединяется с электрическим генератором, как показано на рисунке 3.8 [67].

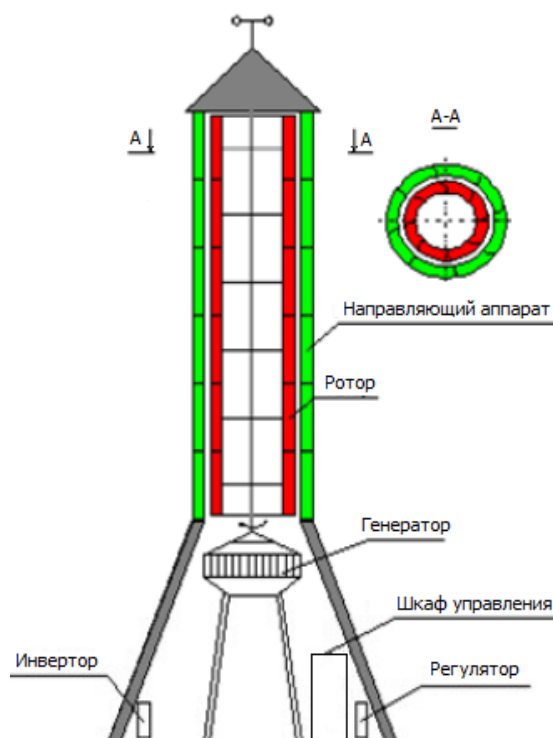


Рисунок 3.8. Конструкция вертикально осевой ветровой турбины Болотова

Ветрогенератор на базе ВРТБ обладает следующими достоинствами [67]:

- развивает мощность независимо от направления ветра;
- низкая стартовая скорость ветра благодаря функции контрвращения;
- способен работать на ветрах малой скорости, сильных и порывистых с быстро меняющимися параметрами, неприхотлив в любых погодных условиях;
- модульный принцип конструкции позволяет при необходимости изменять мощность за счёт изменения числа установленных модулей или генератора;
- генератор соединён с ротором непосредственно без редуктора;
- экологически безопасен, может находиться в непосредственной близости с человеком, что исключает необходимость строительства дорогостоящих линий электропередач и трансформаторных подстанций;
- требует меньшей площади (по сравнению с горизонтально-осевыми ВЭУ) для создания многоагрегатных ветровых электростанций;
- прост в конструкции, монтаже и технической эксплуатации.

Технические характеристики ВРТБ с установленной мощностью 5 кВт следующие. Стартовая скорость ветра — 0.5 м/с; диапазон рабочих скоростей ветра — 2-45 м/с, ветроустойчивость — 54 м/с. Уровень шума при 8 м/с — 35 дБ. Рабочий диапазон температур -50 +60 С°. Масса — 2200 кг. Высота — 11 м. Площадь, занимаемая турбиной — 25 м², радиус крепления растяжек — 8 м. [31].

Выводы по п.3.4.1. В составе мобильной гибридной энергетической установки для электроснабжения объектов фермерского хозяйства Ростовской области по критериям наилучшей экологичности; высокой надежности, минимальной эффективной скорости ветра целесообразно использовать современные вертикально осевые ветрогенераторы Maglev и ВРТБ.

2. Модульное построение, простота конструкции, монтажа и технического обслуживания при эксплуатации указанных ветрогенераторов позволяет их использовать в качестве основного источника энергии для электроснабжения объектов фермерского хозяйства.

3.5 Разработка конструкции ВЭУ с улучшенными технико-экономическими характеристиками для электроснабжения объектов АПК.

В работе [74] предложена полезная модель устройства, преобразующего кинетическую энергию ветрового потока в механическую энергию, и которая может быть использована для получения электрической энергии. Устройство может найти применение в качестве автономного, а также резервного источника электроэнергии для объектов автономного энергообеспечения, например, производственных комплексов сельского хозяйства. Задача предлагаемого устройства - повышение срока безопасной эксплуатации с одновременным устранением низкочастотной вибрации и повышением устойчивости устройства за счёт создания жёсткой конструкции, закрепления ротора, по меньшей мере, в двух под-шипниковых узлах, а также возможности снижения центра масс устройства путём установки генератора ЭДС.

Технический результат - упрощение технологии эксплуатации и повышение эффективности использования энергии ветра.

Сущность полезной модели заключается в том, что устройство для преобразования кинетической энергии в механическую энергию, содержащее раструб, выполненный в виде усечённого конуса или цилиндра, переходящего в усечённый конус, и расположенный в нём по его вертикальной оси ротор, выполненный в виде вала с закреплённым на нём посредством

соединительных дисков лопастями с частичным выступом их из нижней части раструба, при этом раструб устанавливается на опорах, по меньшей мере, трёх, на уровне верхнего среза раструба в горизонтальной плоскости устанавливается жёстко связанная с раструбом силовая крестовина, в центре которой размещается подшипниковый узел, в котором закрепляется вал ротора с возможностью вращения, на уровне нижней части опор раструба в горизонтальной плоскости устанавливается жёстко связанная с опорами силовая крестовина, в центре которой размещается подшипниковый узел, в котором закрепляется вал ротора с возможностью вращения;

- генератор ЭДС устанавливается на силовой крестовине на уровне нижней части опор раструба в горизонтальной плоскости, при этом ротор генератора ЭДС жестко связан с валом ротора;

- габаритные размеры генератора ЭДС ограничены опорами раструба.

Таким образом, закрепление ротора, по меньшей мере, в двух подшипниковых узлах, жёстко связанных с раструбом, позволит уменьшить возникающую низкочастотную вибрацию. Кроме этого, технический результат достигается размещением генератора ЭДС вне раструба на силовой крестовине на уровне нижней части опор раструба в горизонтальной плоскости, при этом его ротор жестко связан с валом ротора. Это обеспечивает снижение сопротивления воздушному вихрю в цилиндрической части раструба, повышение устойчивости вращающихся масс ветроэлектрической установки благодаря снижению её центра масс. Кроме этого, размещение генератора ЭДС вне раструба на силовой крестовине на уровне нижней части опор раструба в горизонтальной плоскости позволяет увеличить габаритные размеры генератора, не увеличивая габаритные размеры самого устройства (габаритные размеры генератора ЭДС ограничены только опорами раструба). Это даёт возможность выполнить индуктор многополюсным, увеличить число витков в фазных обмотках якоря и на этой основе получить максимально возможную ЭДС при работе устройства при любом ветре. Таким образом, достигается более эффективное использование энергии ветра.

Сущность полезной модели поясняется рисунками 3.9 и 3.10, где на рисунке 3.9 представлена предлагаемая конструкция устройства для преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию, на рисунке 10 представлен вид сверху на предложенное устройство.

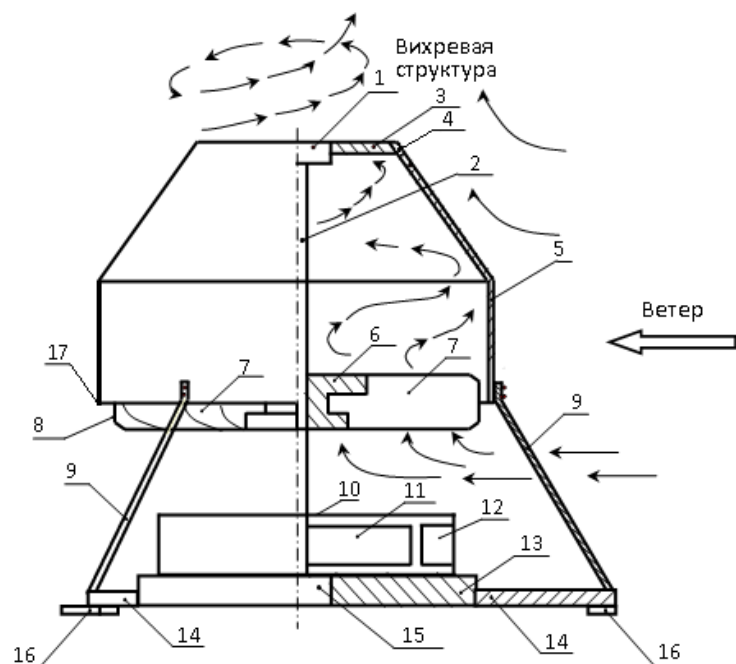


Рисунок 3.9. Конструкция устройства для преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию

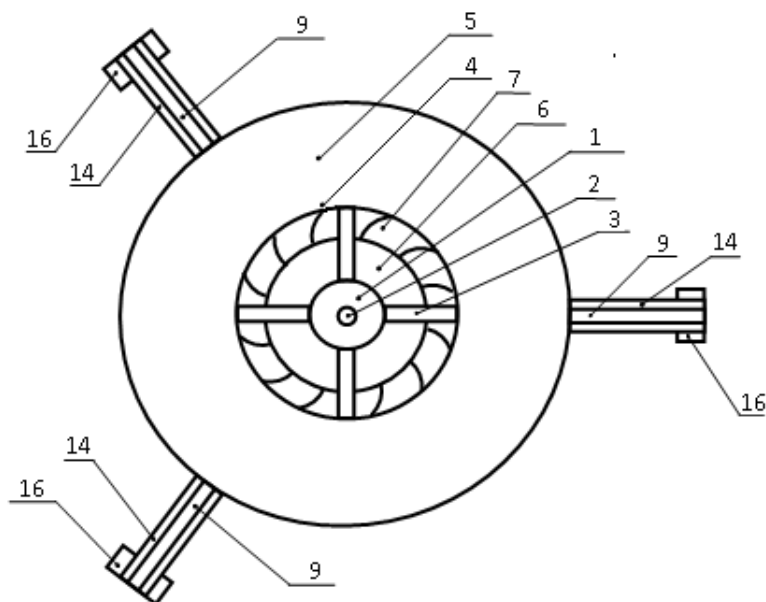


Рисунок 3.10. Вид сверху устройства для преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию

Устройство для преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию содержит раструб 5, выполненный в виде усечённого конуса или цилиндра, переходящего в усечённый конус, и расположенный в нём по его вертикальной оси ротор, выполненный в виде вала 2 с закреплённым на нём посредством соединительных дисков 6 лопастями 7 с частичным выступом 8 их из нижней части раструба 5. Кроме этого, указанный раструб 5 устанавливается на опорах 9 с подпятниками 16, по меньшей мере, трёх по условиям устойчивости, на уровне верхнего среза 4 раструба 5 в горизонтальной плоскости устанавливается жёстко связанная с раструбом 5 силовая крестовина 3, в центре которой размещается подшипниковый узел 1, в котором закрепляется вал 2 ротора с возможностью вращения, на уровне нижней части опор 9 раструба 5 в горизонтальной плоскости устанавливается жёстко связанная с опорами 9 посредством силовых элементов конструкции 14 силовая крестовина 13, в центре которой размещается подшипниковый узел 15, в котором закрепляется вал 2 ротора с возможностью вращения. При этом высота опор 9 раструба 5 определяется возможностью прохождения воздуха. Генератор ЭДС 10 с индуктором 11 и якорем 12 устанавливается на силовой крестовине 13 на уровне нижней части опор 9 раструба 5 в горизонтальной плоскости, ротор генератора ЭДС 10 жестко связан с валом 2 ротора, а габаритные размеры генератора ЭДС 10 определяются возможностью получения максимально возможной ЭДС и ограничены опорами 9 раструба. Раструб 5 имеет нижний срез 17.

Работа заявленной полезной модели. При обдуве ветром лопастей 7 ротора вал 2 ротора начинает вращаться, создавая перепад скоростей слоёв воздуха в пространстве между нижним 17 и верхним 4 срезами раструба 5, в результате чего возникает устойчивый вихревой воздушный поток, который обеспечивает преобразование энергии ветра в механическую энергию вращения ветроколеса, содержащего диск 6 и лопасти 7- и вала 2 ротора. Вал 2 ротора через подшипниковый узел 15 связан с силовой крестовиной 13 на уровне нижней части опор 9 раструба 5. Благодаря этому снижаются вибрации в вертикальной плоскости по причине исключения реакций со стороны опор 9 на раструб 5 в вертикальной плоскости.

Раструб 5 устанавливается на опорах 9, по меньшей мере, трёх по условиям устойчивости, например, при трёх опорах угловое расстояние между ними целесообразно выбрать 120°; при четырёх опорах 90° и т.д.

Снижение вибраций и уменьшение колебаний вала 2 в горизонтальной плоскости обеспечивается подшипниковым узлом 1, соединяющим вал 2

ротора с силовой крестовиной 3, которая жёстко связана с раструбом 5 на уровне верхнего среза 4 раструба.

При работе конструкции заявленной полезной модели достигается повышение эффективности использования энергии ветра за счёт того, что генератор ЭДС 10 устанавливается вне раструба 5 на силовой крестовине 13 на уровне нижней части опор 9 раструба 5 в горизонтальной плоскости, при этом его ротор жестко связан с валом 2 ротора. Благодаря этому движение вихревого воздушного потока во внутренней полости раструба 5 не встречает на своем пути сопротивления, обусловленного корпусом генератора ЭДС 10, чем достигается более полное использование энергии ветра и повышение эффективности устройства. Дополнительно к этому такое пространственное расположение генератора ЭДС 10 уменьшает высоту центра масс всех вращающихся элементов и в целом всей конструкции устройства, что повышает её устойчивость. Кроме этого, размещение генератора ЭДС 10 вне раструба 5 на силовой крестовине 13 на уровне нижней части опор 9 раструба 5 в горизонтальной плоскости позволяет увеличить габаритные размеры генератора ЭДС 10, не увеличивая габаритные размеры самого устройства (габаритные размеры генератора ЭДС 10 ограничены только опорами 9 раструба 5). Это даёт возможность выполнить индуктор 11 многополюсным, увеличить число витков в фазных обмотках якоря 12 и на этой основе получить максимально возможную ЭДС при работе устройства при любом ветре.

Вывод по п. 3.5.Предложенная конструкция ВЭУ позволяет получить следующие результаты:

- снижение низкочастотной вибрации и повышение устойчивости устройства за счёт создания жёсткой конструкции, закрепления ротора, по меньшей мере, в двух подшипниковых узлах, а также возможности снижения центра масс устройства путём установки генератора ЭДС;

- размещение генератора ЭДС вне раструба на силовой крестовине на уровне нижней части опор раструба в горизонтальной плоскости позволяет увеличить габаритные размеры генератора, не увеличивая габаритные размеры самого устройства. Это даёт возможность выполнить индуктор многополюсным, увеличить число витков в фазных обмотках якоря и на этой основе получить максимально возможную ЭДС при работе устройства при любом ветре. Таким образом, достигается более эффективное использование энергии ветра.

Глава 4. Методический подход к построению динамической модели посадки воздушного судна в различных метеорологических условиях

В настоящее время задача повышения качества метеорологического обеспечения при управлении метеозависимыми авиационными военными формированиями является одной из основных задач прикладной метеорологии. Ее решение может быть найдено путем совершенствования существующих и построения новых способов прогноза погоды [57]. Однако прогнозирование метеоусловий с высокой степенью соответствия полученных данных фактической погоде вряд ли возможно в обозримом будущем. Данный факт ставит проблему рационального использования имеющейся метеоинформации [59]. Одним из путей разрешения вышеуказанной проблемы является построение динамической системы «летчик – воздушное судно (ВС) – окружающая среда» с целью моделирования процесса посадки ВС в различных метеорологических условиях и получения численных значений риска, возникающего при этом [57]. Наличие в данной ситуации метеорологической неопределенности [57], а также неопределенности, связанной с действиями пилота, работой техники и т.д., приводит к нелинейности исследуемой динамической системы. Следует отметить, что построение вышеуказанной динамической системы позволит выявить влияние основной совокупности факторов и причин, определяющих меру возникающего риска при выполнении посадки воздушного судна в различных метеорологических условиях.

Внутренними характеристиками исследуемой динамической системы являются формализованные данные об уровне подготовки летчика и технических возможностях ВС. Внешними факторами, оказывающими влияние на систему, являются метеорологические условия, а также другие факторы, связанные, в частности, с состоянием аэродрома, готовностью наземной системы посадки, подготовкой лиц группы руководства полетами и т.д. Такая динамическая система является нелинейной и гиперчувствительной к вышеперечисленным влияющим внешним факторам. При описании функционирования системы, естественно, возникают трудности формализации сложных причинно-следственных связей отдельных ее элементов между собой и с внешней средой, что приводит к необходимости построения такой системы на базе теории детерминированного хаоса [101].

В рамках данной теории динамику численных значений риска,

возникающего при выполнении посадки ВС в различных метеорологических условиях, предлагается формализовать с помощью рекуррентного соотношения П. Ферхюльста (1), свойства которого демонстрируют универсальность во многих природных и социальных детерминированно-хаотических явлениях [101].

$$P_{t+1} = kP_t(1 - P_t), \quad (1)$$

где P_{t+1} и P_t – вероятности возникновения аварийной ситуации в моменты времени $t+1$ и t , соответственно; k – управляющий параметр, являющийся синтезированным показателем влияния внутренних, внешних воздействий на систему и их взаимосвязи между собой.

Единицы измерения дискретных моментов времени (минуты или секунды) t , $t+1$, $t+2$ и т.д. в соотношении (1) выбираются в зависимости от требований лица, принимающего решение, и этапа выполнения посадки ВС с целью адекватного представления текущей системной ситуации.

Анализ соотношения (1) показывает, что моделирование вероятности возникновения аварийной ситуации при посадке ВС в диапазоне значений $0 \leq P \leq 1$ возможно только в том случае, если численные значения управляющего параметра $k \in [0, 4]$. Экспериментальные исследования показывают, что количество итераций, необходимое для установившегося движения динамической системы, представленной соотношением (1), составляет 55 – 60. Очевидно, что применительно к процессу выполнения посадки ВС $t \approx 60$ секунд, в течение которых летчик визуально и по приборам наблюдает метеоусловия посадки, принимает и обрабатывает поток необходимой информации от руководителя полетов, выполняет снижение от четвертого разворота, дальнего приводного радиомаркера и т.д. до точки касания на взлетно-посадочной полосе (ВПП).

Бифуркационная диаграмма соотношения (1) представлена на рисунке. На этом же рисунке внизу схематично представлена глиссада посадки ВС.

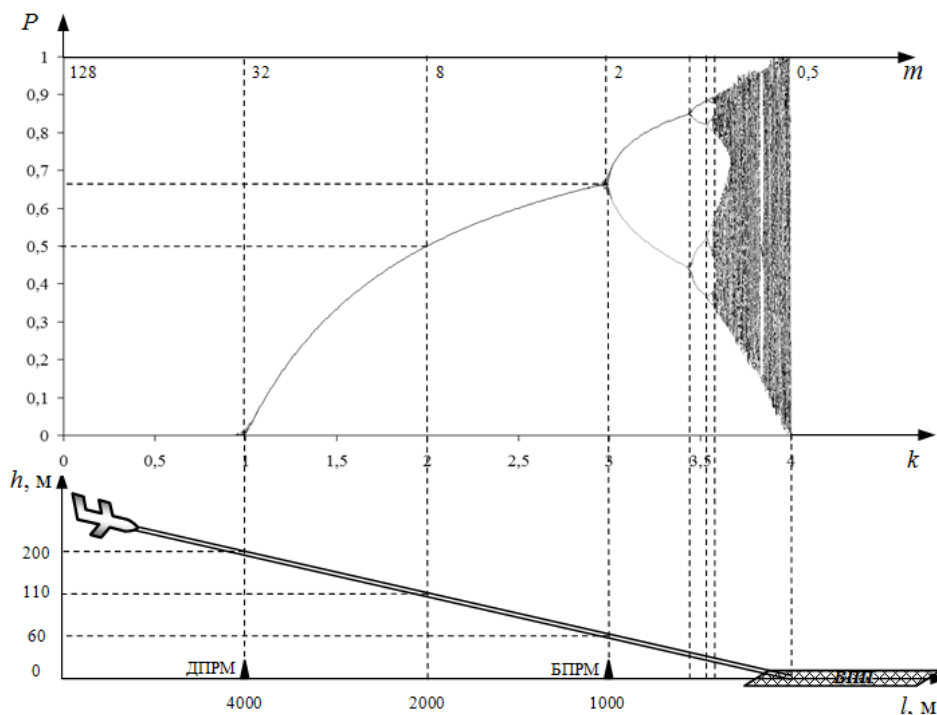


Рисунок 4.1. Бифуркационная диаграмма процесса посадки ВС (ДПРМ и БПРМ – дальний и ближний приводной радиомаркер соответственно)

Анализ бифуркационной диаграммы дает возможность сделать следующие выводы.

1. При значениях $0 \leq k < 1,0$ на каждой последующей итерации параметр $P_{n>60}$, вне зависимости от начального значения P_0 , принимает свое минимальное, единственное и устойчивое во времени значение – ноль. Применительно к посадке ВС данный интервал следует интерпретировать как «норма».

2. При $1,0 \leq k < 3,0$ происходит первое качественное изменение в эволюции рассматриваемой системы. Неподвижная точка теряет свою нулевую устойчивость, оставаясь в то же время единственной. Теперь устойчивость движения системы определяется одним из равновесных состояний, к которым стремится параметр $P_{n>60}$ в зависимости от внешнего управляющего параметра k . Интервал $1,0 \leq k \leq 2,0$ интерпретируется как «риск», а $2,0 < k < 3,0$ – как «компенсируемый кризис».

3. В точке $k = 3,0$ происходит второй качественный скачок в эволюции рассматриваемой системы – бифуркация состояний. При $3,0 \leq k \leq 3,449499$ параметр $P_{n>60}$ на каждой последующей итерации стремится попеременно к

одной из двух точек, характеризующих два устойчивых состояния. Дальнейшее развитие системы проходит через каскад постоянно удваиваемых устойчивых периодических точек периода $f = 2^i$ ($i = \overline{1, N}$). При $k = 3,569946$ количество бифуркаций считается бесконечным [21], и система переходит в состояние хаоса (сценарий Фейгенбаума). Поэтому интервал $3,0 \leq k \leq 4,0$ и интерпретируется как «некомпенсируемый кризис».

Если предположить, что значения параметра k связаны с метеорологическими условиями, оказывающими наиболее значимое влияние на выполнение посадки (высотой нижней границы облаков (H) и метеорологической дальностью видимости (S)), то при усложнении последних количество информации, получаемое летчиком уменьшается, и значения параметра k увеличиваются.

Из рисунка видно, что с увеличением численных значений управляющего параметра k вероятность возникновения аварийной ситуации также увеличивается. Интервал численных значений $0 \leq k \leq 1$, при котором вероятность возникновения аварийной ситуации стремится к нулю, соответствует метеоусловиям, к полету в которых летчик подготовлен. Численные значения H и S находятся в диапазоне от простых метеорологических условий до минимума командира ВС и соответствуют «нормальным» условиям посадки.

Пусть случай $k=1$ соответствует минимуму командира ВС 100×1 ($H=100$ м и $S=1$ км). В такой ситуации летчик использует имеющуюся у него обучающую информацию, емкость которой обозначается как C_0 . То есть C_0 является информационной емкостью решающей системы летчика.

Информационная емкость сообщения, получаемого в процессе выполнения посадки, обозначается как C [21]. В этом случае численные значения параметра k , приобретающего физический смысл коэффициента редуцирования метеоинформации, вычисляются с использованием выражения

$$k = \frac{C_0}{C}. \quad (2)$$

Таким образом, при $k=1$ информационные емкости сообщения и обучающей базы данных летчика совпадают, наблюдается автокорреляционная обработка информации, и вероятность возникновения аварийной ситуации при посадке, как и при $0 \leq k < 1$, стремится к нулю.

Интервал значений $1 < k \leq 2$ соответствует ухудшению метеоусловий до значений ниже минимума командира ВС. В данном интервале наблюдается двукратная потеря информационной емкости сообщения об условиях посадки, и вероятность возникновения риска увеличивается до значений 0,5.

Уменьшение информационной емкости сообщения происходит в том случае, если по причине сложных метеорологических условий летчик на высоте 100 м (удалении до ВПП ≈ 2000 м) не установил визуальный контакт с ВПП.

Согласно инструкции экипажу, если при выполнении посадки ВС летчик до высоты принятия решения 60 м не установил визуальный контакт с ВПП, то он обязан прекратить снижение и выполнить уход на следующий круг или запасной аэродром. Однако могут возникнуть экстренные ситуации, требующие дальнейшего выполнения посадки даже в неприемлемых, относительно существующих критических значений, метеорологических условиях. Такие ситуации могут быть обусловлены критической неисправностью ВС, спасением людей, терпящих бедствие, выполнением военных специальных задач и т.д. При этом принятие положительного решения на выполнение посадки в таких условиях должно быть обосновано не только важностью вышеуказанных причин, но и способностью командира ВС и лиц группы руководства полетами (ГРП) оперативно использовать имеющуюся специфическую информацию об особенностях функционирования динамической системы «человек – машина – окружающая среда». Вышеуказанная специфическая информация представляет собой сведения об опыте и уровне подготовки командира ВС, наличии или отсутствии на ВПП огня высокой интенсивности (ОВИ), способных улучшить посадочную видимость, сведения о совершенстве бортового и наземного навигационного оборудования и т.п. Вся эта информация учтена в исследуемой динамической метеозависимой системе [59].

В интервале значений $2 < k < 3,45$ процесс посадки ВС развивается в условиях «компенсируемого кризиса». Здесь вероятность возникновения аварийной ситуации увеличивается до 0,66 при $k = 3,0$. Такая ситуация при посадке наблюдается в том случае, если летчик при снижении вплоть до высоты принятия решения 60 м все еще не установил визуальный контакт с ВПП. Результаты дальнейшего анализа бифуркационной диаграммы, представленной на рисунке, свидетельствуют о следующем. В точке $k = 3,0$ происходит качественный скачок в эволюции рассматриваемой системы – бифуркация (ветвление) состояний. При дальнейшем увеличении параметра k вплоть до следующего критического значения движение будет характеризоваться двумя устойчивыми равновесными состояниями, выбор которых системой осуществляется в строгом соответствии с заданными начальными условиями. При этом даже незначительные отклонения в выборе значений P_0 приводят в будущем моменте времени t к смене системой одного

устойчивого состояния на другое. Применительно к посадке ВС можно говорить о том, что даже в таких сложных метеоусловиях, когда ниже высоты принятия решения на удалении от ВПП менее 1000 м ситуация может развиваться не только аварийно, но и благоприятно. Успешному развитию ситуации при выполнении посадки будут способствовать различные мероприятия, выполняемые как летчиком, так и лицами ГРП (например, включение ОВИ на ВПП).

Дальнейшее движение динамической системы при увеличении управляющего параметра k проходит через каскад постоянно удваиваемых устойчивых периодических состояний периода $f = 2^i$ ($i = \overline{1, N}$), где N – порядковый номер бифуркации. Так, при $k = 3,449499$, $f = 4$; при $k = 3,544090$, $f = 8$; при $k = 3,564407$, $f = 16$, и так вплоть до значения $k = 3,569946$, когда количество бифуркаций уже считается бесконечным. Удвоение периода устойчивых состояний является одним из сценариев перехода системы в состояние хаоса (сценарий Фейгенбаума) [101]. В этой связи интервал значений $3,45 < k \leq 4$ соответствует сценарию посадки ВС в условиях «некомпенсируемого кризиса», когда исследуемая динамическая система полностью теряет устойчивость и переходит из состояния детерминированного в состояние полного хаоса. В такой ситуации, когда ВС находится на высоте менее 30 м и удалении от ВПП менее 300 м (ниже минимума самолета), а летчик все еще не установил визуальный контакт с ВПП, вероятность возникновения аварийной ситуации при посадке стремится к единице, и только счастливое стечение обстоятельств поможет выполнить посадку успешно.

Возвращаясь к информационной емкости сообщений, воспринимаемых глазом усредненного наблюдателя, которая подробно изучалась в работе [21], следует отметить, что C зависит не только от дифракционных ограничений, но и от отношения сигнал/шум зрительного аппарата летчика, а также от структуры отражающей поверхности. Поскольку ВПП имеет постоянную структуру отражения, а дифракционные ограничения глаза летчика также существенно не изменяются, то убыль информационной емкости сообщения уменьшается в зависимости от отношения сигнал/шум при ухудшении метеоусловий.

Экспериментально доказано [21], что разрешающая способность глаза и информационная емкость сообщения практически не меняются при отношении сигнал/шум $m \geq 32$, что и является границей нормы при $k = 1$. При $m = 8$ половина испытуемых [21] распознала изображение, что соответствует

вероятности возникновения риска при посадке ВС $P=0,5$ и $k=2$. При $m=2$ только одна третья часть испытуемых правильно распознала изображение, что соответствует случаю $P=0,33$ и $k=3$.

Этих данных достаточно, чтобы различным значениям k поставить в соответствие значения отношения сигнал/шум m (приведены на рисунке сверху), которые рассчитываются по эмпирической формуле [21]:

$$m = \frac{128}{2^{2k}}. \quad (3)$$

Таким образом, вероятность возникновения риска при выполнении посадки ВС стремится к единице при отношении сигнал/шум $m \leq 1$.

Применение предложенного методического подхода позволило выявить тот факт, что вероятность успешной посадки ВС при стохастическом влиянии метеофакторов имеет сложную бифуркационную зависимость от этих факторов, минимумов погоды пилота и ВС по нижней границе облаков и посадочной видимости.

Использование прогностических метеорологических данных как входных параметров динамической модели дает возможность при организации и проведении полетов осуществить предварительную оценку вероятности успешной посадки ВС и на базе полученной информации спланировать мероприятия по исключению случаев возникновения аварийной ситуации.

Применение фактических метеорологических данных обеспечивает возможность учета динамики ухудшения погодных условий при определении вероятности успешной посадки ВС. С этой целью бортовой компьютер ВС должен использовать формализованные данные о метеоусловиях, сопоставление которых обеспечивает пилота информацией об условиях функционирования системы «человек – машина – окружающая среда», соответствующих четырем рангам: норма, риск, компенсируемый кризис, некомпенсируемый кризис. В зависимости от этих условий, командир ВС принимает решение на посадку.

Таким образом, применение предложенного подхода к построению динамической модели на практике обеспечивает количественную оценку метеорологического риска, возникающего при посадке ВС, что позволяет минимизировать вероятность возникновения аварийной ситуации, обусловленной наличием метеорологической неопределенности.

В настоящее время эффективность и безопасность полетов авиации все еще продолжают во многом зависеть от метеорологических условий, в которых принимаются управленческие решения на выполнение тех или иных

авиационных задач (АЗ). Сложность принятия метеозависимых решений заключается не только в необходимости учета фактических условий погоды, но и в необходимости использования прогностических метеоданных [50]. Если же еще учитывать неоднозначность влияния одних и тех же метеорологических условий для различных уровней подготовки летчика, аэродрома, технических возможностей авиационной техники, то возникает необходимость построения системы поддержки принятия метеозависимых решений (СППМР) в помощь лицу, принимающему решение (ЛПР) на выполнение АЗ [50].

Существующий процесс принятия решений, учитывающий стохастическое влияние ряда метеофакторов, реализуется, в основном, на базе метеорологических прогнозов общего назначения. В этом случае ЛПР делает заключение о целесообразности или невозможности безопасного выполнения АЗ путем сравнения количественных оценок состояния погоды с соответствующими критическими значениями. Эффективность принимаемых решений, связанных с использованием данного подхода, будет максимальной только в том случае, если ЛПР располагает идеальной прогностической информацией о будущем состоянии погодных условий и знанием точных механизмов воздействия этих условий на функционирование авиационных систем (АС) [50]. Однако, как известно, регулярное составление идеальных прогнозов погоды является очень сложной задачей, решение которой вряд ли возможно в обозримом будущем. Кроме того, в условиях боевых действий, в отличие от мирного времени, могут быть поставлены АЗ особой важности, требующие своего выполнения даже в неприемлемых, относительно существующих критических значений, погодных условиях [59]. Стратегия ЛПР, подразумевающая принятие положительного решения на выполнение боевой АЗ в условиях повышенной опасности, связанной с метеоусловиями, должна быть оправдана не только важностью самой АЗ, но и способностью к проведению комплекса мероприятий, направленных на снижение возникшего метеорологического риска. Реализация таких мероприятий может быть осуществима только в том случае, если ЛПР располагает дополнительной специфической информацией об особенностях функционирования АС в условиях высокой динамичности метеорологических и других внешних воздействий [21]. Данный факт требует исследования новых подходов к гидрометеорологическому обеспечению боевых действий ВВС и процессу принятия решения на выполнение АЗ, основанных на новых математических идеях.

Рассматривая процесс выполнения АЗ, необходимо выделить систему «летчик – воздушное судно (ВС) – окружающая среда». Внутренними параметрами такой системы являются формализованные данные об уровне подготовки летчика и технических возможностях ВС. Внешними параметрами, оказывающими влияние на рассматриваемую систему, являются метеорологические условия, а также другие внешние воздействия, связанные с состоянием аэродрома, готовностью наземной системы посадки, подготовкой лиц группы руководства полетами и т.д. Такая система является открытой, динамической, нелинейной. Ее функционирование подчиняется сложным причинно-следственным связям внутренних элементов системы между собой и с внешней средой, что приводит к необходимости поиска устойчивых и безопасных режимов функционирования системы на основе использования количественных и качественных методов теории детерминированного хаоса [2].

Таким образом, целью работы является обоснование методических аспектов построения СППМР на базе теории детерминированного хаоса. В таких условиях построение системы будет иметь ряд особенностей. Главная особенность заключается в том, что для достижения желаемых (эффективных и безопасных) динамических состояний исследуемой АС построение управления должно основываться на принципе компенсации возмущений. В соответствии с этим принципом управление системой обеспечивает полную компенсацию воздействий внешней среды (метеорологических условий).

Известно, что системы, в которых достигается полная компенсация, называются инвариантными. В них управляющее воздействие поступает в объект управления одновременно с воздействием внешней среды, нейтрализуя его. Однако в открытых системах предусмотреть все возможные возмущения затруднительно. Кроме того, функциональные зависимости между возмущающими и управляющими воздействиями могут быть неизвестны. Поэтому управление динамической системой по возмущениям с неполной информацией приводит к накоплению ошибок.

С целью минимизации негативного влияния данного факта необходимо проведение качественного анализа уравнений динамики системы с точки зрения установления наличия устойчивых инвариантных множеств (аттракторов), являющихся областями притяжения в фазовом пространстве характеристик функционирования (эволюции) системы [61].

Основной задачей является построение управления АС, обеспечивающего существование инвариантного множества M , обладающего

требуемыми в приложении свойствами. Если понимать под инвариантным множеством определенный режим функционирования управляемой АС, то задача управления формулируется как нахождение управления, обеспечивающего устойчивость заданного режима системы. Установление границ инвариантного множества M системы является важнейшей задачей, так как на практике – это множество возможных состояний управляемой системы после стабилизации [58].

В классической теории управления достаточно хорошо изучены вопросы динамики управляемых систем с инвариантным множеством. Но в постановке задачи, учитывающей переход режима функционирования системы в состояние детерминированного хаоса, например через серию бифуркаций по сценарию Фейгенбаума [58], ставится вопрос об изучении такой системы в нескольких положениях равновесия, когда множество точек покоя не связно, а сами точки могут быть неустойчивыми.

Исходя из вышесказанного, построение СППМР и управления АС, основанной на аттракторах, является в настоящее время актуальной проблемой. Несмотря на сложность поведения хаотических (странных) аттракторов, знание фазового пространства позволяет представить поведение системы в геометрической форме и, соответственно, предсказать его. И хотя нахождение системы в конкретный момент времени в конкретной точке фазового пространства практически невозможно, область нахождения объекта и его стремление к аттрактору предсказуемы. Ранее такие системы в задачах управления не рассматривались.

Следовательно, построение предполагаемого алгоритма управления в АС в условиях управляемого хаоса должно осуществляться следующим образом.

После определения факторов, влияющих на принятие решения ЛПР проводится их анализ, который включает в себя решение ряда задач, основными из которых являются задача оценивания качества получаемого решения и задача содержательной интерпретации факторов.

Для осуществления последней, часто возникает необходимость преобразования (вращения) факторов только после выполнения, которого они могут считаться окончательно определенными и, следовательно, по отношению к ним целесообразно решить задачу оценивания качества полученного решения.

Сущность задачи вращения сводиться к следующему. Необходимо вращать факторы таким образом, используя подходы теории фракталов, чтобы

как можно больше коэффициентов факторных нагрузок оказывались нулевыми и, следовательно, наблюдаемые признаки зависели бы от возможно меньшего числа факторов, а также чтобы нулевые нагрузки оказывались максимально возможными.

Алгоритм управления в АС с обратной связью задается функциональной зависимостью управления от выхода или состояния системы (управление с обратной связью). Так, например, в рамках теории детерминированного хаоса динамику численных значений риска, возникающего при выполнении посадки ВС в различных метеорологических условиях, предлагается formalизовать с помощью рекуррентного соотношения Ферхюльста, свойства которого демонстрируют универсальность во многих природных и социальных детерминированно-хаотических явлениях. При этом были получены зависимости численных значений метеорологического риска P от различных значений высоты нижней границы облаков и метеорологической дальности видимости, учет которых осуществлен путем использования внешнего управляющего синтезированного параметра k . Бифуркационная диаграмма соотношения Ферхюльста представлена в верхней части рис. 1.

Другой вид фракталов – фрактал Мандельброта, порожденный одномерными комплексными эндоморфизмами вида

$$z_{n+1} = f(z_n), \quad \forall \quad n = \overline{1, N} \quad (1)$$

с простой функцией на комплексной плоскости $\mathbb{C}$ – $f(z) = z^2 + c$, где N – количество итераций, c – ненулевая константа [4, 6].

Фрактал Мандельброта состоит из множества таких точек c на комплексной плоскости $\mathbb{C}$, для которых итеративная последовательность

$$z_0 = 0, \quad z_{n+1} = z_n^2 + c \quad (2)$$

не уходит на бесконечность (нижняя часть рис. 1). Его фрагменты не строго подобны исходному множеству, но при многократном увеличении определенные части все больше похожи друг на друга [58].

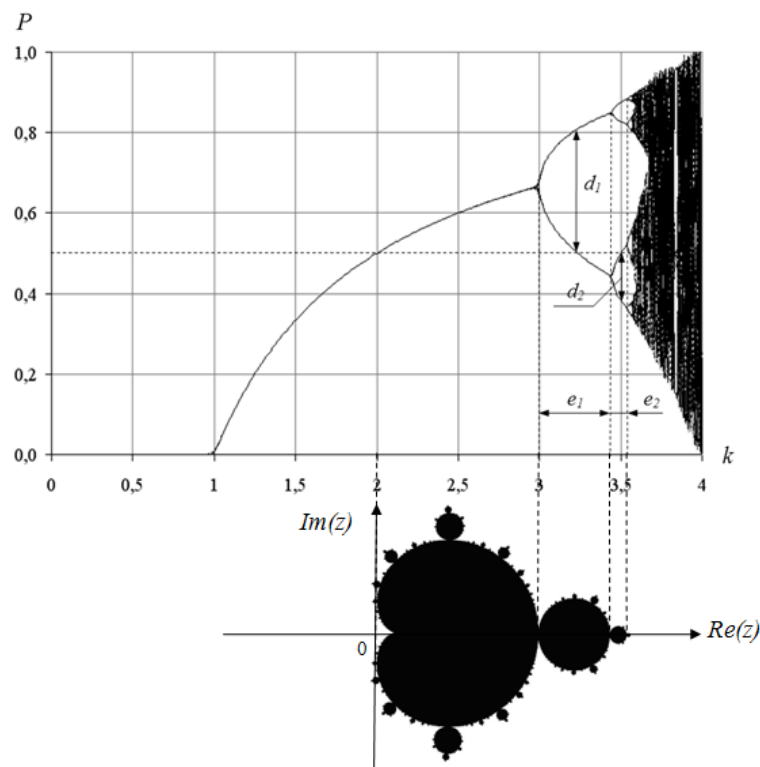


Рисунок 4.2. Универсальность масштаба бифуркаций

Анализ бифуркационной диаграммы и графического изображения фрактала Мандельброта (рис. 4.2) позволяет увидеть проявление принципа универсальности масштаба бифуркаций, что еще раз подтверждает тот факт, что бифуркации имеют фрактальную природу, так как они тоже самоподобны.

Бифуркационная диаграмма позволяет установить не только качественные, но и количественные универсальные закономерности, впервые полученные Фейгенбаумом. Если обозначить через k_j ($j = \overline{1, N}$) те значения параметра k , при которых происходят бифуркации, то отношение разностей $e_j = k_{j+1} - k_j$ к $e_{j+1} = k_{j+2} - k_{j+1}$ (рис. 1) при $j \rightarrow \infty$ удовлетворяет соотношению:

$$\delta = \lim_{j \rightarrow \infty} \frac{e_j}{e_{j+1}} = 4,6692016, \quad (3)$$

где δ – универсальная константа Фейгенбаума, которая не зависит от конкретной рассматриваемой модели и является одинаковой для семейства однопараметрических квадратичных отображений вида $P_{t+1} = kP_t(1 - P_t)$ [61].

Постоянная δ характеризует скорость схождения значений параметра k , в которых наступают бифуркации, к величине $k = 3,569946$, при которой

система переходит в состояние хаоса.

Кроме того, для данного семейства отображений, существует еще одна постоянная Фейгенбаума, называемая универсальным масштабным множителем σ . Этот множитель отражает закономерность процесса дробления масштабов диаграммы при бифуркациях. Если обозначить расстояния от точки $P = 0,5$ до ближайшей к ней точки на устойчивом цикле $f = 2^i$ ($i = \overline{1, N}$) через d_i (рис. 1), то отношение d_i к d_{i+1} при $i \rightarrow \infty$ удовлетворяет соотношению:

$$\sigma = \lim_{i \rightarrow \infty} \frac{d_i}{d_{i+1}} = 2,5029078. \quad (4)$$

Таким образом, переход состояния системы в состояние хаоса подчиняется определенным универсальным законам, которые в данном случае заключаются в возникновении одной и той же последовательности бифуркаций удвоения периода колебаний (сценарий Фейгенбаума) и в проявлении одних и тех же количественных закономерностях скейлинга [2].

Установленные универсальные закономерности перехода к динамическому хаосу при удвоении периода колебаний были экспериментально подтверждены для широкого класса механических, гидродинамических, химических и других систем (например, переход к турбулентному движению жидкостей и газов, динамика численности биологических популяций и др.).

Если раскрыть последовательность $z_0 = 0$, $z_{n+1} = z_n^2 + c$, $\forall n = \overline{1, 2}$ так, что $c = x + iy$, то можно получить следующие выражения:

$$z_0 = 0; \quad (5)$$

$$z_1 = z_0^2 + c = x + iy; \quad (6)$$

$$z_2 = z_1^2 + c = (x_1 + iy_1)^2 + x + iy = x_1^2 + 2ix_1y_1 - y_1^2 + x + iy = x_1^2 - y_1^2 + x + i(2x_1y_1 + y). \quad (7)$$

Если в выражении (7) выполнить замену $z_2 = x_2 + iy_2$, $c = a + ib$ и разделить реальную и мнимую части, то исходное выражение (2) перейдет к двумерному отображению, относящемуся к дискретным динамическим системам. Данное отображение представлено выражением

$$\begin{aligned} x_{n+1} &= x_n^2 - y_n^2 + a; \\ y_{n+1} &= 2x_ny_n + b. \end{aligned} \quad (8)$$

Анализ модели двумерной динамической системы, представленной выражением (8), приводит к выводу о существовании областей притяжения (аттракторов) при определенных значениях свободных членов a и b . Физически это означает о существовании устойчивых областей допустимых

значений параметров функционирования динамической АС. Численные значения величин a и b предполагается в дальнейшем интерпретировать в модели как совокупность условий погоды, оказывающих влияние на исследуемую динамическую систему.

На рис. 4.3 – 4.9. представлены аттракторы отображения (8), полученные с использованием ПЭВМ для различных значений a и b . При этом предполагается, что $a = b$. В правой части рисунков представлены эти же аттракторы, устойчивые точки которых соединены фазовыми траекториями.

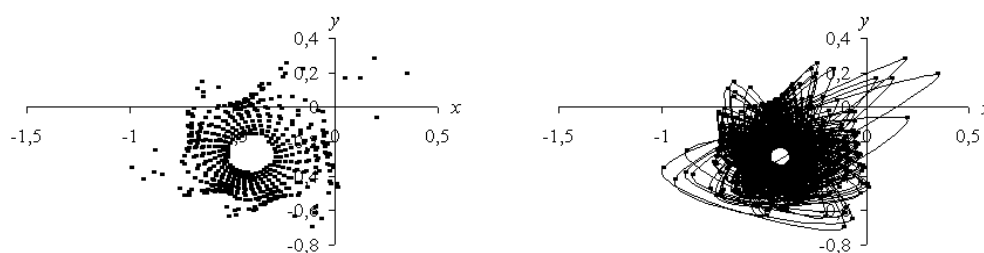


Рисунок 4.3. Аттрактор двумерного отображения ($a = b = -0,513$)

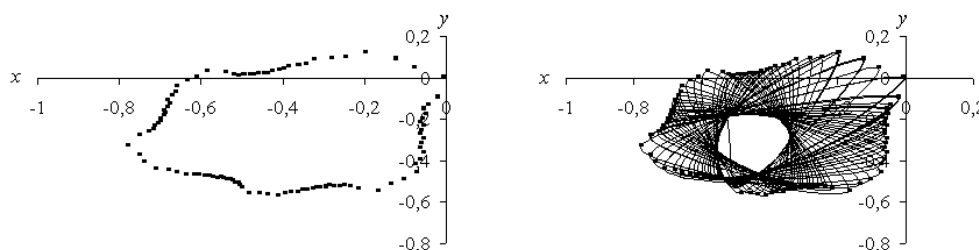


Рисунок 4.4. Аттрактор двумерного отображения ($a = b = -0,51$)

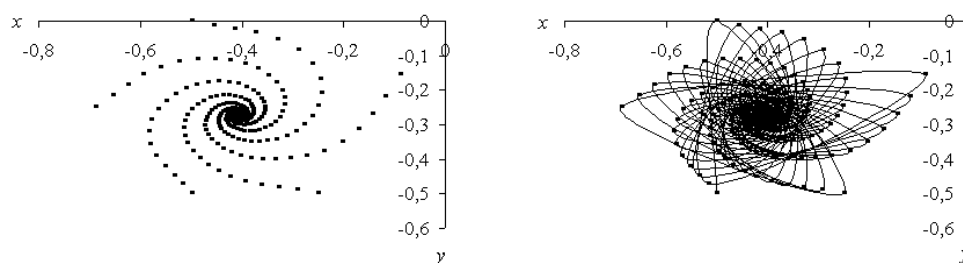


Рисунок 4.5. Аттрактор двумерного отображения ($a = b = -0,5$)

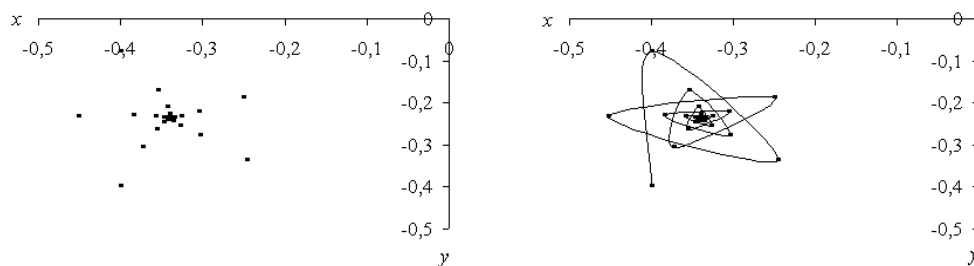


Рисунок 4.6. Аттрактор двумерного отображения ($a = b = -0,4$)

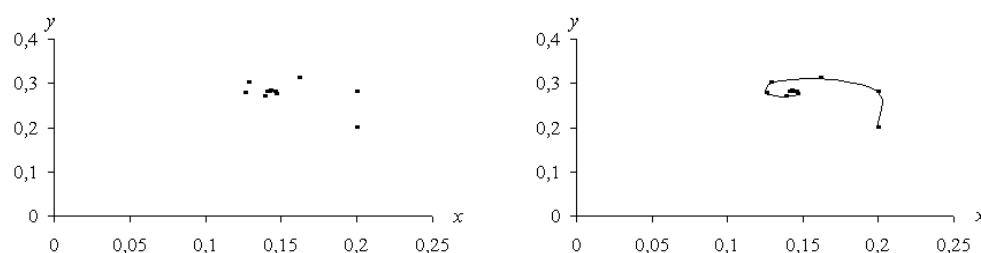


Рисунок 4.7. Аттрактор двумерного отображения ($a = b = 0,2$)

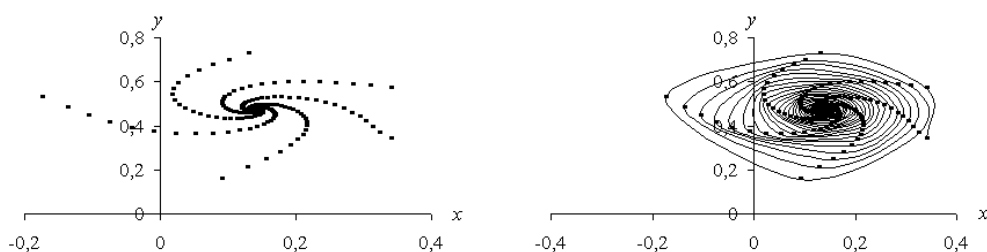


Рисунок 4.8. Аттрактор двумерного отображения ($a = b = 0,34$)

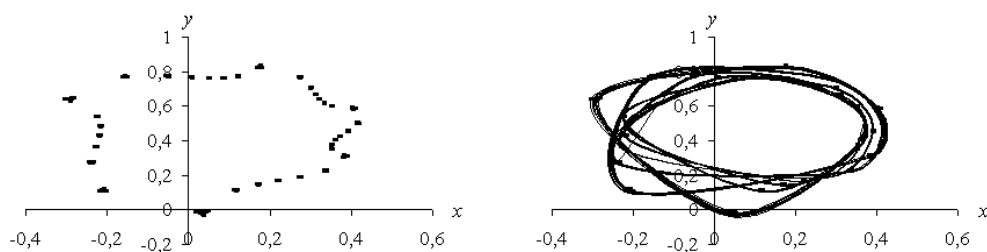


Рисунок 4.9. Аттрактор двумерного отображения ($a = b = 0,35$)

Из рис. 4.3. – 4.9. видно, что даже небольшие отклонения в начальных условиях – конкретных численных значений величин a и b , приводит к существенным изменениям внешнего вида аттракторов динамической системы. Физически это означает переход авиационной динамической системы на принципиально новый режим функционирования в связи с изменившимися

метеорологическими условиями.

Однако необходимо отметить тот факт, что устойчивые фрактальные структуры возникают лишь при определенных значениях величин a и b , точно также, как и в случае с бифуркационной диаграммой Ферхюльста, где бифуркации наступали при $k \geq 3,0$. Интервалы значений $l = a = b$, при которых величины x и y подвержены бифуркациям, наглядно представлены на рис. 4.10 и 4.11 соответственно. Бифуркации возникают при $l \in [-0,513; -0,4]$ и при $l \in [0,27; 0,35]$.

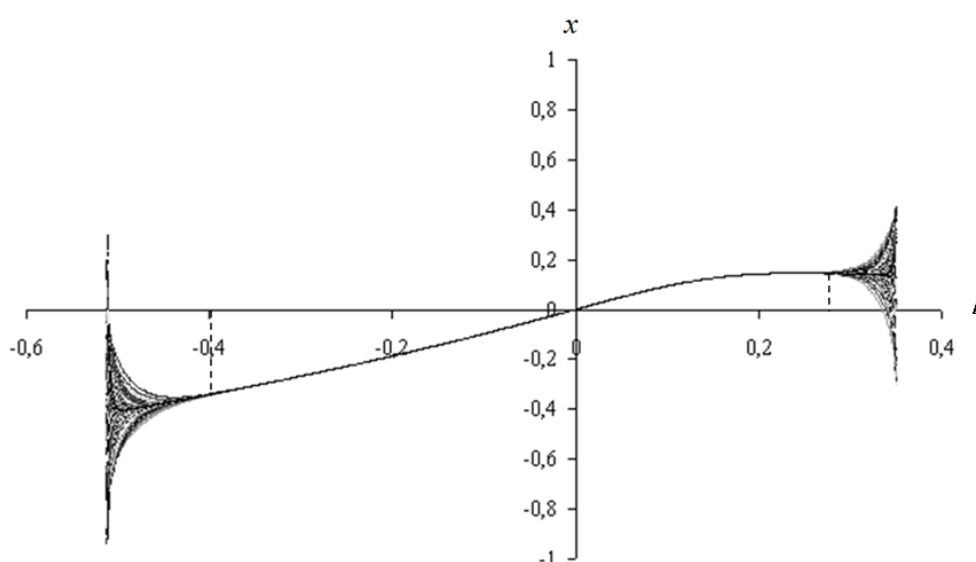


Рисунок 4.10. Бифуркационная диаграмма параметра x

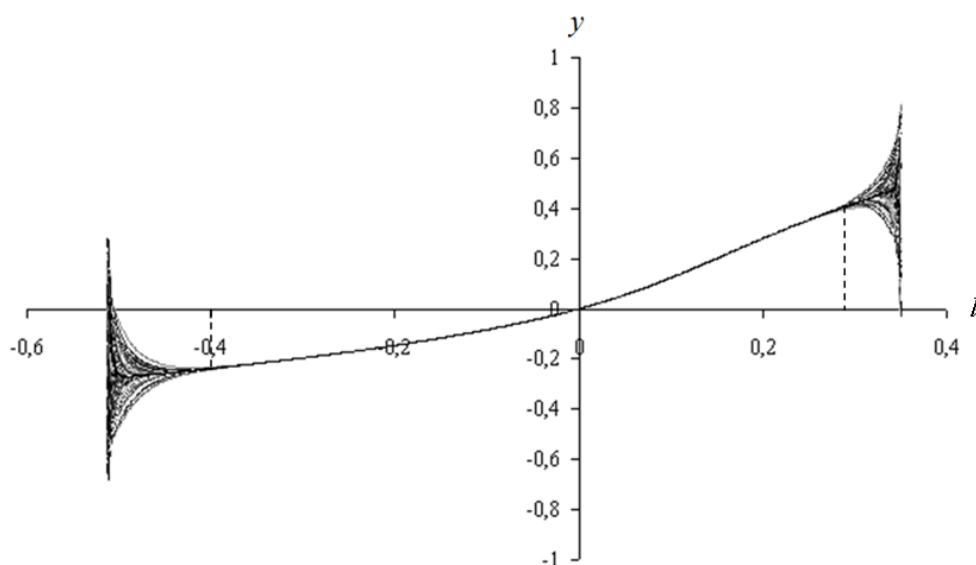


Рисунок 4.11. Бифуркационная диаграмма параметра y

Исходя из вышесказанного, можно сделать следующие выводы.

1. При построении СППМР, реализации которой обеспечивают принятие авиационных управленческих решений, учитывающих скрытые закономерности свойств метеозависимости АС, возможно и целесообразно использовать количественные и качественные методы теории детерминированного хаоса.

2. Построение моделей режимов функционирования АС необходимо проводить на основе анализа инвариантных множеств (аттракторов), являющихся областями притяжения в фазовом пространстве характеристик функционирования АС.

3. Анализ двумерных нелинейных дискретных отображений и одномерных эндоморфизмов на комплексной плоскости показывает, во-первых, их связь универсальным масштабным подобием, а во-вторых – наличие и в первом, и во втором случаях устойчивых структур – фракталов. Такие структуры являются гиперчувствительными к внешним воздействиям, что приводит к необходимости их визуализации для дальнейшего использования ЛПР в процессе принятия управленческих решений.

4. Установление границ аттракторов АС является важнейшей задачей, так как на практике – это множество возможных состояний управляемой системы после стабилизации.

Глава 5. Экспериментальное и металло-фрактографическое исследование образования и роста коррозионных трещин под напряжением в сварных элементах магистральных трубопроводов

Коррозионное растрескивание под напряжением (КРН) является разновидностью коррозионной повреждаемости металлов, развивающейся под воздействием определенной коррозионно-активной среды и статических или низкочастотных циклических напряжений растяжения (приложенных или остаточных) путем образования трещин без выраженных признаков сопутствующей разрушению пластической деформации и наличия продуктов коррозии.

Предприятия, эксплуатирующие систему магистральных газопроводов, могут обнаружить наличие для них проблемы КРН либо при разрыве действующего газопровода, либо в случае проведения обследования газопровода. В любом случае перед предприятиями возникает вопрос о возможности и безопасности дальнейшей эксплуатации (наличии невыявленных дефектов) или необходимости диагностики дефектов КРН. Общая задача диагностики КРН включает оценку текущего состояния газопровода (наличия, размеров и расположения стресс-коррозионных дефектов) и прогноз возможного изменения состояния газопровода при его последующей эксплуатации (как в случае обнаружения дефектов, так и при их отсутствии на момент конкретного обследования).

Обнаружение дефектов КРН требует оценки их опасности и определения необходимости принятия каких-либо действий – от возможности продолжить эксплуатацию при сохранении обнаруженных неопасных дефектов в течение определенного срока (гарантированного ресурса дефектной трубы) до необходимости срочного удаления или ремонта поврежденного (дефектного) места.

5.1 Особенности механизма КРН как коррозионно-механического разрушения

В общем случае дефекты КРН представляют собой вытянутую в продольном направлении зону растрескивания трубной поверхности [47], образованную совокупностью единичных (в некоторых случаях объединившихся) полуэллиптических продольных трещин (рисунок 5.1). Кольцевая ширина дефекта КРН обычно на порядок меньше его продольного размера, а длина зоны растрескивания может быть соизмерима с длиной дефектной трубы.

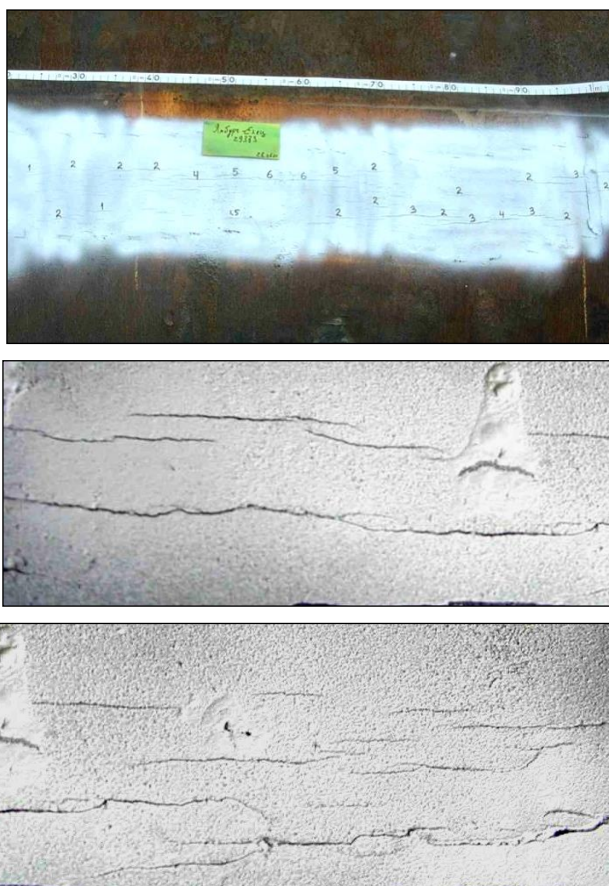


Рисунок 5.1. Дефекты КРН магистральных газопроводов

Дефекты КРН магистральных газопроводов, изготовленных из прямошовных труб, обнаруживаются как в основном металле трубы, так и в районе продольного или кольцевого шва (рисунок 5.2). Чаще дефекты КРН выявляются в нижней половине сечения трубы, а также вблизи (на расстоянии до 150-200 мм) продольных швов, в том числе на границе сплавления. Для процесса КРН характерна избирательность растрескивания – обычно трещины локализованы на части поверхности в пределах одной трубы.



Рисунок 5.2. Примеры расположения дефектов КРН на трубах магистральных газопроводов

Трещины КРН развиваются от поверхностных механических концентраторов напряжений, в вершине которых одновременно присутствует коррозионно-активная среда, и уровень коэффициента интенсивности (концентрация) напряжений превышает некоторое минимальное пороговое значение (K_{ISCC}), при достижении которого из концентратора может начаться коррозионно-механический рост трещины, возможный только при одновременном присутствии коррозионно-активной среды в вершине трещины и необходимом уровне приложенных напряжений. При этом происхождение или конкретный механизм возникновения начального концентратора напряжений особого значения не имеет – трещины КРН могут развиваться как от концентраторов, возникших в результате местной или локальной коррозии без прямого участия механических напряжений, так и в результате механических или технологических нарушений геометрии поверхности – надрезов, царапин, закатов и т.п. (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3. Дефект КРН с четко выраженной отдельной трещиной

Признаком преобладания механизма зарождения трещин КРН на концентраторах преимущественно коррозионного происхождения (питтингов или других форм местной коррозии) является множественный характер

растрескивания - образование «поля трещин» вследствие чисто коррозионного воздействия на площади поверхности трубы.

Направление роста или преобладающая ориентация трещин КРН определяется ориентацией напряжений растяжения – схемой напряженного состояния нагруженной трубы или ориентацией главных напряжений. Поскольку в трубе, нагруженной внутренним давлением, максимальные растягивающие напряжения имеют кольцевую ориентацию, развивающиеся трещины КРН имеют преимущественно продольную направленность.

Наличие проблемы КРН первоначально выявилось по фактам аварийных разрывов, вызванных образованием в действующем газопроводе стресс-коррозионных дефектов. Первичная информация о данном событии включает:

- сведения об условиях эксплуатации и сроке наработки газопровода в месте аварии, расположении места и характера разрыва аварийной трубы;
- результаты осмотра поверхности поврежденных труб и трубных фрагментов, включая сведения о расположении и общих размерах обнаруженных мест растрескивания (дефектов КРН);
- результаты первичного визуального анализа аварийного излома с оценкой общих размеров магистральной трещины и очаговой части излома, имеющей признаки КРН (длины и максимальной глубины трещин).

Коррозионное растрескивание является результатом одновременного выполнения трех условий: попадания на поверхность трубы активной коррозионной среды, склонности металла трубы к растрескиванию и наличия растягивающих напряжений.

В настоящее время растрескивания, наблюдающиеся в системе газопроводов ОАО Газпром, квалифицируются как растрескивания в почти нейтральной среде ($pH \leq 7$). Известно также, что характеристики среды в месте растрескивания газопровода чаще всего не отличаются от среды, присутствующей в окрестностях не растрескавшегося газопровода (хотя иницирующая роль среды в данной проблеме не вызывает сомнения, поскольку в отсутствие таковой растрескивание не развивается или прекращается).

Значение склонности трубного материала (трубной стали) к растрескиванию подтверждается, например, тем, что первые попытки воспроизвести

этот тип разрушения на образцах в лабораторных условиях (при идентичных средах и условиях нагружения) в некоторых случаях оказались безуспешными для тех сталей, которые в условиях эксплуатации демонстрировали склонность к растрескиванию.

В настоящее время растрескивания, наблюдающиеся в системе газопроводов ОАО Газпром, квалифицируются как растрескивания в почти нейтральной среде ($pH \leq 7$). Известно также, что характеристики среды в месте растрескивания газопровода чаще всего не отличаются от среды, присутствующей в окрестностях не растрескавшегося газопровода (хотя иницирующая роль среды в данной проблеме не вызывает сомнения, поскольку в отсутствие таковой растрескивание не развивается или прекращается).

Значение склонности трубного материала (трубной стали) к растрескиванию подтверждается, например, тем, что первые попытки воспроизвести этот тип разрушения на образцах в лабораторных условиях (при идентичных средах и условиях нагружения) в некоторых случаях оказались безуспешными для тех сталей, которые в условиях эксплуатации демонстрировали склонность к растрескиванию.

- Наблюдается четко выраженное зональное строение излома КРН: наличие стадии стабильного медленного роста трещин (со скоростью около 1 мм/год), отличающейся отсутствием макроскопической пластической деформации (хрупким видом излома) и окисленной поверхностью, и наличие стадии вязкого дорыва (среза), приводящего к разгерметизации трубопровода.

- Излом на стадии стабильного роста трещин КРН имеет бороздчатое строение, отражающее направление преимущественно хрупкого роста трещин КРН и признаки взаимодействия (объединения) соседних единичных трещин.

- Для повреждаемости газопроводов механизмом КРН характерна избирательность растрескивания: трещины обнаруживаются на малой части труб (единичных трубах) и чаще локализованы в пределах одной трубы, располагаясь в нижней половине сечения трубы вблизи продольного шва.

- В месте разрыва, обусловленного наличием трещин КРН, практически не наблюдаются признаки чисто коррозионного поражения поверхности механизмом язвенной коррозии. Одновременное присутствие на трубной поверхности признаков КРН

и коррозионных механизмов повреждаемости указывает на возможность изменения коррозионной активности внешней среды газопровода.

5.2 Процесс коррозионного растрескивания газопроводов

Полное описание механики зарождения и роста трещин может быть представлено в виде диаграммы трещиностойкости (рисунок 5.4), содержащей характеристики зарождения трещин (пороговый КИН – K_{th} , позволяющий для конкретных условий нагрузки определить размер порогового дефекта, при достижении которого начинается рост трещины под действием нагрузки), условия роста (скорость) трещин при повышающемся КИН, а также предельные условия разрушения при нагружении до уровня предела прочности. Специфика коррозионно-механического роста трещин (при статическом или циклическом нагружении) отличается в общем случае меньшим значением порогового КИН (K_{th}), большей скоростью трещин в сравнении с «воздушным» нагружением, а также наличием «плато» на диаграмме трещиностойкости – области независимости (или слабой зависимости) скорости трещины от параметра нагрузки (КИН). Данный подход механики разрушения [37] указывает характерные точки на диаграмме трещиностойкости, которые наиболее существенны для описания кинетики роста трещин (рисунок 5.4).

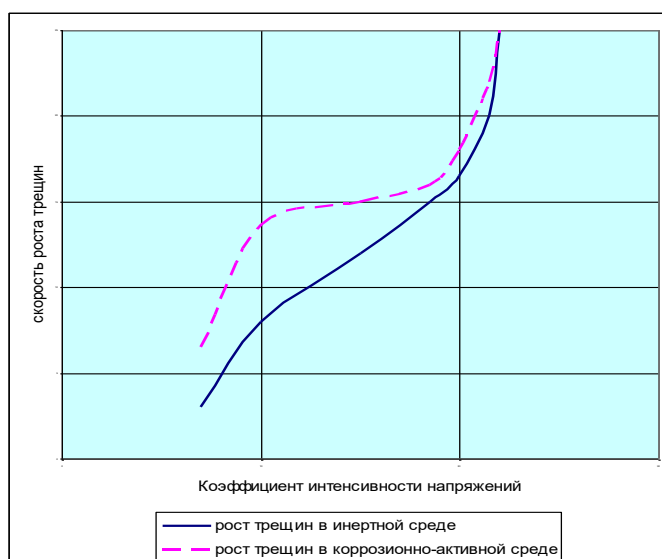


Рисунок 5.4. Кинетическая диаграмма роста трещин (схема): 1 - припороговый участок; 2 - участок средних скоростей; 3 - участок ускоренного роста

Поверхность поврежденной трубы, как правило, содержит набор трещин – от минимальных размеров до максимальных. Начальной стадией повреждения поверхности является образование питтинга, который чаще всего зарождается на неметаллических включениях (рисунок 5.5).

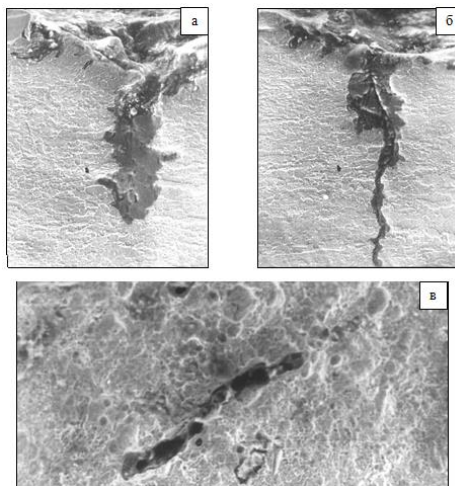


Рисунок 5.5. Виды коррозионного поражения поверхности трубы: а – образование коррозионного питтинга, $\times 1500$; б – зарождение и развитие трещины от питтинга, $\times 1500$; в – растравленные неметаллические включения, $\times 500$

Форма возникающего поверхностного повреждения (растравливание поверхности) воспроизводит форму включений, т.е. имеет продольную ориентацию по отношению к прокатному трубному листу или изготовленной из листа трубе или определяется структурным состоянием металла. Минимальный (пороговый) размер дефекта («цепочки» питтингов), от которого способна расти трещина под действием механического фактора, составляет: для труб из стали класса X65-X70 – глубина более 70-80 мкм и длина более 200 мкм. Указанные значения соответствуют величине $K_{ин}$ около 4-5 МПа/м.

Определение пороговых условий зарождения стресс-коррозионных трещин на основе параметра механики разрушения (K_{th}) позволяет прогнозировать влияние некоторых факторов на процесс коррозионного растрескивания. Например, увеличение уровня напряжений на трубной поверхности будет приводить к уменьшению размера порогового концентратора, что равноценно увеличению количества зародышевых трещин и, вероятно, уменьшению расстояния между соседними трещинами (для растрескивания в форме «поля трещин»). Влияние дефектов меньших размеров ограничено местной поверхностной коррозией без образования трещин (рисунок 5.6).



Рисунок 5.6. Язвенная коррозия наружной поверхности стенки трубы

Изучение поверхности неэксплуатированных труб (выборка из труб аварийного запаса) показывает, что поверхностные дефекты указанных пороговых размеров и происхождения присутствуют и на «неработавших» трубах, которые фактически уже содержат зародыши будущих микротрещин. Таким образом, зародышами будущих трещин коррозионного растрескивания являются главным образом концентраторы, образовавшиеся на месте деградировавших строчечных неметаллических включений приповерхностного слоя трубного металла с содержанием более 3 баллов (ГОСТ 1778-70).

Другой установленный механизм зарождения поверхностных трещин обусловлен наличием чисто механических поверхностных концентраторов напряжений (царапин, вмятин) технологического или строительного происхождения (рисунок 7). В отсутствие указанных концентраторов химического или механического происхождения стресс-коррозионные трещины в условиях действующей эксплуатации не образуются.

Из установленного следует, что продольная ориентация возникающих стресс-коррозионных трещин в значительной степени определяется ориентацией зародышевых пороговых дефектов – строчечных неметаллических включений.

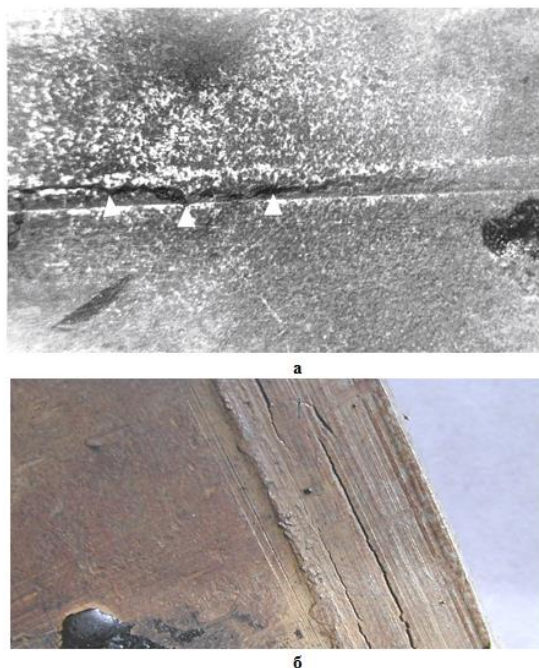


Рисунок 5.7. Зарождение коррозионного растрескивания на механических дефектах трубной поверхности: а – трещины на технологической продольной царапине, (показаны стрелками), б – трещины на царапинах строительного происхождения, $\times 6$.

Расположение зародышевых дефектов (неметаллических включений или механических концентраторов) в поверхностном слое трубного металла, количество которых в процессе эксплуатации не увеличивается, определяет расположение и размеры будущих колоний трещин коррозионного растрескивания, которые определяются начальным состоянием (качеством) труб или поверхностного слоя трубного металла.

Наличие определенно выраженного минимального порогового размера зародышевого дефекта для нормальных условий эксплуатации обуславливает избирательность мест растрескивания – отдельных участков на малой доле общего числа труб [18]. Трубы с нормальным содержанием неметаллических включений в поверхностном слое металла (менее 3 баллов) и без механических поверхностных концентраторов к коррозионному растрескиванию при существующих условиях эксплуатации, в том числе используемой пленочной изоляции, не склонны.

Принципиально отметить, что возможность местного поверхностного обогащения металла труб неметаллическими включениями, определяющего размеры зоны коррозионного растрескивания трубной поверхности при

малом среднем содержании включений, может отражать специфику состояния трубного места из стали непрерывной разливки.

5.3 Поведение трещин при нагружении дефектных труб внутренним давлением

Влияние дефектов КРН на несущую способность труб может быть изучено путем проведения стендовых испытаний повышенным давлением трубопроводов с заранее аттестованными дефектами [88].

Предметом исследования являлись вырезанные катушки двухшовных труб 1420x16мм из стали класса X-70, на которых при обследовании газопровода были обнаружены дефекты КРН (трубы №№ 319, 1410, 1315, 2640 и 417). Пленочная изоляция с мест расположения дефектов была механически (скребками) удалена в процессе проверки результатов ВТД вовремя шурфовки.

Первичное обследование труб было выполнено на площадке Комсомольского АВП вначале с помощью магнито-порошковой дефектоскопии (Helling, намагничивающее устройство UM-8, грунтовка № RS103, эмульсия NRS.104A) для выявления присутствующих поверхностных трещиноподобных дефектов с замером их общей длины.

Глубина обнаруженных трещин КРН оценивалась с помощью вихретокового дефектоскопа ВК-1 и магнитного дефектоскопа МВД-2.

Замер твердости металла катушек выполнен с помощью твердомера ЭЛИТ-2Д. Все использованные измерительные приборы имели сертификаты органов Госстандарта. Для наиболее глубоких трещин дополнительно был произведен с помощью комбинированного щупа-толщиномера замер максимального поверхностного раскрытия берегов трещин.

Результаты обследования дефектных катушек представлены на рисунке 5.8 и в таблице 5.1 в соответствии с данными ВТД для соответствующего дефекта. В таблице 5.1 по данным обследования приведены результаты оценки опасности трещин, выбранных для удаления и ремонта заваркой (для расчетного давления газа 7,5 МПа и свойств стали класса X-70).

Расчет выполнялся с использованием методики определения несущей способности стенки трубы с продольной трещиной по расчетным зависимостям, изложенным в работе [90]. Переменными параметрами в расчете являлись длина и максимальная глубина трещин, диаметр и толщина стенки трубы и внутритрубное давление. При этом за отдельный дефект

принимались поля трещин, разделенные между собой расстоянием, равным (по экспериментальным данным) утроенной толщине стенки.

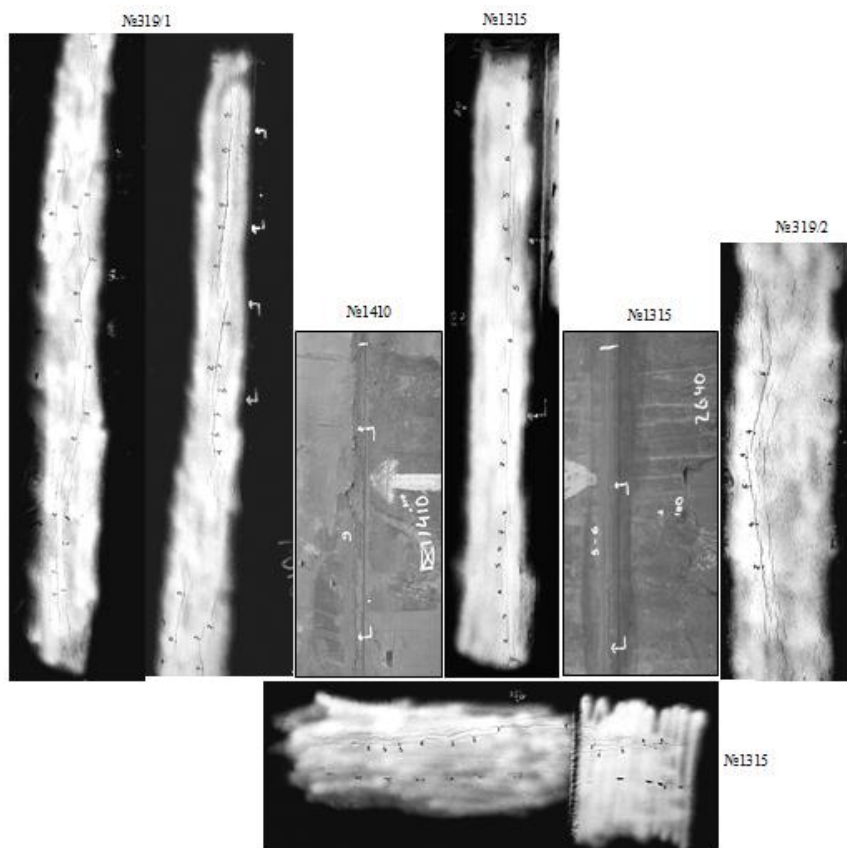


Рисунок 5.8. Вид поверхности дефектов катушек

Результаты оценки твердости показывают, что для исследованных труб ее значение практически не отличается и находится в пределах 190-220 НВ, что соответствует значению твердости трубной стали контролируемой прокатки класса прочности Х65-Х70. Наличие «выпадов» твердости (катушка № 417, 168 НВ) связано с качеством подготовки поверхности под замер твердости.

После проведенной аттестации дефектов КРН из отобранных шести катушек была собрана плетень общей длиной около 15м, содержащая стресс-коррозионные трещины максимальной глубиной до 9÷10 мм (с учетом возможной погрешности определения) и общей длиной дефектов (600-800) мм (рисунок 5.9).

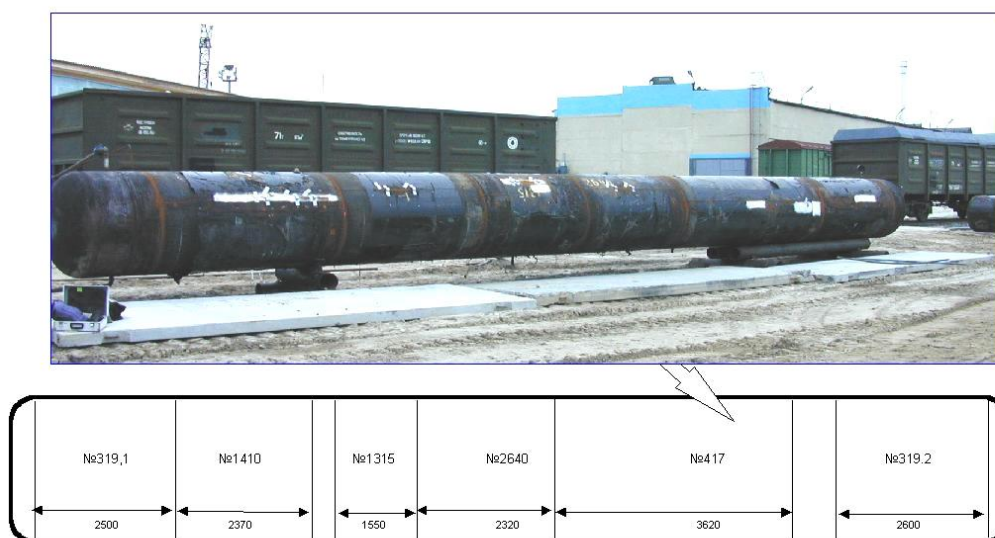


Рисунок 5.9. Схема расположения трубных секций плети, собранной из катушек газопровода «Уренгой – Новопсков»

При сборке плети все присутствующие дефекты КРН были расположены на катушках единообразно (по условному циферблату). На катушках №№ 319, 1315 и 417 трещины располагались по основному металлу трубы, а на катушках № 1410 и № 2640 дефекты КРН были локализованы по границе сплавления продольного шва, и по этой причине обследование магнито-порошковым методом на данных катушках не выполнялось.

Таблица 5.1

Результаты расчетной оценки опасности дефектов КРН до и после ремонта сваркой

№ катушки	Размеры очага дефекта до ремонта		Расчетное давление разрыва до ремонта, МПа	Размеры оставшихся дефектов после ремонта		Расчетное давление разрыва после ремонта, МПа
	глубина, мм	длина, мм		глубина, мм	длина, мм	
319-1	9	550	9,3	7	250	11,2
				6	120	12,1
				7	65	12,2
				6	100	12,2
1410	9	670	8,9	7	180	11,5
				7	130	11,8
1315	9	750	8,7	7	180	11,5
				7	80	12,1
				6	170	11,8
2640	6	790	10,1	6	310	11,3
				6	150	11,9
417	7	200	11,4	7	200	11,4
319-2	5	260	11,8	5	260	11,8

Ремонт стресс-коррозионных трещин с применением импульсной сварки был выполнен персоналом АВП с участием ЦЛС ООО Тюментрансгаз для подготовленной плети на катушках №№ 319/1, 1410, 1315 и 2640 путем вышлифовки и заварки только наиболее глубоких трещин (до 9-10 мм на катушках №№ 319/1, 1410 и 1315 и до 6 мм на катушке № 2640) при сохранении исходных трещин глубиной до 7мм и длиной до 300мм, включительно.

После выполнения ремонта при дальнейшей подготовке плети на наиболее глубокие оставленные трещины были установлены 12 стационарных магнито-индукционных датчиков глубины трещины МВД-3 (рисунок 5.10).

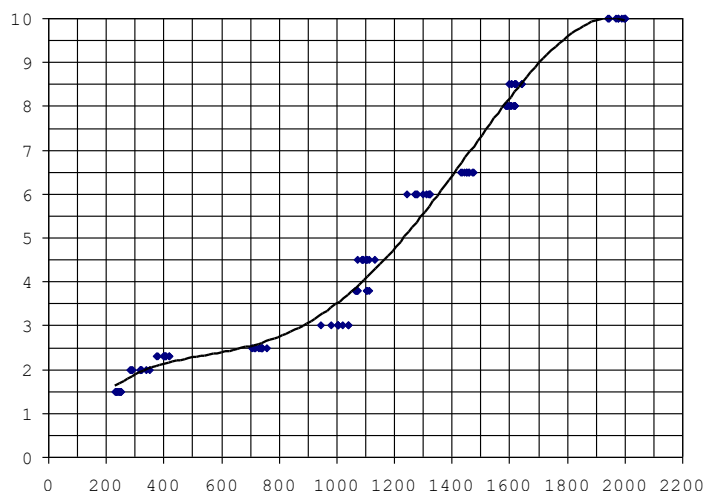


Рисунок 5.10. Обобщенная зависимость сигнала датчиков МВД-3 от глубины измеряемой трещины

Нагружение плети, сопровождавшееся замером показаний датчиков, производилось путем статического и повторно-статического подъема внутритрубного давления со скоростью 5 кгс/см^2 в минуту. Режим нагружения включал подъем давления до 75 кгс/см^2 с последующим сбросом давления до 20 кгс/см^2 и повторением цикла нагружения (до 5 циклов при каждом верхнем уровне достигнутого давления) на 80, 85, 90 и 95 кгс/см^2 (рисунок 5.11).

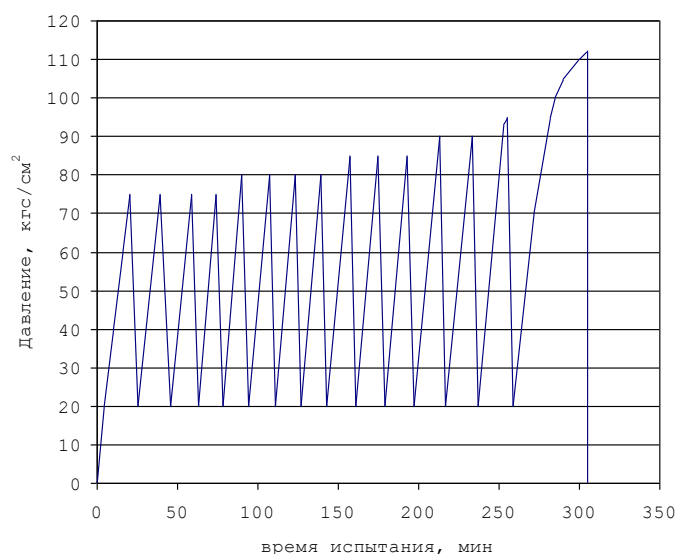


Рисунок 5.11. Схема нагружения трубной плети - изменение внутритрубного давления в процессе гидравлических испытаний

После нагружения на давление 95 кгс/см² и сброса давления до 20 кгс/см² был выполнен с помощью дефектоскопа ВК-1 дополнительный контрольный замер максимальной глубины оставленных трещин. Дальнейшее нагружение осуществлено путем ступенчатого подъема давления плети до 100, 105 и 110 кгс/см² без сброса давления вплоть до момента разрыва, произошедшего при давлении 110-112 кгс/см². Разрыв плети произошел по катушке № 319/2 (рисунок 5.12) и был вызван наличием стресс-коррозионных трещин максимальной глубиной до 7 мм.



Рисунок 5.12. Разрушение плети по катушке 319-2: Зональное строение излома: участок коррозионного роста трещины (1), участок развития (подрастания глубины) дефекта при испытании (2) и зона долома (3)

После разрыва при вышеуказанном давлении с целью дополнительной проверки качества проведенного ремонта трещин КРН с помощью сварки была проведена реконструкция плети путем вырезки катушки № 319/2 с местом разрыва, катушки № 417, а также части катушки 319/1.

В результате на реконструированной плети оставались только ремонтные катушки №№ 319/1 (часть), 1410, 1315 и 2640. Далее на ремонтных катушках была выполнена дополнительная шлифовка и подварка первоначально оставленных (после «первого» ремонта) трещин, в результате чего подготовленная к повторному нагружению плеть содержала преимущественно места ремонта сваркой дефектов КРН («заваренные» дефекты, рисунок 12). Последующее испытание реконструированной плети осуществлялось путем ее монотонного нагружения до разрыва, произошедшего при достижении давления 123 кгс/см². При этом в процессе нагружения до момента разрыва были зафиксированы признаки начала пластического течения материала плети (начиная от давления около 120 кгс/см²), что проявилось в снижении в 4-5 раз скорости роста внутритрубного давления при сохранении режима работы нагружающего устройства. После разрыва плети было выполнено ее визуальное обследование, которое обнаружило, что разрушение произошло по катушке № 2640 в результате сквозного раскрытия

оставленной без заварки продольной трещины КРН с исходным размером 110х5 мм без распространения разрушения за пределы длины трещины (разрушение по типу продольного свища).

5.4 Проведение гидроиспытаний плети до разрыва при 110 кгс/см²

После заварки наиболее глубоких трещин или участков трещин (по линии сплавления) на оставшиеся трещины были установлены стационарные накладные магнито-индукционные датчики для контроля поведения трещин при нагружении плети. Калибровка датчиков по глубине трещины осуществлялась в пределах глубины до 10 мм в отсутствии внешней механической нагрузки; для трещин глубиной более 3 мм средняя чувствительность датчиков составляла 150 мВ на 1мм глубины. Показания магнито-индукционного датчика зависят от поверхностного раскрытия берегов трещины, величина которого при упругом нагружении трещины линейно увеличивается без роста глубины трещины. При нагружении плети оценивалось относительное изменение показаний датчиков (отнесенное к его значению до нагружения плети) при изменении давления нагружения.

Рисунки 5.13-5.16 иллюстрируют относительное изменение сигнала датчиков в зависимости от уровня давления нагружения в соответствующей секции (катушке) плети.

Секция 1 (катушка № 319/1) имела четыре датчика, два из которых (1.1 и 1.2) были установлены на трещинах глубиной, соответственно, 7 и 6 мм, удаленных от места ремонта. Два других датчика (1.3 и 1.4) были установлены на более коротких трещинах глубиной 6 и 7 мм. Изменение показаний всех датчиков секции 1 однотипное, и с начала нагружения плети характеризуется линейным возрастанием уровня сигнала с величиной давления.

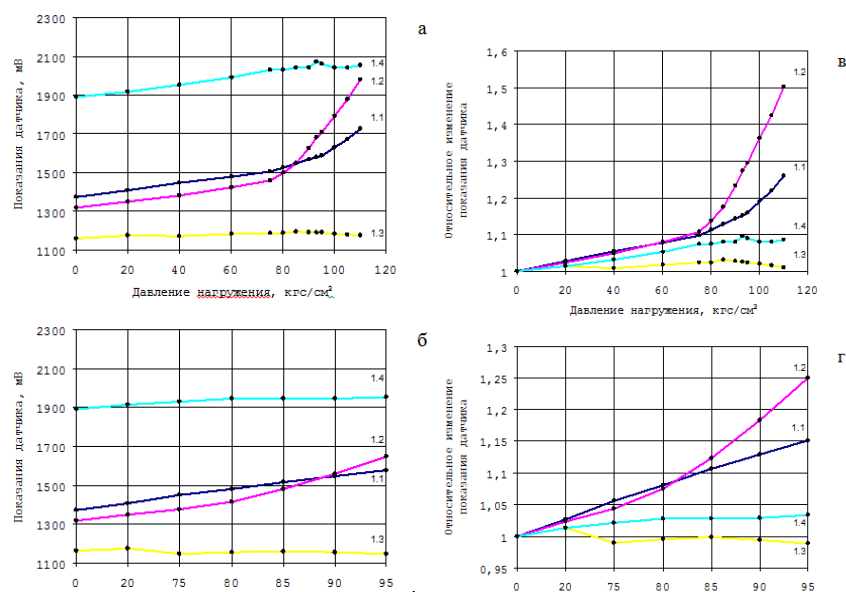


Рисунок 5.13. Изменение показаний датчиков, установленных на секции 1 катушка №319/1: под нагрузкой (а) и после сброса давления до 20 кгс/см² (б), испытания под нагрузкой (в) и после сброса давления до 20кгс/см² (г)

Оценка показаний датчиков после сброса давления до 20 кгс/см² (рисунок 5.13) показывает практически линейную монотонную зависимость величины сигнала от уровня достигнутого давления нагружения во всем исследованном диапазоне давления (до 95 кгс/см²). Этот факт может означать, что в исследованном диапазоне давления нагружения существенного увеличения глубин трещин не происходит. Данное предположение подтверждено результатами определения глубины трещин после нагружения до 95 кгс/см².

Секция 2 (катушка № 1410) была оборудована двумя датчиками (2.1 и 2.2), установленными на трещины глубиной до 8 мм по линии сплавления (с двух сторон от места ремонта по линии сплавления). Для обеих трещин наблюдается практически линейная зависимость величины сигнала от уровня достигнутого давления в плети при слабом «переломе» наклона кривых (рисунок 5.14) на давлении более 80 кгс/см² и слабо выраженных остаточных эффектах нагружения в случае замера при 20 кгс/см² (рисунок 5.14).

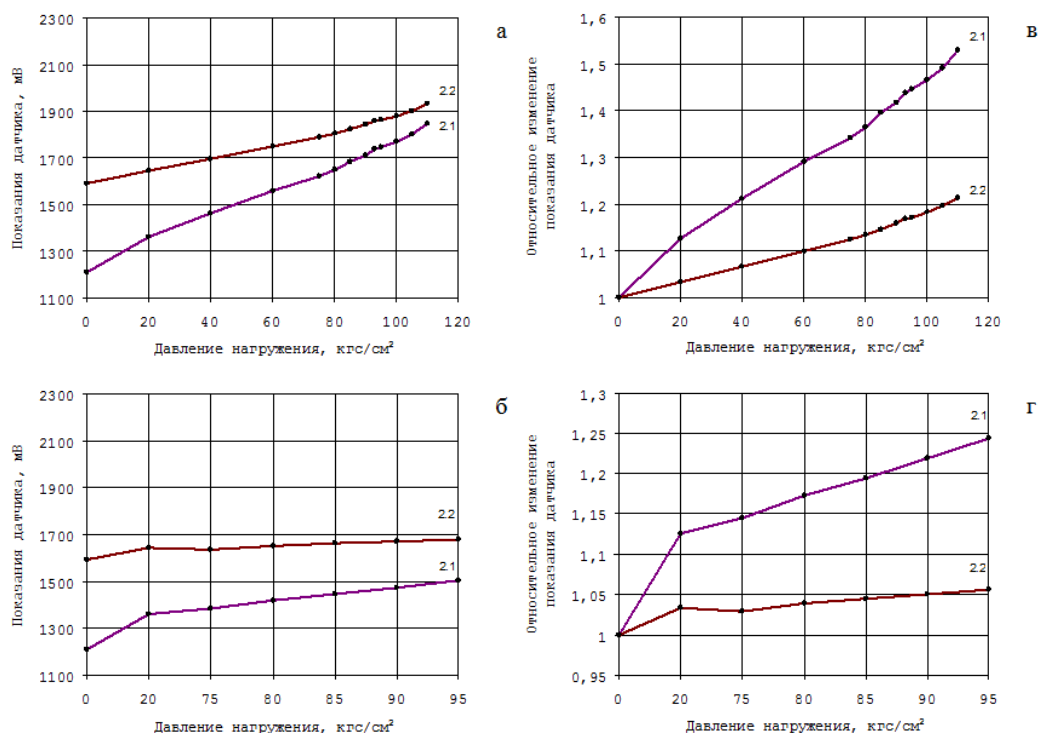


Рисунок 5.14. Изменение показаний датчиков установленных на секции 2 катушка №1410: под нагрузкой (а, в) и после сброса давления до 20 кгс/см² (б, г)

На секции 3 (катушке № 1315) было установлено три датчика, из которых два (3.1 и 3.2) были размещены на трещинах глубиной 7 мм (3.1) и вблизи (3.2) места ремонта. Полученные результаты измерения сигналов датчиков при нагружении практически повторяют данные испытаний секции 1 (рисунок 5.13), подтверждая слабое проявление остаточных эффектов нагружения в случае замера показаний при 20 кгс/см² для диапазона до 95 кгс/см². Замер глубины трещины с помощью дефектоскопа ВК-1 после нагружения в диапазоне до 95 кгс/см² не обнаружил увеличения глубины трещин по сравнению с исходными значениями.

Секция 4 (катушка № 2640) содержала частично заваренную трещину по границе сплавления, с двух концов от которой были оставлены трещины глубиной до 6 мм (датчики 4.1 и 4.2). Результаты измерения датчиков практически повторяют данные, полученные для секции 2 (ремонт трещины по границе сплавления) с поправкой на меньшую глубину оставленных частей трещины.

Секция 5 (катушка № 417) содержала поле трещин глубиной до 7 мм и ремонту сваркой не подвергалась; датчик 5.1 был установлен на трещину глубиной 7 мм в случае замера при максимальном достигнутом давлении

(рисунок 5.15 а, в) до уровня 80 кгс/см² зависимость роста сигнала от давления практически линейная, что соответствует упругому поведению трещины при нагружении. Выше этого уровня нагружения темп прироста сигнала с ростом давления увеличивается до давления 95 кгс/см². При этом на сброшенном до 20 кгс/см² давлении показания датчика линейны до давления 90 кгс/см² включительно (рисунок 15 б, г), что может означать отсутствие существенных остаточных последствий нагружения за исключением раскрытия трещины.

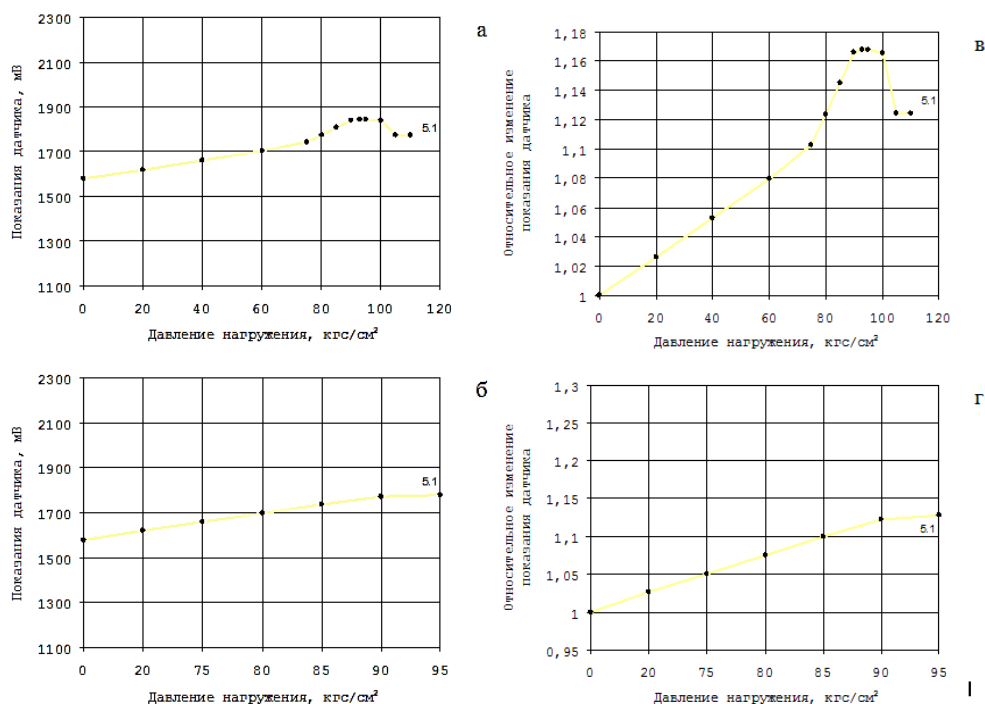


Рисунок 5.15. Изменение показаний датчиков установленных на секции 5 катушка №417: под нагрузкой (а, в) и после сброса давления до 20 кгс/см² (б, г)

Секция 6 (катушка № 319/2) содержала поле трещин глубиной до 6-7 мм (по оценке до сборки плети) длиной около 500 мм в виде «зигзагообразной» практически непрерывной цепочки трещин. На данной секции установка датчиков не проводилась. По данным ВТД максимальная глубина трещин на этой секции составляла около 8 мм. Разрушение плети при гидроиспытании произошло при давлении около 110-112 кгс/см² по указанному стресс-коррозионному дефекту секции 6. Максимальная глубина трещин достигала 7мм при длине очага 260мм. На других катушках обнаружены признаки взаимодействия и объединения трещин (рисунок 5.16).

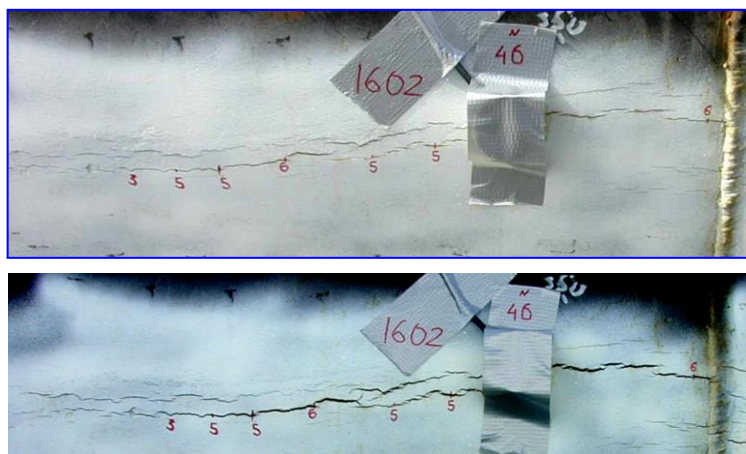


Рисунок 5.16. Признаки поверхностного объединения соседних трещин, вызванного нагружением плиты: катушка №417; а – исходное состояние; б – после нагружения до 95кгс/см²

Полученные данные, характеризующие поведение трещин глубиной до 6-7 мм вблизи и на удалении от мест ремонта сваркой, могут быть разделены на две группы в зависимости от режима нагружения.

К первой группе относятся данные, отражающие поведение трещин при последовательном циклическом нагружении плиты повышенным давлением до 95 кгс/см² с последующим сбросом давления до 20 кгс/см². Замер показаний датчиков на сброшенном давлении показывает, что величина прироста сигнала в указанном диапазоне нагружения минимальна и может быть отнесена в основном к выравниванию неоднородного фронта «составной» трещины без изменений ее максимальной глубины, в том числе путем поверхностного объединения соседних близких трещин (рисунок 5.16). Совокупность полученных данных также показывает, что во всем исследованном диапазоне давления нагружения признаков ускоренного роста трещин при превышении порогового давления («упругой» границе поведения трещин) не наблюдается.

Вторая группа данных характеризует поведение трещин при дальнейшем монотонном повышении давления в плети до момента ее разрыва. Результаты измерений показывают, что характер изменения сигналов датчиков в интервале давления 95-110 кгс/см² практически сохраняется по отношению к уровню давления до 95 кгс/см².

5.5 Гидроиспытания реконструированной плети

С целью уточнения предельной несущей способности была проведена реконструкция плети путем удаления секций 5 и 6 и частично участка секции 1. Далее на оставшихся секциях была дополнительно проведена заварка оставленных трещин.

Гидроиспытания реконструированной плети были выполнены путем ее монотонного нагружения с постоянной скоростью, использованной при первом цикле нагружения, до момента разрыва плети. Разрыв плети произошел по секции 4 (катушка № 2640) при достижении давления 123 кгс/см². В процессе нагружения плети были зафиксированы признаки начала пластического течения металла труб, предшествующие разрыву; это проявилось по снижению скорости роста внутритрубного давления в плети, начиная от давления около 120 кгс/см², при сохранении режима нагружения. Осмотр плети после сброса давления показал, что разрушение плети произошло в результате сквозного пластического раскрытия пропущенной при обследовании и сохранившейся за пределами места ремонта продольной трещины КРН размера 110х5 мм (рисунок 39) без распространения разрыва за пределы длины указанной трещины («докритическое» разрушение по типу «утечка без разрушения»).

5.6 Оценка критических размеров дефектов, вызвавших разрушение трубы при гидравлических испытаниях

С целью уточнения возможности достоверной расчетной оценки критических размеров трещин выполнено сопоставление измеренных линейных размеров трещин, являвшихся очагами разрушения при давлении 112 кгс/см² и 123 кгс/см², и расчетных значений.

Критические размеры трещин, вызвавших разрушение, практически совпадают с положением расчетных кривых графика. Это обусловлено точным определением размеров очага, а также тем, что использованные трубные стали имеют достаточно высокую пластичность, поэтому разрушению трубы предшествовала значительная деформация в вершине дефекта, что соответствовало коэффициенту чувствительности к трещине равному 1.

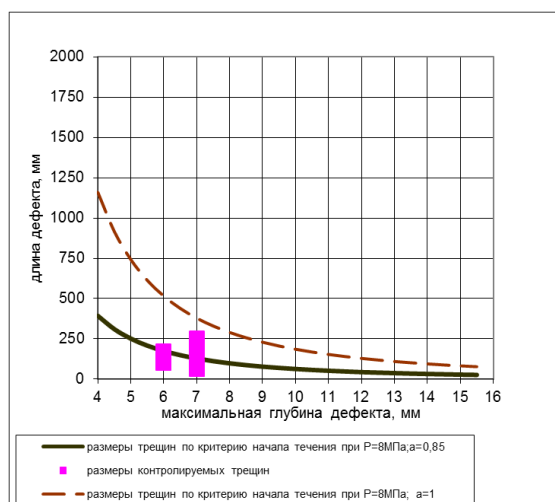


Рисунок 5.17. Критические размеры трещин: а - размеры трещин, соответствующие разрушению трубы 1420х15,7мм от давления; б - размеры трещин, соответствующие началу течения в нетто-сечении стенки трубы

Для трещин глубиной 6-7мм и длиной 100-200мм, расположенных по телу трубы, остаточное раскрытие берегов трещин появляется после давления 80 кгс/см².

На рисунке 17 приведены расчетные кривые размеров трещин, вызывающих начало течения в нетто-сечении стенки трубы при заданном коэффициенте чувствительности к трещине 1 и 0,85 для давления 80 кгс/см². Фактические размеры трещин с остаточным раскрытием ниже расчетных значений при значении коэффициента чувствительности к трещине $\alpha=1$. Соответствие фактических и расчетных значений находится в интервале $\alpha=0,85 \div 1$.

5.7 Поведение искусственных трещиноподобных дефектов при нагружении труб внутренним давлением

В данной работе рассматривали условия дестабилизации искусственных трещиноподобных дефектов и определяли пороговые условия, показывающие соотношение между линейными размерами дефектов и уровнем приложенных напряжений, при которых произойдут необратимые изменения в состоянии дефектов (начало «страгивания» дефекта и потеря несущей способности) при статическом и повторно-статическом характере приложения нагрузки.

Объектами обследования являлись три катушки 720х12 мм длиной около 4 м с эллиптическими заглушками на концах. Перед испытаниями на поверхность катушек наносились продольные надрезы глубиной около 50%

толщины стенки. Размеры и расположение надрезов указаны в таблице 6 и на рисунках 48-49.

Искусственные дефекты наносились вручную абразивным кругом толщиной 1 мм. Глубина дефектов замерялась штангенциркулем в трех точках – по центру разреза и по его сторонам на расстоянии 125 мм от центра. Ширина дефектов (расстояние между берегами разреза) измерялась с помощью измерительной лупы.

Таблица 5.2

Размеры продольных дефектов на трубах

№ стенда	№ дефекта	Глубина дефекта*1, мм			Длина дефекта, мм
		h1	h2	h3	
1	1,1	5,6	6,0	6,6	510
	1,2	5,5	6,0	5,4	550
	1,3(вн)**	5,5	6,0	5,5	560
2	2,1	8,6	9,0	8,0	516
	2,2	7,2	7,0	6,9	500
	2,3	4,0	3,8	3,5	315
	2,4	5,9	5,8	6,0	310

После испытаний из трубы 720x12 мм (стенд №2) были вырезаны темплеты 400x300 мм, из которых изготовлены образцы для оценки механических свойств. Цилиндрические поперечные образцы с диаметром рабочей части 5 мм для испытаний на одноосное растяжение по ГОСТ1497-84 (тип III №7). Механические испытания образцов из темплетов выполнялись в лабораторных условиях путем нагружения по схеме сосредоточенного изгиба на испытательной машине «Инстрон-ТТМ» при температурем 200С

По результатам оценки механических свойств установлено, что временное сопротивление разрушению трубы 720x12 мм составляет 640 МПа, предел текучести 530 МПа, относительное удлинение 21%, что соответствует классу прочности К65. Твердость металла, измеренная до испытаний на наружной поверхности стенда №1 и 2, практически одинакова и составляет 172-186НВ. Прочностные характеристики всех трубных катушек до начала испытаний были близки между собой и, по-видимому, соответствуют одной технологии обработки (проката). Металлографическое исследование показало, что структура трубного металла представляет собой мелкозернистый феррит со слоистым распределением перлита и соответствует

*1 - положение замера: h₂ – по центру надреза, h₁ и h₃ – на расстоянии по 125 мм от центра в обе стороны

** - дефект нанесен с внутренней стороны трубы

структуре низколегированной малоуглеродистой трубной стали в состоянии после контролируемой прокатки.

Для оценки состояния дефектов и раскрытия берегов дефектов в процессе испытания применялись методы магнитоиндукционного контроля, основанные на регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих над дефектом при наложении внешнего магнитного поля. Для этого применялись накладные датчики типа МВД, стационарно закрепленные на поверхности трубы над дефектом. Показания датчиков существенно зависят от глубины дефекта и величины раскрытия берегов трещин. Местом установки датчиков выбран участок на конце дефекта на расстоянии 16 мм от края, где глубина дефекта не превышает 2 мм и изменения показаний датчиков находятся, соответственно, в рабочем диапазоне.

Датчики над дефектами установлены единообразно, так, как показано на рис. 5.18. Результаты измерений были представлены графиками зависимости величины сигнала датчика от времени испытаний (рис. 5.19), которому соответствовали различные режимы нагружения.

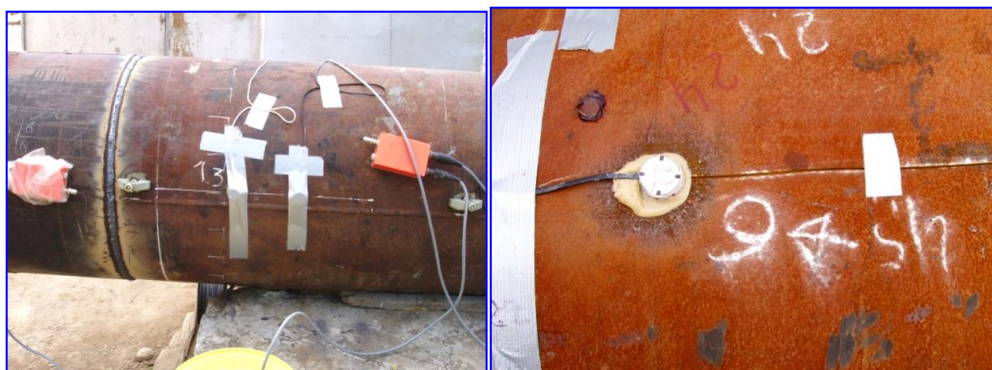


Рисунок 5.18. Установки магнитоиндукционных датчиков на поверхность трубы для контроля состояния дефекта

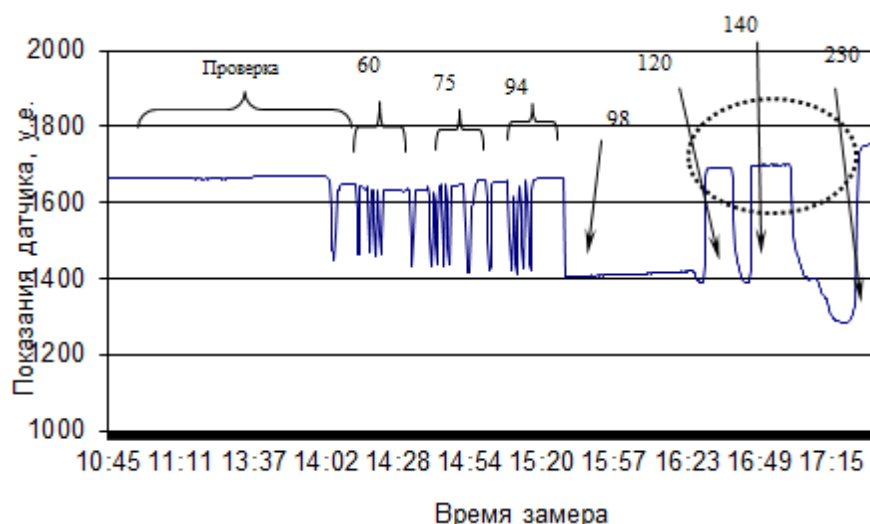


Рисунок 5.19. Характер изменения сигнала магнитоанизотропного датчика, установленного над дефектом: а –пунктир - момент появления остаточных изменений на дефекте; б - отсутствие изменений при нагрузке 140.

Из всего массива полученных данных выбирались значения, соответствующие экстремумам измеренных сигналов от датчиков. Далее оценивалось изменение сигнала после каждого этапа испытания и строилась зависимость «изменение величины сигнала датчика – время испытаний (давление)», которая и являлась объектом дальнейшего анализа.

Контроль состояния дефектов проводился с использованием оптического измерения раскрытия берегов дефекта. Перед началом испытаний выполнялась прогнозная оценка критических размеров дефектов для заданного внутритрубного давления, при котором произойдет начало течения материала в нетто-сечении стенки трубы, а также оценка критических размеров, необходимых для достижения предела прочности и разрушения стенки трубы. Оценка выполнялась с использованием методики определения несущей способности стенки трубы с продольной трещиной.

При нагружении трубопровода внутренним давлением максимальные напряжения возникают в кольцевом направлении, при этом осевые продольные напряжения имеют величину не более 0,5 от значения кольцевых. Поэтому продольные дефекты будут испытывать большее воздействие от растягивающих кольцевых напряжений, вызванных внутренним давлением, по сравнению с кольцевыми дефектами равных размеров.

Результаты прогнозного расчета критических размеров дефектов приведены на рис.20 для труб 720x11,2 мм из стали класса K65, нагруженных

внутритрубным давлением 75 кгс/см², 130 кгс/см². На этих же графиках приведены размеры продольных дефектов, нанесенных на трубную поверхность перед испытаниями, а также выделены дефекты, по которым произошли разрывы при испытательном давлении.

Бездефектные участки труб испытывают при давлении 160 кгс/см² расчетные максимальные напряжения в кольцевом направлении, которые соответствуют величине предела текучести. При давлении ниже 160 кгс/см² бездефектные участки находятся в упругой области нагружения.

В соответствии с расчетными данными пластическое течение в нетто-сечении стенки трубы возможно для стенда №1 - дефект 1.1 при давлении 120-130 кгс/см²; для стенда №2 - дефект №2.1 и №2.2 при давлении 75-85 кгс/см². Это означает, что указанные дефекты при заданном внутритрубном давлении могут изменить свое состояние, в частности, могут измениться магнитные свойства металла в зоне дефекта и остаточное раскрытие берегов дефектов.

Стенд 1

На поверхность трубы нанесены три продольных дефекта длиной 500-550 мм и глубиной около 6мм: два дефекта - с наружной стороны трубы и один дефект - с внутренней стороны стенки трубы. В процессе испытаний оценивалось изменение остаточного раскрытия дефектов и изменение магнитных свойств в окрестностях дефектов. Контроль внутреннего дефекта выполнялся двумя магнитоиндукционными датчиками, установленными с наружной стороны трубы напротив надреза на расстоянии около 10см от края дефекта с обеих сторон.

При испытаниях катушки было сделано нагружение давлением 60 кгс/см², 75 кгс/см², 94 кгс/см² – по 5 циклов и нагружение до разрыва, которое произошло при давлении 130 кгс/см². Разрушение катушки произошло по дефекту №1.1, имевшего наибольший расчетный уровень напряжений в нетто-сечении (рис. 5.20).

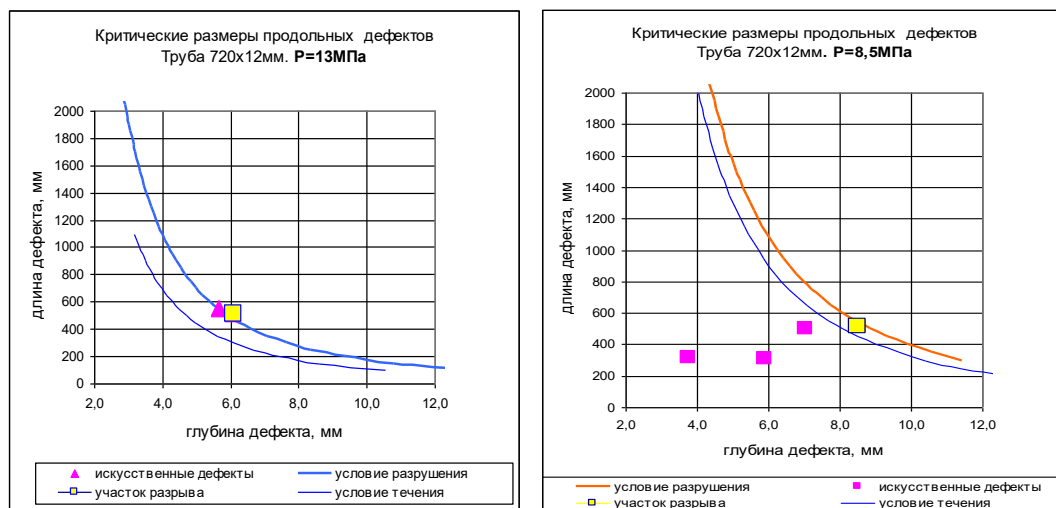


Рисунок 5.20. Критические размеры трещин

Характер разрушения вязкий с образованием грубослоистого излома, ориентированного под углом 45° к поверхности стенки трубы.

Оптический контроль, проводимый после циклов нагружения, обнаружил прирост остаточного раскрытия берегов дефекта после испытания давлением 94 кгс/см², что указывает на проявление неупругих эффектов, вызванных пластическим течением материала. При магнитном контроле было обнаружено заметное остаточное изменение величины сигнала датчика после циклов давлением 94 кгс/см², которое практически отсутствовало после более низкого испытательного давления. Расчетный уровень напряжений в нетто-сечении стенки трубы, соответствующий появлению указанных неупругих эффектов при давлении 94 кгс/см², составляет 478÷491 МПа, что соответствует величине примерно 0,9 значения предела текучести материала.

Стенд 2

На поверхность трубы нанесены четыре продольных дефекта длиной 300-340 мм и глубиной от 6 до 8,5 мм. В процессе испытаний оценивалось изменение остаточного раскрытия дефектов и изменение магнитных свойств в окрестностях дефектов.

При испытаниях катушки было сделано нагружение давлением 60 кгс/см² - 5 циклов, и 75 кгс/см². Разрушение катушки произошло при давлении 75 кгс/см² путем вязкого образования и развития трещины от дефекта, расположенного по телу трубы и имевшего наибольший расчетный уровень напряжений в нетто-сечении. Характер разрушения - вязкий с образованием

грубослоистого излома, ориентированного под углом 450 к поверхности стенки трубы.

Оптический контроль, проведенный после нагружения давлением 60 кгс/см², не обнаружил изменения остаточного раскрытия берегов дефекта. При магнитном контроле обнаружено заметное изменение величины сигнала датчика после первого цикла на 60 кгс/см², что указывает на проявление неупругих эффектов, вызванных пластическим течением материала. Расчетный уровень напряжений в нетто-сечении стенки трубы, соответствующий появлению указанных неупругих эффектов при давлении 60 кгс/см², составляет 452 МПа, что соответствует величине примерно 0,86 значения предела текучести материала.

Результаты стендовых испытаний труб с продольными трещинами КРН и труб с искусственными дефектами в виде продольных надрезов позволяют выполнить оценку трещиностойкости труб с продольными дефектами. Испытания повышенным давлением выполнены на трубах 1420x16мм из стали класса X70 с трещинами КРН глубиной до 5-7мм и длиной 100-300мм при нагружении до 123кгс/см² и на трубах 720x12мм класса X65 с искусственными продольными надрезами глубиной 6-8,5 мм и длиной около 500мм. Разрушение произошло на трубе 1420x15,7мм при давлении 112кгс/см² по дефекту с максимальной глубиной 7мм и длиной 260мм; при давлении 123 кгс/см² по дефекту с максимальной глубиной 5мм и длиной 110.мм. На трубе 720x12мм разрушение произошло по надрезу глубиной 6мм и длиной 510мм при давлении 130кгс/см² и по надрезу глубиной 8,5мм и длиной 516мм при давлении 75 кгс/см². Из рисунков 17 и 20 видно, что фактические размеры очага разрушения практически совпадают с результатами прогнозной расчетной оценки. Представленные зависимости могут быть использованы для инженерных расчетов несущей способности трубы с продольными трещинами.

Кроме того, контроль остаточных изменений на трещинах и надрезах с использованием магнитоиндукционных датчиков и оптического контроля показал, что начало пластического течения в вершине дефектов в обоих случаях соответствует расчетному уровню напряжений $0,85 \div 1$ от величины предела текучести. Эти данные показывают, что фактически отсутствует специфика в поведении под нагрузкой внутренним давлением труб с трещинами КРН, отличная от труб искусственными продольными надрезами. Это относится к условиям начала течения в вершине дефекта, а также к условиям разрыва трубы при достижении предела прочности в нетто-сечении трубы.

Для оценки несущей способности целесообразно в расчетах использовать коэффициент чувствительности к трещине 0,85 не только как условие начала течения, но и при расчетах размеров трещин для разрушения. Это ужесточение условий разрушения оправдано тем обстоятельством, что в практике эксплуатации газопроводов известны факты разрыва труб при их испытаниях повышенным давлением в течение выдержки под повышенным давлением спустя 20-30 минут. В этом случае испытания при активном нагружении могут давать завышенный уровень напряжений при разрушении относительно условий разрушения при эксплуатации трубопроводов в рабочем режиме.

5.8 Анализ прочностных характеристик и металло-фрактографическое исследование элементов сварных соединений магистрального газопровода

Основная опасность аварийных ситуаций, возникающих на магистральных трубопроводах заключается в неконтролируемом взрыве и возможном выбросе опасных веществ. Результатом подобных аварий станет неконтролируемое негативное воздействие на окружающую среду, а также экономические потери, разрушение и повреждение окружающей инфраструктуры, нанесение ущерба человеку.

Примером такой аварии стало разрушение участка газопровода-отвода с возгоранием газа. В результате металло-фрактографического анализа структурного состояния материала трубы и поверхности разрушения были выявлены причины аварийных ситуаций на магистральных трубопроводах.

Исследуемые образцы и методы исследования

С целью оценки качества металла поврежденной трубы требованиям, предъявляемым к металлу трубопроводов по СНиП 2.05.06-85 и ГОСТ 20295-85, были проведены лабораторные исследования следующими методами:

1) Для выявления на поверхности трубы коррозионных трещин, язв, дефектов сварного соединения и других поверхностных дефектов был проведён визуальный и измерительный контроль образцов № 1, 2, 3 и 4. Подготовка контролируемых поверхностей образцов, порядок проведения и оценка результатов визуального и измерительного контроля проведена в соответствии с требованиями СТО Газпром 2-2.4-083-2006.

2) Для выявления на поверхности трубы несплошностей (трещин) в соответствии с требованиями СТО Газпром 2-2.4-083-2006 был проведён

вихретоковый контроль образцов № 1, 2, 3 и 4. Для контроля использовался портативный дефектоскоп ВК-1.

3) Для определения характера и механизма разрушения аварийной трубы было проведено детальное фрактографическое исследование поверхности излома (стенки трубы) на образце № 7 с использованием стереоскопического микроскопа «CITOVAL» (CARLZEISS JENA). Исследование структуры металла аварийной трубы было проведено на образце № 8 с использованием оптических микроскопов «NEOPHOT-21» и «NEOPHOT-32» (CARLZEISS JENA) до и после травления шлифа (рисунок 6). Шлиф на образце № 8 был подготовлен способом шлифовки и последующей полировки. Для выявления металлографической структуры использован 3 %-ный раствор азотной кислоты (HNO_3).

4) Определением химического (элементного) состава материала трубы было проведено на образце № 12 (рисунок 2) методом спектрального анализа с использованием спектрометра «SPECTRO TEST», ГОСТ 18895-97.

5) Определение параметров механических свойств материала трубы:

- испытания на статическое растяжение были проведены на образцах № 9, 10 и 11 изготовленных токарно-фрезерным способом. Порядок проведения испытаний и оценка результатов в соответствии с требованиями ГОСТ 1497-84 (тип образцов I (с головкой), № 21) (рисунок 2). Температура образцов при испытаниях 20 °С. Применялась испытательная машина «INSTRON 2580»;

- испытания на ударный изгиб были проведены на образцах № 13, 14, 15, 16, 17 и 18 изготовленных токарно-фрезерным способом. Порядок проведения испытаний и оценка результатов в соответствии с требованиями ГОСТ 9454-78 (тип образцов 3, вид концентратора U) (рисунок 2). Температура образцов при испытаниях 20 °С и минус 20 °С (склонность материала трубы к хрупкому разрушению). Применялся маятниковый копёр «МК 15/30».

Для лабораторных исследований были представлены образцы (фрагменты) вырезанные из аварийного и «чистого» участков разрушившейся трубы. Параметры образцов сведены в таблицу 5.3.

Таблица 5.3

Параметры исследуемых фрагментов аварийного участка трубы

№ образца	Участок трубы	Способ извлечения	Состояние	Очистка	Размеры, мм	Назначение
1	Аварийный	Газовая резка	Следы разрушения	Есть, мягкой щеткой	220*450*6	
2					250*450*6	
3					115*560*6	
4					380*530*6	
5			не деформирован	-	190*300*6	Механ. испытания
6				-	190*300*6	
7		Вырезан абразивным кругом из №2		Промывка; Чистка мягкой щеткой	40*75*6	Фрактограф. исследования
8		Вырезан абразивным кругом из №4			35*60*6	Металлограф. исследования
9,10,11	тип образца I ГОСТ 1497-84	токарно-фрезерным способом из № 5			Пропорц. плоские образцы	для испытаний на растяжение, с головками
12	плоский образец	Вырезан абразивным кругом из №9			40*45*4	Для определения хим. состава материала
13,14,15, 16,17,18	тип образцов 3 ГОСТ 9454-78	токарно-фрезерным способом из № 6				для испытаний на ударный изгиб

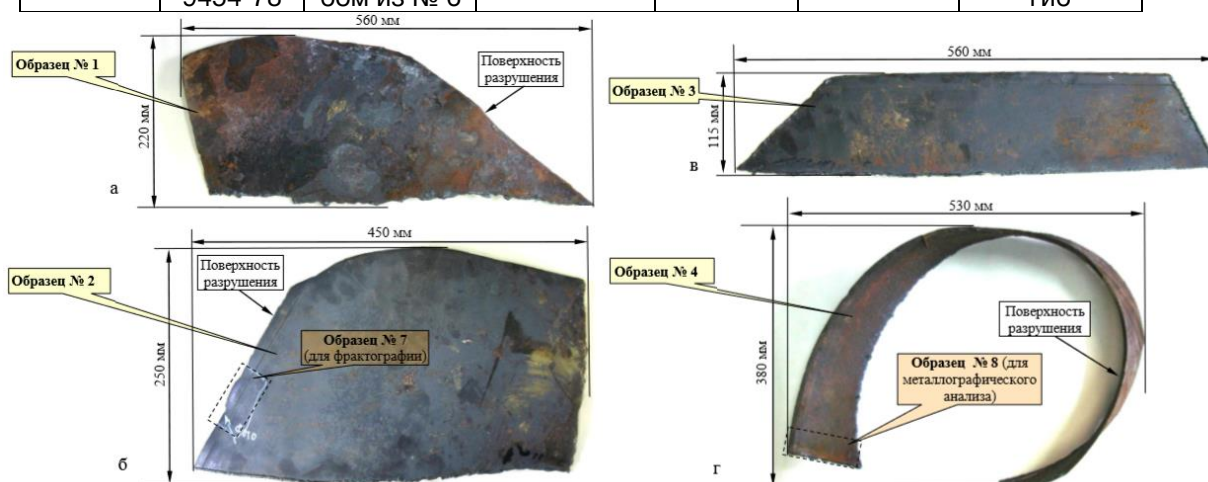


Рисунок 5.21. Фрагменты (образцы) аварийной трубы (377*6 мм),

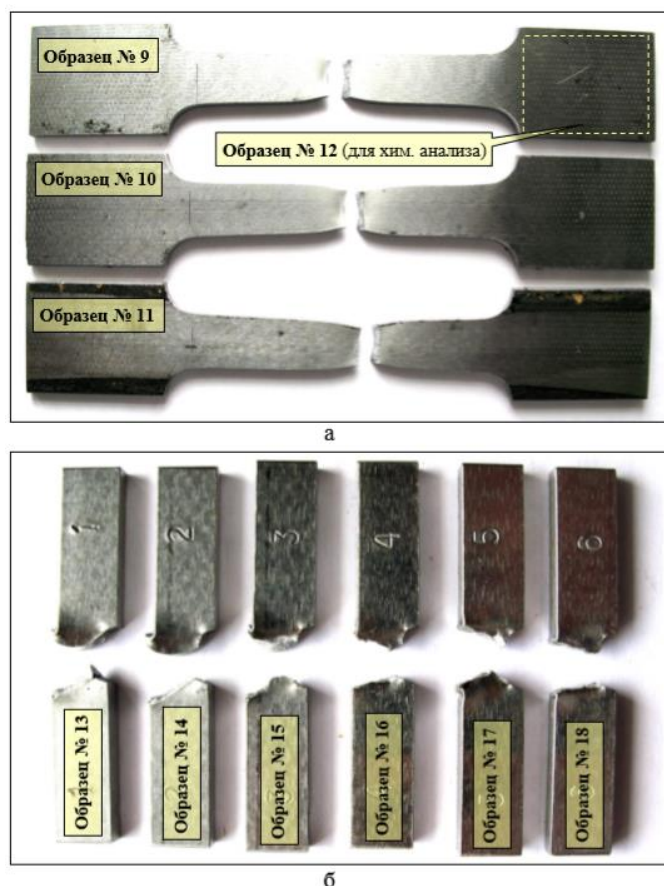


Рисунок 5.22. Общий вид образцов для испытаний: а - образцы для испытаний на растяжение; б - образцы для испытаний на ударный изгиб.

5.9 Результаты визуального контроля

Для исследования были предоставлены 4 фрагмента (образцы № 1, 2, 3 и 4) от разрушенной трубы (рисунок 5.21), которые содержали часть участков развития магистральной трещины.

При осмотре участков разрушения было установлено, что магистральная трещина развивалась по телу трубы на образце № 1, по телу трубы и по границе сварного шва на образце № 2, 3 и 4.

Визуальным осмотром наружной и внутренней сторон фрагментов, и последующим их сканированием с использованием вихретокового дефектоскопа ВК-1 установлено, что на поверхности труб отсутствуют следы коррозии, нет трещин (например, коррозионного растрескивания), которые могли бы служить следствием процессов повреждаемости, развивающихся во времени.

На наружной поверхности трубы (образцы № 2, 3 и 4) присутствует протяженный след от ролика в виде уступа глубиной до 0,5 мм и шириной 5 мм,

расположенного вдоль шва на расстоянии 15 мм от границы сплавления (рисунок 5.23 а). Однако, развитие магистральной трещины проходило вне следа от ролика, поэтому указанное механическое повреждение не может служить прямой причиной разрушения. Глубина следа ролика составляет порядка 0,5 мм. Подобное глубокое повреждение свидетельствует об использовании достаточно силового способа подгибки кромки трубы при изготовлении трубы, что должно вызвать появление высоких остаточных напряжений в околошовной зоне.

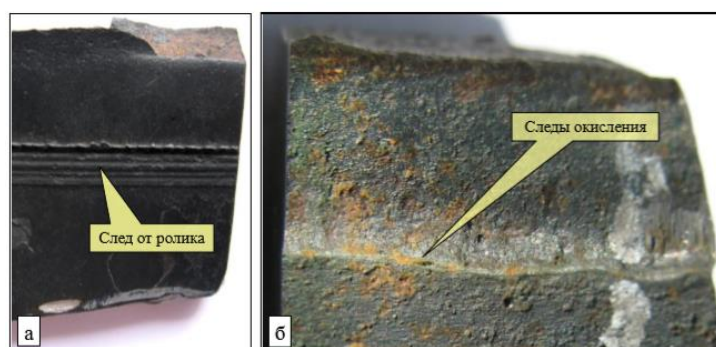


Рисунок 5.23. Дефекты на поверхности трубы и сварном соединении:
а - след от ролика глубиной 0,5 мм; б - следы окисления шва.

На поверхности наружной поверхности сварного соединения образца № 24 (рисунок 5.23б) присутствуют следы окисления. Окисление представляет собой короткие участки длиной 2-3 мм и глубиной 0,30,5 мм, что также снижает прочность сварного соединения.

Отсутствие следов коррозионно-механических повреждений позволяет предполагать, что разрушение трубы локализовано во времени и могло быть следствием разовой перегрузки относительно проектного нормативного уровня.

Исследование поверхности разрушения образца № 7 (рисунок 5.24) показало, что поверхность разрушения ориентирована под углом 45° к поверхности трубы, шероховатая по характеру разрушения и вязкая по типу среза, то есть, как и предполагалось, является следствием перегрузки. В этом случае сам факт разрушения определяется величиной перегрузки, а расположение очага разрушения - наличием ослабленного сечения.

Считается, что в сварных соединениях прочность металла в зоне шва может быть ниже прочности основного металла на (20-25) %, что, в отсутствие других дефектов, определяет положение очага разрушения по границе сварного шва.

При исследовании поверхности разрушения на образце № 7 обнаружен относительно короткий участок излома длиной 45 мм, отличающийся от соседних участков разрушения пространственной ориентацией на 90^0 и фактурой излома в виде продольной слоистости при вязком разрушении.

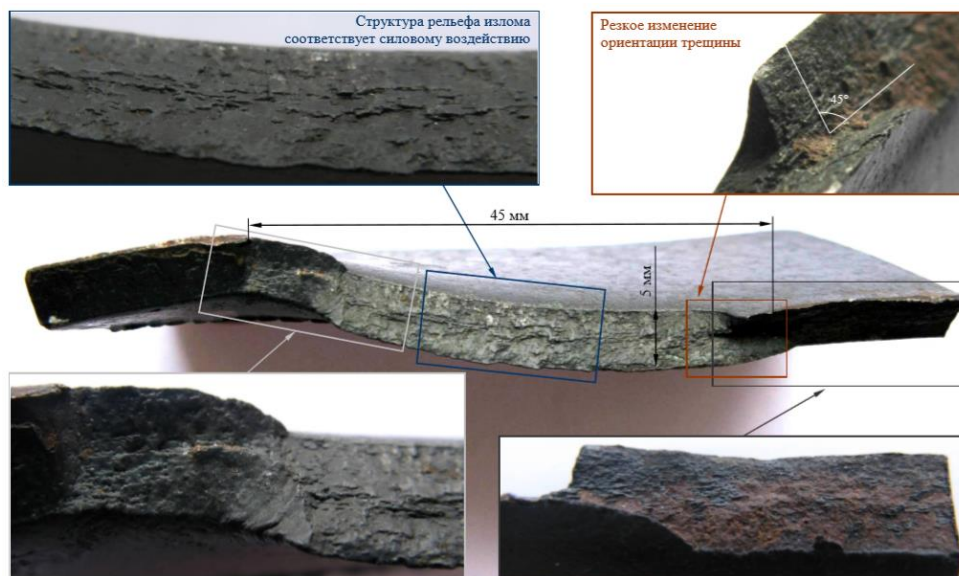


Рисунок 5.24. Общий вид излома стенки аварийной трубы (участок силового воздействия), образец № 7.

Минимальная толщина стенки трубы на данном участке составляет 5 мм, а на соседних участках больше – до 5,5 мм, что свидетельствует о большей степени пластической деформации, предшествующей разрушению на участке длиной 45 мм. Также очевидно, что «бегущая» трещина, если бы она распространялась от другого участка, не может (из соображений минимума энергетических затрат на распространение) дважды изменить направление (ориентацию) на коротком участке длиной 45 мм. Вероятная причина такого строения излома на данном участке - наличие очага разрушения, от которого трещина образовалась вначале при пластическом деформировании по толщине стенки, затем распространялась в обе стороны от очага в продольном направлении.

Результаты обследования поверхности разрушения предоставленных трубных фрагментов (образцы № 1, 2, 3 и 4) показали, что наиболее вероятной причиной разрушения трубопровода являлась силовая перегрузка, вызвавшая образование сквозной трещины (очага) длиной 45 мм при вязком разрушении по границе спирального шва и дальнейшее распространение трещины срезом в обе стороны от очага.

Приведенный сценарий развития разрушения наиболее достоверен при описании характерных особенностей предоставленных для исследования фрагментов трубопровода.

5.10 Результаты исследований на прочность

Характеристикой несущей способности при разрушении трубы является предел прочности материала. Расчет на прочность выполнялся в предположении равномерного распределения напряжений от внутреннего давления по сечению трубы.

Максимальные напряжения от внутреннего давления P - кольцевые, поэтому разрушение трубы с диаметром D и толщиной стенки t произойдет разрывом вдоль осевой линии. Разрушение наступит, когда кольцевые напряжения σ_K достигнут по значению величины предела прочности σ_b в нетто-сечении стенки трубы

$$\sigma_K = \frac{P(D-2t)}{2t} = \sigma_b \quad (1)$$

При наличии продольной трещины глубиной h и длиной L условие прочности можно переписать в виде зависимости критической глубины трещины h от длины дефекта и давления эксплуатации, при достижении которой произойдет разрыв стенки трубы по толщине:

$$h = t \sqrt{\frac{D}{L} \left(1 - \frac{P(D-2t)}{2\alpha\sigma_b t} \right)} \quad (2)$$

На рисунке 5.25 представлен график зависимости между длиной и глубиной трещины, при достижении которых для трубы 377*6 мм при давлении 5,4 МПа произойдет разрыв по толщине стенки².

² Лисанов М.В., Сумской С.И., Савина А.В. и др. Анализ риска магистральных нефтепроводов при обосновании проектных решений, компенсирующих отступления от действующих требований безопасности // Безопасность труда в промышленности. 2010. № 3. С. 58-66.

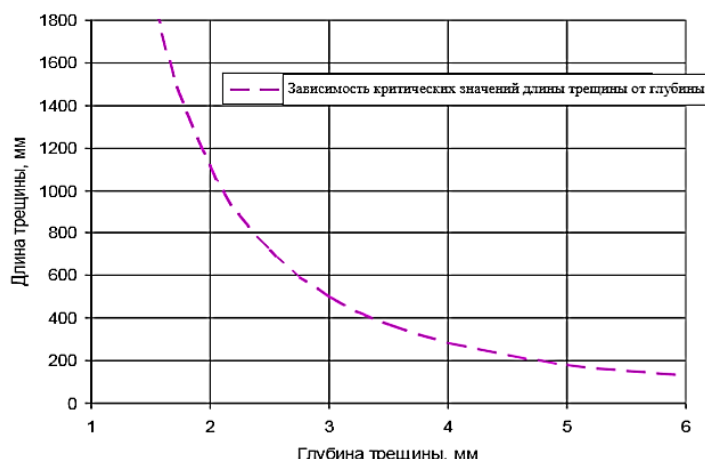


Рисунок 5.25. Критические размеры трещин. Труба 377*6 мм, сталь 20, давление 5,4 МПа

При минимальных значениях длины дефекта 150-200 мм критическая трещина для разрыва по толщине стенки должна быть практически сквозной. Поскольку дефекты указанных размеров на представленных фрагментах (образцах) не обнаружены, можно полагать, что причина разрушения прямо не связана с уровнем внутритрубного давления.

5.11 Результаты оценки качества материала аварийной трубы

Для определения элементного состава (марки стали) был применён спектрометр «SPECTRO TEST». Порядок проведения и оценка результатов в соответствии с требованиями ГОСТ 18895-97.

Таблица 5.4

Химический состав материала аварийной трубы

Место отбора образцов	Химические элементы, %							
	C	Si	Mn	S	P	Cu	Cr	Ni
Труба 377*6 мм	0,205	0,198	0,444	-	-	0,105	0,074	0,068
По сертификату № 429-1	0,19	-	0,49 0,51	0,016 – 0,020	0,016 – 0,024	-	0,25 – 0,30	-
ГОСТ 1050-74, Сталь 20	0,17 - 0,24	0,17 - 0,37	0,35 - 0,65	не более 0,04	не более 0,035	не более 0,25	не более 0,25	не более 0,25

Результаты элементного (химического) анализа материала аварийной трубы, проведенного на образце № 12 показали, что материал трубы соответствует элементному составу качественной углеродистой стали (Сталь 20). Сравнение полученных результатов с данными сертификата № 429-1 и ГОСТ 1050-74 приведены в таблице 5.2.

Металлографический анализ материала аварийной трубы, проведенный на образце № 8, вырезанном в зоне её разрушения, показал, что

структура основного металла трубы - феррито-перлитная смесь (рисунок 5.26 а), соответствует структуре стали 20 в отожженном состоянии.

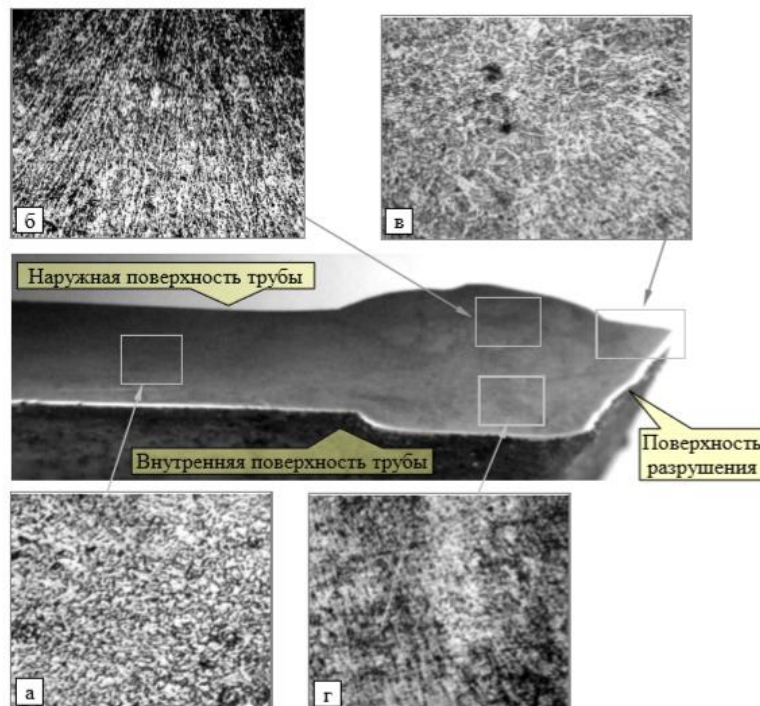


Рисунок 5.26. Микроструктура материала трубы и сварного соединения вблизи поверхности разрушения (поперечный шлиф), *5: а - структура основного металла трубы: феррито-перлитная смесь в отожженном состоянии, *50; б, г - сварной шов: б - верхний шов - столбчатая литая структура, *50; г - нижний шов - частично перекристаллизованная литая структура, *50; в - граница сплавления верхнего шва, *50.

Структура металла околшовной зоны (о.ш.з.) (рисунок 5.26 в) и металла сварных швов (рисунок 5.26 б, г) типична для сварного соединения [70]. Дефектов в плоскости исследованного шлифа не выявлено. При этом наблюдается повышенная неоднородность по размеру ферритных зерен и дисперсности выделений перлита, что является следствием температурного воздействия (горения трубы). Поверхность разрушения проходит через о.ш.з. от границы сплавления нижнего сварного шва к наружной поверхности трубы на расстоянии 3 мм от верхней границы сплавления (под углом 45°).

Средние значения параметров прочности (σ_B , $\sigma_{0,2}$) и пластичности (δ , ψ , $\sigma_{0,2}/\sigma_B$), полученные в результате проведенных механических испытаний материала трубы (образцы № 9, 10 и 11) на статическое растяжение в сравнении с данными ГОСТ 1050-88, СНиП 2.05.06-85 и сертификата № 429-1

представлены в таблице 3. Результаты проведенных испытаний показывают соответствие механических свойств (σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ , $\sigma_{0,2}/\sigma_B$) требованиям, предъявляемым к трубам из стали 20 по ГОСТ 1050-88, класса прочности К-42.

Таблица 5.5

Средние значения механических параметров материала трубы

Место отбора образцов	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Относительное удлинение δ , %	Относительное сужение ψ , %	Показатель пластичности материала $\sigma_{0,2}/\sigma_B$
Стенка трубы 377*6 мм	409	295	28,9	59,4	0,72
По данным сертификата № 429-1	430 - 460	280 - 300	33,8 – 35,4	-	-
ГОСТ 1050-88*	не менее 410	-	не менее 25	не менее 55	
СНиП 2.05.06-85			не менее 20		не более 75

Для проведения испытаний на ударный изгиб на образцах № 13, 14, 15, 16, 17 и 18 был использован образец тип 3, вид концентратора U, количество образцов для испытаний 6 шт., температура образцов при испытаниях 20 °С и минус 20 °С из-за склонности материала трубы к хрупкому разрушению. Применялась испытательная машина - маятниковый копёр «МК 15/30». Средние значения параметров ударной вязкости (КCU) полученные в результате проведенных испытаний материала трубы в сравнении с данными ГОСТ 20295-85 и СНиП 2.05.06-85 представлены в таблице 5.6.

Таблица 5.6

Результаты механических испытаний на ударный изгиб

№ образца	Температура испытания, °С	КCU, Дж/см ² (кгс*м/см ²)	
		Значения по испытаниям	Среднее значение
13	20°С	33,2	31,3
14		31,1	
15		29,7	
16	- 20°С	22,1	23,2
17		28,4	
18		19,2	
ГОСТ 20295-85	- 40°С	-	29,4 (3)
СНиП 2.05.06-85	- 40°С	-	29,4 (3)

Результаты проведенных испытаний на ударный изгиб показывают снижение ударной вязкости материала аварийной трубы в сравнении с данными ГОСТ 20295-85 и СНиП 2.05.06-85.

5.12 Выводы

Проведен анализ результатов исследования и испытания труб с дефектами КРН. В результате работы выявлено:

1) Начальной стадией повреждения поверхности трубы механизмом КРН является образование питтинга, который чаще всего зарождается на месте деградировавших неметаллических включений. При этом форма возникающего поверхностного повреждения (растравливание поверхности) воспроизводит форму включений, то есть имеет продольную ориентацию по отношению к прокатному трубному листу или изготовленной из листа трубе или определяется структурным состоянием металла. Определение минимального (порогового) размера дефекта («цепочки» питтингов), от которого способна расти трещина под действием механического фактора, дает следующие значения: для труб из стали класса X65-X70 – глубина более 70-80мкм и длина более 200мкм. Указанные значения соответствуют величине КИН около 5МПа/м. Другой установленный механизм зарождения поверхностных трещин обусловлен наличием чисто механических поверхностных концентраторов напряжений (царапин, вмятин) технологического или строительного происхождения.

2) Расположение зародышевых дефектов (неметаллических включений или механических концентраторов) в поверхностном слое трубного металла, количество которых в процессе эксплуатации не увеличивается, обуславливает расположение и размеры будущих колоний трещин коррозионного растрескивания, которые определяются начальным состоянием труб или

поверхностного слоя трубного металла. В отсутствие указанных концентраторов химического или механического происхождения стресс-коррозионные трещины в условиях действующей эксплуатации не образуются.

3) Произведенная оценка линейных размеров (максимальной глубины и общей длины) аварийных трещин для газопроводов с разным сроком наработки (для труб диаметром 1420 мм с толщиной стенки до 18 мм, из стали контролируемой прокатки класса X60-X70, эксплуатируемых при проектном давлении до 7,5 МПа) показывает линейную зависимость между общим временем наработки до аварии и максимальной глубиной «очаговой» трещины. Эта зависимость соответствует средней скорости развивающихся стресс-коррозионных трещин 1,15 мм/год (около 3×10^{-8} мм/сек). Указанное значение базируется на результатах обследования газопроводов ДУ1400 со сроком наработки от 5 до 14 лет при глубинах стресс-коррозионных трещин от 6 до 13 мм, что достаточно представительно для возможного диапазона размеров трещин и может использоваться для приближенных оценок «ожидаемых» глубин трещин (или оценки их состояния).

4) Анализ топографии излома стресс-коррозионных трещин глубиной до 12 мм показал, что до глубины (4-5) мм или, точнее, до значения КИН (при эксплуатационной нагрузке) 40 ± 2 МПа/м рельеф поверхности разрушения сохраняется практически неизменным. Дальнейший рост трещин или соответствующее увеличение КИН в вершине растущей трещины сопровождается огрублением рельефа излома. Характерно наличие области «плато» (независимости скорости трещины от ее глубины или величины КИН) для развития стресс-коррозионных трещин, распространяющейся до значений КИН (41-43) МПа/м. Дальнейший рост изолированной трещины происходит с последовательным увеличением скорости трещины до наступления момента сквозного дорыва стенки трубы.

5) Испытания повышенным давлением выполнены на трубах 1420x16 мм из стали класса X70 с трещинами КРН глубиной до 5-7 мм и длиной 100-300 мм при нагружении до 123 кгс/см² и на трубах 720x12 мм класса X65 с искусственными продольными надрезами глубиной 6-8,5 мм и длиной около 500 мм. Расчетная оценка критических размеров трещин практически совпала с фактическими данными о размерах дефектов в очаге разрушения для трещин КРН и для продольных искусственных дефектов. По результатам оптического и магнитного контроля трещин (оценка остаточных изменений в вершине трещины под нагрузкой) определен коэффициент чувствительности к трещине (0,85 – 1), устанавливающий отношение напряжения в нетто-

сечении для начала разрушения трубы с продольным дефектом к напряжению разрушения бездефектной трубы

6) Результаты стендовых испытаний труб с дефектами показали, что фактически отсутствует специфика в поведении под нагрузкой внутренним давлением труб с трещинами КРН, отличная от труб с искусственными продольными надрезами. Критические размеры трещин с приемлемой для оценочных расчетов точностью описываются зависимостью, устанавливающей соответствие размеров трещин с размерами трубы, внутренним давлением и прочностью трубной стали. Это относится к условиям начала течения в вершине дефекта, которое начинается при напряжении 0,85 от расчетного напряжения начала течения, а также к условиям разрыва трубы при достижении предела прочности в нетто-сечении стенки трубы

Исследование химического состава и оценка механических свойств металла аварийной трубы показали, что труба изготовлена из стали 20 класса прочности К-42. При этом химический состав и характеристики пластичности образцов из стали 20 (относительные удлинение и сужение) соответствуют интервалу свойств, гарантированному марочным составом стали. При этом показатель трещиностойкости (ударная вязкость) показывает снижение ударной вязкости материала аварийной трубы в сравнении с данными ГОСТ 20295-85 и СНиП 2.05.06-85. Возможной причиной занижения ударной вязкости является температурное воздействие в результате горения газа в месте разрушения. При этом не следует исключать возможность изначально низких значений уровня трещиностойкости, что могло привести к образованию трещины при возникновении силовой перегрузки.

Металло-фрактографическое исследование показало, что разрушение фрагментов происходило механизмом вязкого среза. Предполагаемый очаг разрушения длиной 45 мм находится на границе сплавления сварного спирального шва (образец № 7) от которого произошло дальнейшее распространение трещины срезом в обе стороны от очага.

Результаты обследования поверхности разрушения трубных фрагментов (Образцы № 1, 2, 3 и 4) показали, что наиболее вероятной причиной разрушения трубопровода являлась силовая перегрузка, вызвавшая образование сквозной трещины (очага) длиной 45 мм при вязком разрушении по границе спирального шва и дальнейшее распространение трещины срезом в обе стороны от очага. Необходимо отметить, что при минимальных значениях длины дефекта 150-200 мм критическая трещина для разрыва по толщине стенки должна быть практически сквозной.

Поскольку дефекты указанных размеров на представленных фрагментах не обнаружены, можно полагать, что причина разрушения прямо не связана с уровнем внутритрубного давления.

Результаты проведенных испытаний на статическое растяжение показывают соответствие механических свойств (σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ , $\sigma_{0,2}/\sigma_B$) требованиям, предъявляемым к трубам из стали 20 по ГОСТ 1050-88 и СНиП 2.05.06-85 класса прочности К-42.

Следует отметить наличие на наружной поверхности трубы протяженного следа от ролика в виде уступа глубиной до 0,5 мм и шириной 5 мм, расположенного вдоль спирального шва. Это свидетельствует о нарушении технологии производства трубы, что могло вызвать дополнительные напряжения и снижение прочностных свойств.

Следует отметить наличие следов окисления на наружной поверхности сварного соединения, представляющих собой короткие участки длиной 2-3 мм и глубиной 0,3-0,5 мм, что также снижало прочность сварного соединения. Однако, развитие магистральной трещины проходило вне указанных дефектов, поэтому они не могли служить прямой причиной разрушения.

При визуальном осмотре поверхности фрагментов отсутствуют признаки повреждаемости от времени, например трещины и язвенная коррозия. Отсутствие этих признаков свидетельствует об разовом воздействии вызвавшим разрушение.

Непосредственной причиной разрушения является разовая силовая перегрузка не связанная с ростом внутреннего давления. Предположительной причиной силовой перегрузки трубы в зоне разрушения является грунтовая неустойчивость, вызванная сезонным колебанием температур.

Заключение

Монография «Энергоэффективность как индикатор научно-технического и экономического потенциала общества» разработана на основе результатов научных исследований авторов.

Результаты выполненных исследований показали актуальность и своевременность для российской науки рассматриваемых вопросов в области энергосбережения.

В работе значительное внимание уделено вопросам, связанным с актуальными исследованиями в области энергосбережения в различных отраслях. Авторы доказали, что стратегическими целями развития электроэнергетики являются: обеспечение энергетической безопасности страны и регионов; удовлетворение потребностей экономики и населения страны в электрической энергии (мощности) по доступным конкурентоспособным ценам, обеспечивающим окупаемость инвестиций в электроэнергетику; обеспечение надежности и безопасности работы системы электроснабжения России в нормальных и чрезвычайных ситуациях.

В целом, работа отражает научные взгляды на современное состояние электроэнергетики. Она представляет интерес как для специалистов в области проведения научных исследований, так и специалистов-практиков.

Библиографический список

1. Energy recovery systems. [Электронный ресурс] - Center Point Energy. 2012 - <http://www.centerpointenergy.com/en-us/Services/Pages/rotating-wheels-MN.aspx>
2. Feldman David P. Chaos and Fractals: An Elementary Introduction. Oxford University Press, 2012, 408 p.
3. Heat pump. [Электронный ресурс]: Электронная энциклопедия – режим досуга: https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_pump
4. HOMER Energy [Electronic resource]. Mode of access: [Electronic resource]. Mode of access: <http://www.homerenergy.com/> (accessed: 8.12.2017)
5. Kautz R. Chaos: The Science of Predictable Random Motion. Oxford University Press, 2011, 369 p.
6. Kurt W. Roth, Dieckmann, P.E., James Brodrick. Demand Controlled Ventilation. // ASHRAE, 2003. –Volume 43.- С. 91-92.
7. Lambert, T., Gilman, P. & Lilienthal, P., Micropower system modeling with HOMER, in Integration of Alternative Sources of Energy, FA Farret and MG Simões. 2006, Wiley-IEEE Press. p. 379-418.
8. Mirzahosseini A. H., Taheri T. Environmental, technical and financial feasibility study of solar power plants by RETScreen, according to the targeting of energy subsidies in Iran / Renewable and Sustainable Energy Reviews. – Volume 16, Issue 5. – June 2012. P. 2806-2811.
9. Pan Y., Liu L., Zhu T . Feasibility analysis on distributed energy system of Chongming County based on RETScreen software / Energy. – Volume 130. – 1 July 2017. – P. 298-306.
10. Ramdhane, I. B. et al. “Optimization of electrical production of a hybrid system (solar, diesel and storage) pilot using HOMER in Biret, Southern Coast of Mauritania,” International Journal of Physical Sciences, Vol. 12(18), September 30, 2017, pp. 211-223.
11. RETScreen // Министерство природных ресурсов Канады. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.etscreen.net/ru/home.php> (дата обращения 12.12.2017).

12. Rudenko N.V., Sukiyaov A.G., ShokovaYu.A. Adaptive control efficiency enhancement for hybrid solar-wind energy farms // 7th International Scientific Conference Science and Society. Held by SCIEURO in London. 25-26 November 2014. P.43-50.
13. Sanner, Burkhard. Ground Source Heat Pump: a guide book "An action for the promotion and the dissemination of successful technologies in the ground source heat pump (GSHP) field" // EGEC, 2008.
14. Sen. Rohit, and Subhes C. Bhattacharyya Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER, Original Research Article Renewable Energy, Volume 62, February 2014, Pages 388-398.
15. Solex - интернет магазин альтернативной энергетики. [Электронный ресурс]: URL: // http://solex.com.ua/vetrogenerator_maglev_3000 (дата обращения 14.04.2018 г.).
16. US Environmental Protection Agency, Indoor Environments Division. Indoor Air Quality and Student Performance. [Электронный ресурс] – режим доступа: www.epa.gov/iaq/schools/pdfs/publications/iaq_and_student_performance.pdf
17. Абдуллин И.Г, Гареев А.Г, Мостовой А.В. Коррозионно-механическая стойкость нефтегазовых трубопроводных систем: диагностика и прогнозирование долговечности. - Уфа: Гилем, 1997. - 120 с.
18. Алимов С.В., Долгов И.А., Горчаков В.А., Сурков А.Ю., Сурков Ю.П., Рыбалко В.Г.. Диагностика коррозионного растрескивания газопроводов. Екатеринбург: Изд-во. Наука УрО РАН, 2004. 84с.
19. Аубакирова Ф.Х., Сыпабекова Г.Ж. Расчетно-экспериментальный метод оценки эффективности энергосберегающих мероприятий зданий // Вестник КазГАСА –Алматы, 2017. - №1(63). - С.71-75.
20. Аубакирова Ф.Х., Усенкулов Ж.А., Бейсенбаев А. О комплексном показателе тепловой защиты оболочки здания // Современные научные исследования и разработки– М.: НЦ «Олимп», 2017. - №4 (12). – С.29-32.
21. Базарский О.В., Михайлов В.В., Киринос С.Л. Потенциальная информационная емкость изображений, обрабатываемых автоматизированной системой и зрительным аппаратом человека // Вестник

Воронежского государственного университета. Серия: системный анализ и информационные технологии, 2006, № 1, с. 20–27.

22. Башкин В.Н., Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Аварийные выбросы природного газа: проблемы и пути их решения // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. № 8. С. 4-11.

23. Безруких П.П. Ветроэнергетика. (Справочное и методическое пособие). М.: ИД «ЭНЕГРИЯ». 2010, 320 с.

24. Безруких П.П., Сокольский А.К., Харитонов В.П. Системы гарантированного электроснабжения автономных потребителей на основе возобновляемых источников энергии. //Тез. докл. 3-й науч.-технич. конф. «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве», 14-15 мая 2003 года – Москва, ГНУ ВИЭСХ, 2003, 70-71 с.

25. Большаков А.М. Анализ разрушений и дефектов в магистральных газо-проводах и резервуарах Севера // Газовая промышленность. 2010. № 5. С. 52-53.

26. Ватин Н.И., Немова Д.В., Рымкевич П.П., Горшков А.С. Влияние уровня тепловой защиты ограждающих конструкций на величину потерь тепловой энергии в здании // Инженерно-строительный журнал, 2012. - №8. - С. 4-14.

27. Велькин В.И. Энергообеспечение удаленных сельских районов на базе кластеров ВИЭ: научно-практ. конф. «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий». – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2013. – с. 130-135.

28. Велькин В.И., Денисов К.С., Завьялов А.С., Разработка отечественного комплекса «VIZPO-RES» на основе анализа зарубежных программ расчета ВИЭ // Неделя науки СПбГПУ. – 2014. – СПб. – С.60-63.

29. Велькин, В.И., Денисов, К.С., Хайретдинова, Л.Р. Анализ компьютерных программ по выбору оборудования системы ВИЭ / Перспективные энергетические технологии. Экология, экономика, безопасность и подготовка кадров – 2016: материалы научнопрактической конференции 11 октября 2016 г. Екатеринбург, УрФУ, 2016. – с. 98-101.

30. Вертикально-осевые ветрогенераторы. За и против. [Электронный ресурс]: URL: // [http:// savenergy.info/page/vertikalno-osevye-vetrogenerator-za-i-protiv/](http://savenergy.info/page/vertikalno-osevye-vetrogenerator-za-i-protiv/) (дата обращения 14.04.2018 г.).
31. Ветровая роторная турбина Болотова, 5 кВт. Описание. [Электронный ресурс]: URL: // <https://kz.all.biz/vetrovaya-rotornaya-turbina-bolotova-5-kvt-g766353#.WnhrxPLjIU> (Дата обращения 16.04.2018 г.).
32. Ветрогенераторы с вертикальной осью вращения российского производства. [Электронный ресурс]: URL: <http://www.ekopower.ru/vetrogeneratoryi-s-vertikalnoy-osyu-vrashheniya-rossiyskogo-proizvodstva/> (дата обращения 12.04.2018 г.).
33. Ветрогенераторы с вертикальной осью вращения российского производства. [Электронный ресурс]: URL: <http://www.ekopower.ru/vetrogeneratoryi-s-vertikalnoy-osyu-vrashheniya-rossiyskogo-proizvodstva/> (дата обращения 14.04.2018 г.).
34. Ветряки для дома купить с гарантией - Energystock. [Электронный ресурс]: URL: <http://energystock.ru/vetrogenerator/vetryanye-elektrogenerator/vetryaki-dlya-doma-kupit> (дата обращения 12.04.2018 г.).
35. Ветряные генераторы. [Электронный ресурс]: URL: SokolAirVertical<https://www.envitechno.ru/каталог/ветряные-генераторы/s-a-v/>. (дата обращения 12.04.2018 г.).
36. Возобновляемая энергетика для регионов. Интернет портал общества ТЭК: [Электронный ресурс]: URL: // <http://www.energyland.info/analitic-show-99047> (дата обращения 10.04.2018 г.)
37. Волгина Н.И., Илюхина М.В., Сергеева Т.К. Изучение распределения водорода в аварийных трубах, разрушившихся в результате стресс-коррозии // Матер. II Междунар. конф. по водородному охрупчиванию металлов. - Донецк, 1998. - С. 245.
38. Воронин В.Н., Мамаев Н.И., Ахтимиров Н.Д. Бурдинский Э.В. Анализ стресс-коррозионного состояния магистральных газопроводов ООО «Севергазпром» на основе результатов внутритрубной дефектоскопии и обследований в шурфах, пути решения проблемы КРН // Особенности проявления КРН на магистральных газопроводах ОАО «Газпром». Методы диагностики, способы ремонта дефектов и пути предотвращения КРН: Матер.

отраслевого совещания ОАО «Газпром», г. Ухта, 11-15 ноября 2002 г. - Ухта, 2002. - С. 69-83.

39. Горшков А.С. Инженерные системы. Руководство по проектированию, строительству и реконструкции зданий с низким потреблением энергии – СПб: Издательство Политехнического университета, 2013. – 160с.

40. Горшков А.С. Нормирование потребления зданиями энергии. Расчет потребления зданиями тепловой энергии на отопление и вентиляцию за отопительный период: учеб.пособие / А.С.Горшков, Н.И.Ватин. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 212 с.

41. Государственная информационная система в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности. Экспертный портал по вопросам энергосбережения. Солнечная энергетика России: перспективы и проблемы развития. [Электронный ресурс]: URL: // <http://gisee.ru/articles/solar-energy/24510/> (дата обращения 10.04.2018 г.)

42. Государственная информационная система. Возобновляемые источники энергии России: [Электронный ресурс]: URL: // <http://gis-vie.ru> (дата обращения: 14.04.2018 г.).

43. Дальневосточного фонда экологического здоровья. Общее описание гибридных ветро-солнечных систем зеленой энергии. [Электронный ресурс]: URL: // <http://www.dvfond.ru/veter/comparison.shtml> (дата обращения 12.04.2018 г.)

44. Долгов И.А., Сурков Ю.П., Горчаков В.А., Пахтусов С.В., Рыбалко В.Г., Кношинский З. Оценка поведения стресс-коррозионных трещин при нагружении трубы внутренним давлением //Дефектоскопия. 2002. №2. С.83-89.

45. Долгов И.А., Сурков Ю.П., Горчаков В.А., Пахтусов С.В., Рыбалко В.Г. Опыт исследования и диагностики КРН магистральных газопроводов. В сб. Проблемы диагностики КРН и научно-технические решения по определению дефектных участков газопроводов. ОАО Газпром, Москва, 2000, с.28-34.

46. Долгов И.А., Сурков Ю.П., Горчаков В.А., Рыбалко В.Г. О возможных методах диагностики коррозионного растрескивания магистральных газопроводов. //Дефектоскопия, 2002. №11. С.26-36.

47. Долгов И.А., Сурков Ю.П., Рыбалко В.Г., Сурков Ю.П.. О некоторых вопросах стендовых испытаний труб с дефектами КРН. Материалы отраслевого совещания «Особенности проявления КРН на магистральных газопроводах ОАО Газпром. Методы диагностики, способы ремонта дефектов и пути предотвращения КРН». Часть 2, М., 2003, Газпром, с. 69 – 74.
48. Елистратов В.В., Конищев М.А. Ветродизельные электростанции для автономного энергоснабжения северных территорий России. Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE).– 2014(11). – С. 62-71.
49. Ермоленко Ю.Г., Большаков А.М., Черемкин М.К. и др. О техническом состоянии магистральных газопроводов Якутии // Безопасность труда в промышленности. 2003. № 10. С. 5-7.
50. Капранов М., Томашевский А. Регулярная и хаотическая динамика нелинейных систем с дискретным временем. М.: МЭИ, 2010, 256 с.
51. Карамов Д. Н. Оптимизация состава оборудования автономных энергокомплексов, использующих возобновляемые источники и накопители энергии : автореф. дис. ... канд. тех. наук : 05.14.01 / Д. Н. Карамов ; Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН – Иркутск, 2016. – 26 с.
52. Климат Ростовской области [Электронный ресурс] // Инвестиционный портал [сайт] URL: <http://invest-don.com/ru/klimat> (дата обращения 14.04.2018 г.).
53. Корчагин П.Т. Перспективы развития сельскохозяйственных предприятий Ростовской области и проблемы их энергообеспечения // Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона» №1, 2014: [Электронный ресурс]: URL: // <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2014/2224> (дата обращения 10.04.2018 г.).
54. Критерии идеального ветрогенератора. [Электронный ресурс]: URL: <http://vetronet.com/критерии-идеального-ветряка/>. (дата обращения 14.04.2018 г.).
55. Лисанов М.В., Сумской С.И., Савина А.В. и др. Анализ риска магистральных нефтепроводов при обосновании проектных решений, компенсирующих отступления от действующих требований безопасности // Безопасность труда в промышленности. 2010. № 3. С. 58-66.

56. Медведев В.Н. Анализ уровня эксплуатации и аварийности МГ Северного коридора // Газовая промышленность. 2004. № 6. С. 13-15.
57. Михайлов В.В. Оптимизация использования метеоинформации при решении практических задач // Метеорология и гидрология, 2006, № 2, с. 17-25.
58. Михайлов В.В., Кирносков С.Л. Методологические аспекты фрактально-структурированного учета метеоусловий при функционировании авиационных систем // Нелинейный мир, 2014, № 3, с. 14-19.
59. Михайлов В.В., Попов В.В., Кирносков С.Л. Нечеткая динамическая система поддержки принятия метеозависимых решений при обеспечении стрельбы и управления огнем // Научные технологии, 2012, № 3, т. 13, с. 3-7.
60. Мокроусов С.Н. Проблемы обеспечения безопасности магистральных и межпромысловых нефтегазопроводов. Организационные аспекты предупреждения несанкционированных врезок // Безопасность труда в промышленности. 2006. № 9. С. 16-19.
61. Морозов А.Д. Введение в теорию фракталов. Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004, 160 с.
62. Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». Научные подразделения. Институт статистических исследований и экономики знаний. Форсайт-центр. Новости. Солнечно-ветровые установки повысят эффективность преобразования энергии. [Электронный ресурс]: URL: // <https://foresight.hse.ru/news/152660612.html> (дата обращения 12.04.2018 г.)
63. Окупаемость Ветроэнергетических установок в условиях средней полосы России. [Электронный ресурс]: URL: <http://www.termocool.ru/products/okupaemost-vetroenergeticheskikh-ustanovok>. (дата обращения 14.04.2018 г.).
64. Основные виды ветрогенераторов: вертикальные, горизонтальные. [Электронный ресурс]: URL: <http://tcip.ru/blog/wind/osnovnye-vidy-vetrogeneratorov-vertikalnye-gorizontальные.html> (дата обращения 12.04.2018 г.).

65. Отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. - Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. - М.: 2011, 2012. 2013. 2014;
66. Полякова Л.С., Кашарин Д.В. Метеорология и климатология. Климат Ростовской области: [Электронный ресурс]: URL: // <http://eduknigi.ru/polyakova/meteorologiya.php?id=70> (дата обращения: 14.04.2018 г.).
67. Портал «Зелёный дом». Ветроэлектростанция Болотова: [Электронный ресурс]: URL <http://green-dom.info/3> (Дата обращения 16.04.2018 г.).
68. Постановление Правительства РО от 25.09.2013 № 592 "Об утверждении государственной программы Ростовской области "Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия" на 2014-2017 годы и на период до 2020 года. [Электронный ресурс]: URL:// <http://www.regionz.ru/index.php?ds=2394926> (дата обращения 10.04.2018 г.)
69. Постановление Правительства РФ от 14.07.2012 N 717 (ред. от 01.03.2018) "О Государственной программе развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013 - 2020 годы". [Электронный ресурс]: URL://http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_133795/5303cbf5887f046040d640a02a9a5be568d44695/(дата обращения 10.04.2018 г.)
70. Промышленная безопасность и надежность магистральных трубопроводов / Под ред. А.И. Владимирова, В.Я. Кершенбаума. – М.: Национальный институт нефти и газа, 2009. 696 с.
71. Ревазов А.М. Анализ чрезвычайных и аварийных ситуаций на объектах магистрального газопроводного транспорта и меры по предупреждению их возникновения и снижению последствий // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. 2010. № 1. С. 68-70.
72. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / Коллектив авторов. СПб.: Наука, 2002. 314 с.
73. Руденко Н.В., Ершов В.В., Воржев В.Б. Система автономного электроснабжения крестьянского фермерского хозяйства на основе возобновляемых источников энергии. // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения: Сборник статей 10 международной

научно-практической конференции 1 – 3 марта 2017 г., г. Ростов-на-Дону. В рамках 20-й международной агропромышленной выставки «Интерагромаш-2017», Ростов н/Д, 2017. С.563-567.

74. Руденко Н.В., Ершов В.В., Пугачев И. В. Устройство для преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию. Заявка № 2018104927 от 09.02.2018.

75. Свидетельство о Гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014614024, Программа Визуализации поиска оптимального кластера возобновляемых источников энергии (RES) «VIZPO-RES», Велькин В.И., Денисов К.С., Чернобай Е.В. Зарегистрировано 14 апреля 2014 г.

76. Свидетельство о Гос. регистрации программы для ЭВМ № 2016610783 Программа расчета и визуализации оптимальной комплексной системы возобновляемых источников энергии (RES) "VizProRES", Велькин В.И., Денисов К.С. Зарегистрировано 19.01.2016.

77. Свидетельство о Гос. регистрации программы для ЭВМ № 2013613097, Программа Автоматизированного расчета кластера ВИЭ «АРК-ВИЭ», Велькин В.И., Логинов М.И., Чернобай Е.В. Зарегистрировано 25 марта 2013 г.

78. СН РК 2.04-04 -2011. Тепловая защита зданий – Астана, 2011. – 50с.

79. СН РК 2.04-21-2004* Энергопотребление и тепловая защита гражданских зданий – Астана, 2006.

80. Соломин Е.В. Ветроэнергетические установки ГРЦ-Вертикаль // Альтернативная энергетика и экология, 2010 № 1.С. 10-15.

81. Соломин Е.В. Технические особенности и преимущества ветроэнергетических установок / Е.В.Соломин, Р.Л.Холстед // Альтернативная энергетика и экология. – М.: НИИЭС, 2010. – №1. – С.36–41.

82. Сравнительный анализ ветрогенераторов Сравнительный анализ вертикально-осевых и горизонтально пропеллерных ветроустановок. [Электронный ресурс]: <http://www.ecoteco.ru/id1198>. (дата обращения 12.04.2018 г.).

83. Сурков Ю.П., Горчаков В.А., Садртдинов Р.А., Рыбалко В.Г., Новгородов Д.В., Сурков А.Ю. Возможные причины избирательности

коррозионного растрескивания труб подземных магистральных газопроводов. //Дефектоскопия. 2005. №6. С.90-95.

84. Сурков Ю.П., Рыбалко В.Г., Павлов М.Ю., Сычева Т.С. Зарождение трещин при коррозионном растрескивании газопроводов//Физика металлов и металловедение. 1994. 78. вып. 1. С.147-151.

85. Сурков Ю.П., Рыбалко В.Г., Павлов М.Ю., Сычева Т.С. Развитие трещин коррозионного растрескивания в магистральных газопроводах//Физика металлов и металловедение. 1995. 80. вып. 5. С.141-147.

86. Сурков Ю.П., Рыбалко В.Г., Сычева Т.С. и др. Коррозионное растрескивание газопроводов. //Дефектоскопия. 2000. № 1. С.88-92

87. Сурков Ю.П., Рыбалко В.Г., Сычева Т.С. Коррозионное растрескивание газопроводов. Структурное состояние, характер разрушения/ Ю.П. Сурков, В.Г. Рыбалко, Т.С. Сычева [и др.] Екатеринбург. Изд-во. Наука УрО РАН, 1999. 72с.

88. Сурков Ю.П., Хороших А.В., Рыбалко В.Г. Изучение случаев коррозионного растрескивания действующих газопроводов: в кн. Коррозионное растрескивание трубных сталей. Семинар по проблемам коррозионного растрескивания, РАО Газпром, Север НИПИгаз, Ухта, 1996, с.57-62.

89. Сурков Ю.П., Хороших А.В., Рыбалко В.Г. Изучение случаев коррозионного растрескивания действующих газопроводов (англ.)// 3R International, 1996. № 7. С.396-403.

90. Сурков Ю.П., Хороших А.В., Рыбалко В.Г. Особенности зарождения и развития коррозионных трещин: в кн. Коррозионное растрескивание трубных сталей. Семинар по проблемам коррозионного растрескивания, РАО Газпром, Север НИПИгаз, Ухта, 1996, с.63-71.

91. Сурков Ю.П., Хороших А.В., Рыбалко В.Г., Ваулин С.Л. Сравнение результатов магнитной и ультразвуковой диагностики газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию //Дефектоскопия. 1997. № 12. с.49-57.

92. Табунщиков, Ю.А., Бродач М.М. Минимизация расхода энергии, затрачиваемой на отопление помещения // Строительство и архитектура, 1988. - № 12. – С.38-41.

93. Тепловой насос. [Электронный ресурс]: Электронная энциклопедия – режим досуга: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ Тепловой_насос](https://ru.wikipedia.org/wiki/Тепловой_насос)
94. Тепловые пункты. [Электронный ресурс] - промышленная группа «Генерация», 2012 - режим доступа: <http://www.generation-eo.ru/punkty>
95. Хижняков В.И., Жилин А.В. Определение инкубационного периода образования дефектов КРН на катоднозащищаемой поверхности подземных стальных трубопроводов // Практика противокоррозионной защиты. - 2009. - № 4. - С. 44-48.
96. Хороших А.В., Виллемс Г.Г., Барбиан О.А., Сурков Ю.П., Рыбалко В.Г.. Диагностика магистральных газопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию //Дефектоскопия. 1997. № 5. С.3-13.
97. Что лучше - вертикальный или горизонтальный ветрогенератор? Преимущества и недостатки: [Электронный ресурс]: URL:<http://vetrogenerator.com.ua/vetrogenerator/vertikal/148-chto-luchshe-vertikalnyy-ili-orizontalnyy-vetrogenerator-preimuschestva-i-nedostatki.html>. (дата обращения 14.02.2018 г.).
98. Чухаренов, Н.Р. Анализ развития аварийных ситуация при строительстве и эксплуатации трубопроводных систем в условиях Западной Сибири [Текст] / Р.В. Савинский, Блохина О.Л. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2011. - № 12.
99. Шилкин Н.В. Методы повышения тепловой эффективности зданий и их экономическая оценка: дис. ... канд. техн. наук. - М., 2007.
100. Шкаровский А.Л. Инженерные системы зданий и сооружений. Тепловые сети и системы теплоснабжения // Учебное пособие. - СПб: Издательство Политехнического университета, 2014.
101. Шустер П. Детерминированный хаос. М.: Мир, 1988, 240 с.

Сведения об авторах

Аубакирова Фарида Хабиевна

к.т.н., доцент Южно-Казахстанского
государственного университета
им.М.Ауэзова

Буклешев Дмитрий Олегович

аспирант СамГТУ, ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический
университет»

Велькин Владимир Иванович

к.т.н., доцент кафедры атомные станции и
возобновляемые источники энергии,
Уральский федеральный университет
имени первого Президента России
Б.Н.Ельцина

Воржев Владимир Борисович

к. ф.-м. н., доцент кафедры
«Электротехника и электроника», ФГБОУ
ВО "Донской государственный
технический университет"

Денисов Константин Сергеевич

аспирант кафедры прикладной
математики, Уральский федеральный
университет имени первого Президента
России Б.Н.Ельцина

Драбенко Вадим Анатольевич

профессор, д.т.н, к.э.н, зав.каф.
информационных технологий,
безопасности и права автономного
образовательного учреждения высшего
образования Ленинградской
области "Государственный институт
экономики, финансов, права и технологий"

Драбенко Валерия Алексеевна

доцент, к.ф.м.н.

Драбенко Дмитрий Вадимович

магистр, младший научный сотрудник
федерального государственного
бюджетного учреждения "Научно -
исследовательский институт Арктики и
Антарктики".

Ершов Валерий Васильевич

к.т.н. доцент, доцент кафедры
инфокоммуникационных технологий и
систем связи , Северо-Кавказский филиал
ордена Трудового Красного Знамени
ФГБОУ ВО «Московский технический
университет связи и информатики"

Руденко Николай Валерьевич

к.т.н. доцент, доцент кафедры
"Радиоэлектроника", ФГБОУ ВО «Донской
государственный технический
университет»

Электронное научное издание
сетевого распространения

**Энергоэффективность как индикатор научно-
технического и экономического потенциала
общества**

монография

По вопросам и замечаниям к изданию, а также предложениям к
сотрудничеству обращаться по электронной почте

Подготовлено с авторских оригиналов



ISBN 978-5-907072-10-7



9 785907 072107

Усл. печ. л. 5,6.

Объем издания 4,3 МВ

Оформление электронного издания: НОО

Профессиональная наука, mail@scipro.ru

Дата размещения: 20.04.2018 г.

URL: <http://scipro.ru/conf/monographenergetics.pdf>