



ЛОМАНЦОВ ВИКТОР АНАТОЛЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
НЕФТЕГАЗОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ, ЭКСПЛУАТИРУЕМОГО
В СЕРОВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕДАХ,
С ПРИМЕНЕНИЕМ АНАЛИЗА ОХРУПЧИВАНИЯ МЕТАЛЛА**

**Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
в нефтяной и газовой промышленности**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Работа выполнена в открытом акционерном обществе «Системы и технологии обеспечения безопасности. Техдиагностика» – специализированном центре по диагностированию оборудования на объектах сероводородсодержащих нефтегазовых месторождений и газоперерабатывающих заводов ОАО «Газпром»

Научный руководитель -

доктор технических наук
Митрофанов Александр Валентинович

Официальные оппоненты:

Зорин Евгений Евгеньевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой материаловедения
Московского государственного
машиностроительного университета

Ботвина Людмила Рафаиловна
доктор технических наук, профессор,
главный научный сотрудник
Института металлургии и материаловедения
им. А.А.Байкова Российской академии наук

Ведущая организация -

ООО "Волго-Уральский
научно-исследовательский и проектный
институт нефти и газа" (ВолгоУралНИПИГаз),
г. Оренбург

Защита состоится "___" мая 2013. в 14 часов 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 511.001.02, созданном на базе ООО "Газпром ВНИИГАЗ" по адресу: 147717, Московская обл., пос. Развилка, ООО "Газпром ВНИИГАЗ", 2 этаж, конференц-зал ОНТЦ

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ООО "Газпром ВНИИГАЗ".

Автореферат разослан "___" апреля 20 13 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

Курганова Ирина Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Стратегией национальной безопасности, программами приоритетного развития науки и техники Российской Федерации и ОАО «Газпром» поставлены задачи научного обоснования теоретических и методических основ оценки и обеспечения безопасности опасных производственных объектов (ОПО). В их числе, газохимических комплексов по добыче природного газа и нефти, содержащих сероводород (ГХК). В составе ОПО ГХК эксплуатируются десятки тысяч единиц оборудования, имеющего наработку в два и более раз выше установленной проектом. Длительная эксплуатация и воздействие влажных сероводородсодержащих нефтегазовых рабочих сред под высоким давлением, кроме коррозионного износа вызывают охрупчивание металла высоконагруженных участков оборудования. Охрупчивание металла элементов оборудования увеличивает вероятность их хрупкого разрушения. Предупреждение такого разрушения возможно путем установления и прогнозирования при диагностировании оборудования значений параметров состояния металла, характеризующих охрупчивание, и оценки с их учетом возможности продолжения его эксплуатации и остаточного ресурса.

Оценка параметров, характеризующих охрупчивание металла, может быть выполнена по результатам разрушающих испытаний образцов, вырезанных из наиболее нагруженных элементов оборудования. Такие вырезки влекут за собой необходимость замены этих элементов. Из-за сложности работ и отсутствия элементов для замены такие вырезки и испытания образцов в практике диагностирования выполняются крайне редко, в основном на выбраковываемых элементах. При этом результаты оценки параметров, характеризующих охрупчивание, относятся к металлу вырезанных элементов и не могут служить базой сравнения для следующих испытаний, что делает невозможным мониторинг, установление закономерностей и прогнозирование охрупчивания этого металла. В этих условиях разработка метода диагностирования нефтегазового оборудования, эксплуатируемого в сероводородсодержащих средах, с применением анализа охрупчивания металла является актуальной и значимой задачей исследования.

Цель диссертационной работы. Разработка метода диагностирования нефтегазового оборудования, эксплуатируемого в сероводородсодержащих рабочих средах, с применением анализа охрупчивания металла для снижения вероятности хрупкого разрушения и повышения надежности эксплуатации.

Задачи исследования:

1. Исследование эксплуатационных факторов и последствий охрупчивания металла, обзор методов и анализ результатов диагностирования оборудования, длительно эксплуатируемого в сероводородсодержащих средах.
2. Анализ и обоснование параметров, характеризующих охрупчивание металла оборудования, критериев и метода диагностирования, мониторинга и прогнозирования значений этих параметров.
3. Исследование закономерностей изменения и зависимостей значений твердости и ударной вязкости в области температур вязко-хрупкого перехода для металла оборудования.
4. Обоснование возможности и разработка способа и технических решений от-

бора минипроб металла элементов оборудования и его испытаний на твердость в области температур вязко-хрупкого перехода.

5. Апробация метода и разработка методики диагностирования нефтегазового оборудования, эксплуатируемого в сероводородсодержащих рабочих средах, с применением анализа охрупчивания металла для снижения вероятности хрупкого разрушения и повышения надежности эксплуатации, оценка эффективности ее применения.

Методы исследования. Методы экспериментальных, лабораторных, стендовых, разрушающих и неразрушающих испытаний и исследований параметров состояния и охрупчивания металла элементов оборудования; методы расчетов прочности, прогнозирования ресурса и математической статистики.

Научная новизна. Впервые обоснованы, подтверждены экспериментально и предложены характеристики охрупчивания металла элементов оборудования ГХК, выражаемые зависимостями между значениями диагностического параметра твердости (Н) и параметра, характеризующего охрупчивание - ударной вязкости (KCV) для температур испытаний $-60, -40, -20, 0, +10, +20^{\circ}\text{C}$ (T_{1-6}).

Теоретически обоснованы и разработаны метод анализа охрупчивания металла, математическая модель и алгоритм оценки, мониторинга и прогнозирования значений параметров KCV и температуры вязко-хрупкого перехода (T_k) на основе зависимостей Н-KCV при T_{1-6} для металла оборудования, эксплуатируемого в сероводородсодержащих средах.

Расчетно обоснована возможность, разработан и апробирован способ отбора минипроб металла для испытаний при диагностировании, не требующий ремонта или замены высоконагруженных элементов оборудования.

Разработано специальное захлаживающее устройство – предметный стол твердомера, обеспечивающий захлаживание до -70°C и стабильность регулирования требуемой температуры при испытании твердости металла образцов до $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

Защищаемые положения:

Теоретическое и экспериментальное обоснование зависимостей между значениями Н и KCV при температурах испытаний T_{1-6} для ряда последующих состояний охрупченности металла элементов диагностируемого оборудования ГХК.

Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение метода анализа охрупчивания металла, модели и алгоритма оценки, мониторинга и прогнозирования значений параметров KCV и T_k .

Способ отбора минипроб металла, не требующий ремонта или замены высоконагруженных элементов оборудования, для испытаний с использованием захлаживающего устройства - предметного стола твердомера.

Обоснование нормативно-методических принципов и алгоритма диагностирования нефтегазового оборудования с применением анализа охрупчивания металла и показатели эффективности их применения.

Достоверность и обоснованность научных результатов исследований

Достоверность результатов исследований обеспечена применением стандартизованных методов контроля и испытаний; сертифицированных и метрологически

поверенных измерительных приборов и испытательного оборудования; стандартизованных математических методов и сертифицированных пакетов компьютерных программ математического моделирования (MathCad) и анализа напряжений в конструкциях методом конечных элементов (COSMOS/M); сверкой результатов экспериментальных исследований с данными промышленной апробации на реальном оборудовании ГХК.

Обоснованность выводов и рекомендаций подтверждена литературными данными и экспериментальными исследованиями.

Практическая значимость и реализация результатов работы

Практическую значимость представляют функциональные зависимости Н-КСУ, модели и метод диагностирования, мониторинга и прогнозирования параметров, характеризующих охрупчивание металла; способ, технические решения и специальные устройства для отбора минипроб металла элементов оборудования и их испытаний на твердость при заданных, в том числе отрицательных, температурах для установления по их значениям T_k .

Разработанные и апробированные научно-технические решения реализованы в «Методике диагностирования нефтегазового оборудования, эксплуатируемого в сероводородсодержащих средах, с применением анализа охрупчивания металла». Применение методики при диагностировании, оценке и прогнозировании технического состояния оборудования ГХК позволяет систематически получать и накапливать текущие и прогнозные значения T_k для уточнения значения допускаемого коэффициента интенсивности напряжений [K_I] и выполнения расчетов сопротивления металла элементов оборудования хрупкому разрушению. Результаты таких расчетов позволяют устанавливать новые, отличные от проектных, нормы допустимых параметров дефектов и другие меры предупреждения хрупкого разрушения элементов оборудования ГХК.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на: V, VI, VII, VIII, IX Международных научно-технических конференциях «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред» (г. Оренбург, 2004, 2006, 2008, 2010, 2012); Отраслевом совещании «Состояние и основные направления развития неразрушающего контроля сварных соединений объектов транспорта газа ОАО «Газпром»» (г. Уфа, 2007 г.); V международной научной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций» (г. Оренбург, 2008 г.); 3-й научно-технической конференции с международным участием «Основные проблемы освоения и обустройства нефтегазовых месторождений и пути их решения». (г. Оренбург, 2009 г.) и др. научно-технических конференциях и семинарах.

Публикации по теме. По теме диссертации опубликована 21 научная работа, из них 7 в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных Минобрнауки РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения; изложена на 136 страницах; содержит 37 рисунков, 33 таблицы и список использованных источников из 138 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы объект, предмет, цель и задачи исследования, научная новизна, защищаемые положения и практическая значимость результатов исследования.

В первой главе рассмотрены особенности решения задачи обеспечения и поддержания на требуемом уровне безопасного состояния при эксплуатации оборудования ГХК, имеющего наработку, значительно превышающую проектный срок эксплуатации. Показано, что наиболее опасным повреждающим проявлением воздействия рабочей среды, нагрузок и длительности эксплуатации является охрупчивание металла, влекущее за собой повышение вероятности хрупкого разрушения оборудования.

Выполнен анализ: накопленных данных исследований негативных проявлений и последствий охрупчивания металла; качественных и количественных показателей характеристик, свойств и параметров состояния металла оборудования ГХК, определяющих его стойкость и долговечность эксплуатации под воздействием сероводородсодержащих рабочих сред и нагрузок; параметров состояния металла оборудования, получаемых неразрушающими и разрушающими испытаниями; действительной нагруженности конструкции элементов оборудования ГХК; обзор методов неразрушающего контроля (НК) и мер повышения точности и чувствительности приборов и достоверности результатов НК при оценке свойств и параметров состояния металла оборудования; результатов многочисленных исследований, ведущих ученых в области взаимозависимости значений параметров состояния металла: С.В. Серенсена, Н.А. Махутова, В.В. Харионовского, Л.Р. Ботвиной, О.И. Стеклова, Е.Е. Зорина, Б.Р. Павловского, В.М. Горицкого, В.Н. Лозовского, И.Н. Кургановой, А.В. Митрофанова, Г.В. Карпенко, В.М. Кушнарченко, С.Н. Барышова, Г.П. Кандакова и др. Показано, что интенсивность охрупчивания металла в различных зонах и участках конструктивных элементов оборудования различна и в зависимости от качества металла, его напряженно-деформированного состояния и особенностей воздействия рабочей среды может быть близкой к нулю или иметь максимум. По данным 1980 случаев разрушения элементов оборудования ГХК в более 70% изломы имели хрупкий характер. Для предотвращения хрупкого разрушения оборудования ГХК необходимо при его диагностировании уверенно с требуемой точностью и достоверностью определять и накапливать текущие и прогнозные значения параметров, характеризующих охрупчивание металла в наиболее нагруженных зонах и участках конструктивных элементов. Отмечено, что по результатам выполненных неразрушающих и разрушающих испытаний собрать такие данные и выполнить анализ закономерностей охрупчивания металла оборудования ГХК до настоящего времени не удалось.

Основываясь на результатах известных исследований взаимозависимостей параметров состояния металла элементов оборудования ГХК, получаемых неразрушающими методами испытаний, и параметров, характеризующих охрупчивание этого металла, в диссертационном исследовании ставится и решается задача получения таких индивидуальных зависимостей для металла наиболее нагруженных элементов оборудования; разработки на их основе методики и технических решений, позволяющих с требуемой достоверностью систематически получать без повреждающей

вырезки образцов испытаний и необходимости их замены, накапливать и оценивать значения параметров, характеризующих охрупчивание металла наиболее нагруженных элементов оборудования, устанавливать с учетом их значений условия и меры безопасной эксплуатации для предупреждения хрупкого разрушения оборудования ГХК.

Во второй главе представлены результаты выбора и обоснования параметров, характеризующих охрупчивание, критериев и метода контроля, оценки, мониторинга, установления закономерностей изменения и прогнозирования охрупчивания металла при диагностировании оборудования ГХК. По результатам анализа требований нормативно-технической документации (НТД), исследований известных ученых и специалистов Н.А. Махутова, М.М. Гаденина, О.М. Иванцова, В.В. Харионовского, В.М. Горицкого, Д.П. Хромова, Л.Р. Ботвиной, Е.Е. Зорина, К.М. Ямалева и многих других, а также собственных исследований установлены наиболее чувствительные параметры состояния металла, характеризующие его охрупчивание: K_{CV} , T_K , K_{1c} . Из них для исследования взаимосвязей между параметрами, характеризующими охрупчивание, и параметрами НК состояния металла по следующим причинам выбран параметр K_{CV} : по значениям K_{CV} согласно НТД определяются значения T_K , $[K_1]$; значения K_{CV} нормируются проектом и НТД, результаты испытаний K_{CV} имеются в сертификатах на металл всех элементов и сварных швов оборудования ГХК; накоплен массив данных K_{CV} при ряде положительных и отрицательных температур испытаний металла элементов оборудования ГХК бывшего в эксплуатации.

По результатам многочисленных исследований известных ученых в области взаимосвязи значений K_{CV} , механических свойств и H – М.П. Марковца, А.А. Барона, В.П. Шишочкина, С.В. Беляева, Ф.Ф. Витмана и многих других, собственных исследований и опыта применения в практике диагностирования универсальных корреляционных зависимостей значений механических свойств и H металла (ГОСТ 22761, ГОСТ 22762, РД 12-411 и др.) и их уточнений для металла оборудования ГХК обоснованы: возможность экспериментального установления закономерностей такой зависимости для металла оборудования ГХК на стадии его эксплуатационного старения, характеризуемой упрочнением; применение в качестве одного из основных параметров НК состояния металла оборудования ГХК параметра H . Выполнен анализ известных исследований зависимостей H -температура (T) и K_{CV} - T и статистических характеристик значений H и K_{CV} как случайных величин. Показано, что для определенного состояния охрупченности металла при заданной T испытаний вполне определенным значениям H будут соответствовать определенные значения K_{CV} . Теоретически обосновано, что в интересующей нас области T вязко-хрупкого перехода зависимости H - T могут быть описаны экспоненциальной функцией вида:

$$H = B \exp(-\alpha T), \quad (1)$$

где B , α – коэффициенты, зависящие от свойств материала.

А зависимости K_{CV} - T могут быть представлены функцией вида:

$$K_{CV} = A_1 \cdot T^n + A_2 \cdot T^{n-1} + \dots + A_n, \quad (2)$$

где A_i , n – константы, устанавливаемые экспериментально.

Алгебраическое решение уравнений 1 и 2 показывает, что зависимость H - K_{CV} в области температур вязко-хрупкого перехода также будет существовать и в общем виде может быть представлена выражением:

$$K_{CV} = A_1 [\ln H / \alpha B]^n + A_2 [\ln H / \alpha B]^{n-1} + \dots + A_n \quad (3)$$

Значения коэффициентов A_1, A_2, B, n – будут индивидуальными для каждого металла и температуры испытаний и могут быть определены экспериментально по результатам разрушающих испытаний KCV и измерений Н.

По результатам этих исследований обоснован и предложен метод анализа охрупчивания металла. Основу метода составляют индивидуальные для каждого металла элементы оборудования ГХК зависимости Н-KCV. Этими зависимостями характеризуется индивидуальная закономерность охрупчивания конкретного металла для определенных температур испытаний в последующих состояниях упрочнения вплоть до минимума значений KCV.

Выполнен анализ исходных и текущих значений T_k металла элементов оборудования ГХК, выбран ряд значений T_{1-6} : -60, -40, -20, 0, 10, 20°C для экспериментальных испытаний Н и KCV и установления при каждой из T_{1-6} индивидуальных зависимостей Н-KCV. Используя эти зависимости и получив, при очередном диагностировании, т.е. новом состоянии металла элементов оборудования ГХК, значения Н при T_{1-6} возможно определить по ним значения KCV при каждой из T_{1-6} . Таким образом, получив однажды для конкретного металла оборудования ГХК индивидуальные зависимости Н-KCV для каждой из T_{1-6} , становится возможным установить новую зависимость KCV-T в области T_{1-6} при каждом новом диагностировании путем проведения новых измерений и получения новых значений Н при T_{1-6} .

Как обосновано в главе 4, измерения Н при T_{1-6} возможно выполнить на мини-образцах, отбираемых от кромок патрубков штуцеров сосудов, при этом замена или ремонт штуцерных узлов не требуется.

Для оценки значения параметра T_k металла в этом новом состоянии обосновано использование критериального значения ударной вязкости [KCV]. Значение [KCV] установлено проектом ГХК. В случае отсутствия его значения может быть определено по НТД, например, по ПНАЭ Г-7-002-86.

В соответствии с методическими основами оценки сопротивления хрупкому разрушению определяемыми таким образом значениями параметра T_k характеризуется начало области температур перехода состояния исследуемого металла от вязкого к вязко-хрупкому.

Математическая модель оценки каждого из различных новых состояний охрупченности металла оборудования ГХК может быть представлена следующими выражениями. Критическая температура хрупкости T_k находится как аргумент зависимости KCV(T) при достижении ей значения [KCV]:

$$KCV(T) \cap [KCV] = T_k \quad (4)$$

Это же выражение справедливо для любых различных от i до n состояний охрупченности металла, при этом для каждого состояния охрупченности T_{k_i} будет иметь различные значения:

$$KCV_i(T) \cap [KCV] = T_{k_i} \quad i = 1 \dots n \quad (5)$$

На стадии упрочнения более охрупченное состояние $(i+1)$ в интервале температур вязко-хрупкого перехода характеризуется меньшими значениями KCV.

$$KCV_{i+1}(T) < KCV_i(T) \quad i = 1 \dots n \quad (6)$$

Учитывая характер кривой KCV(T), достижение критериального значения [KCV] для более охрупченного состояния металла происходит при более высокой температуре:

$$T_{k_{i+1}} > T_{k_i} \quad (7)$$

Параметрами, характеризующими охрупчивание металла элементов оборудования, могут служить интенсивности изменения значений T_k от времени (t), т.е. dT_k/dt , и значений KCV , т.е. $dKCV/dt$.

Из взаимозависимости параметров T_k и $KCV(T)$ следует, что интенсивность изменения T_k функционально зависит от интенсивности изменения KCV , которая в свою очередь может быть определена по обоснованным зависимостям H - KCV :

$$dT_k/dt = f \{ dKCV/dt \} \quad i = 1 \dots n \quad (8)$$

Используя установленную интенсивность изменения T_k можно рассчитать, т.е. прогнозировать значение T_k на будущий период. Прогнозируемое значение $T_{k\tau}$ для последующего состояния охрупченности металла может определяться по следующему выражению:

$$T_{k\tau} = T_{ki} + f [dT_k/dt (t)] \cdot \tau, \quad (9)$$

где τ – прогнозируемый период, $T_{k\tau}$ – критическая температура хрупкости на прогнозируемый период, T_{ki} – текущее значение критической температуры хрупкости.

В соответствии с математической моделью разработан и представлен на рис.1 алгоритм анализа охрупчивания металла, оценки, мониторинга и прогнозирования значений KCV и T_k при диагностировании оборудования.

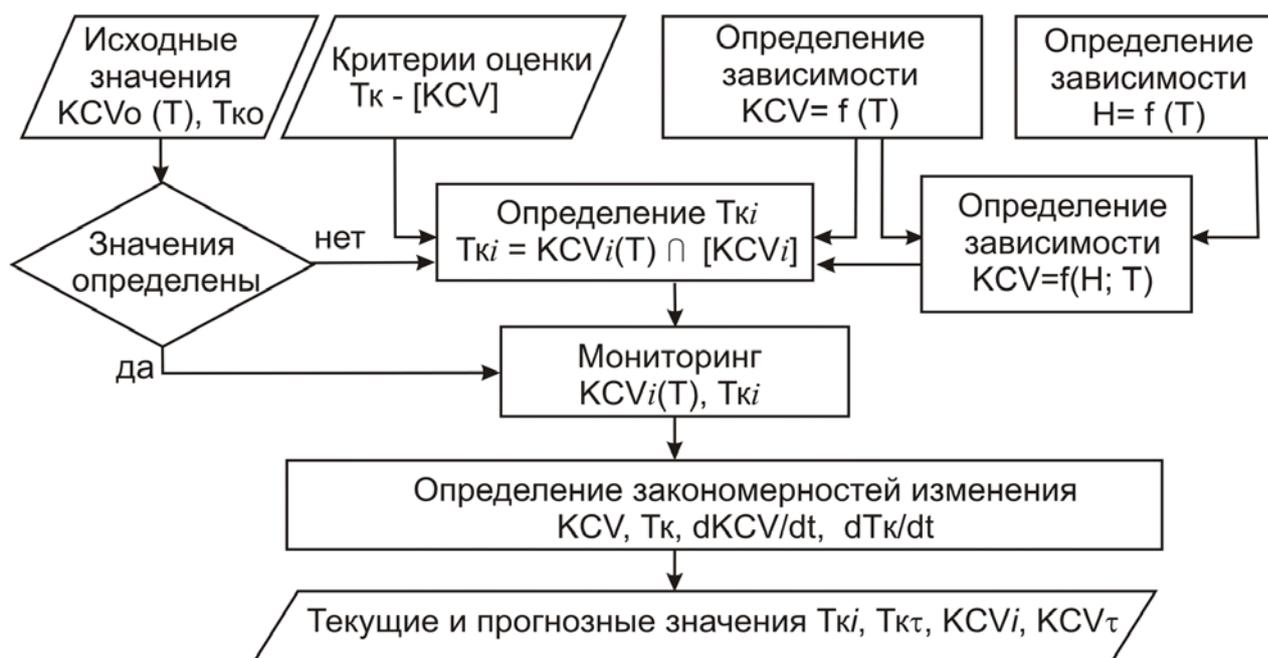


Рисунок 1 – Алгоритм анализа охрупчивания металла, оценки, мониторинга и прогнозирования значений KCV и T_k при диагностировании оборудования

Согласно нормам действующих НТД, например, ПНАЭ Г-7-002-86, РД 03-421 и др., текущие и прогнозные значения T_k используются для установления и применения значений допускаемого коэффициента интенсивности напряжений $[K_I]$ в расчетах сопротивления металла элементов оборудования хрупкому разрушению.

Результаты таких расчетов позволяют определять допустимые параметры дефектов и другие меры предупреждения хрупкого разрушения элементов оборудования ГХК.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований зависимостей значений H и KCV при T_{1-6} для охрупченных образцов металла. Ме-

тодика эксперимента включала в себя: оценку требуемого количества измерений и образцов испытаний по критериям достоверности результатов по ГОСТ 8.207; моделирование различных охрупченных состояний путем пластического деформирования образцов испытаний на $\delta_{1-5}=0, 10, 20, 30, 40\%$ и наводороживания образцов в испытательной среде NACE TM01-77; измерения Н и испытания KCV при T_{1-6} наводороженных и пластически деформированных образцов металла.

Измерения Н (T_{1-6}) выполнены по методике ГОСТ 9012. Для измерений Н использован метод Бринелля и стационарный твердомер HBRV-187,5 с погрешностью $\pm 6\text{НВ}$. Испытания KCV(T_{1-6}) выполнены по ГОСТ 9454 на маятниковом копре ИО 5003-0,3 (Россия, Союзточмашприбор) с погрешностью $\pm 3\text{Дж/см}^2$.

Исследование выполнено на образцах металла, вырезанных из обечайки теплообменника Е-101, бывшего в эксплуатации на Оренбургском ГХК около 26 лет. Металл обечайки – толстолистовая низколегированная феррито-перлитная сталь фирмы «Крезо-Луар» (Франция) марки TTStE36, химсостав характеризуется содержанием углерода 0,152%, марганца 1,28%, кремния 0,375%, фосфора 0,024%, серы 0,011% (аналог – сталь А516 Gr 60 по ASTM, приблизительный отечественный аналог – сталь 20К по ГОСТ 5520).

Для металла обечайки выполнены механические испытания, измерения твердости и микротвердости, определение KCV и T_k , проведены металлографические исследования. Для сравнительного анализа значения ряда полученных и сертификатных, т.е. исходных параметров состояния металла обечайки приведены в таблице 1:

Таблица 1 – Экспериментально полученные и сертификатные значения ряда параметров состояния металла обечайки теплообменника Е-101, сталь TTStE36

Параметр	Экспериментально полученные значения параметра	Сертификатные значения параметра	Разница
временное сопротивление	550 МПа	520 МПа	+ 30 МПа
предел текучести	384 МПа	370 МПа	+14 МПа
относительное удлинение	24-26%	30%	- 4 - 6%
KCV при температуре -40°C	80 Дж/см ²	116 Дж/см ²	- 36 Дж/см ²

Как показывают данные таблицы 1, временное сопротивление и предел текучести повысились на 4-5%, относительное удлинение уменьшилось на 4-6%, KCV при $T=-40^\circ\text{C}$ уменьшилась на 30%, т.е. наблюдается охрупчивание исследуемого металла.

Для эксперимента были подготовлены 10 пластически деформированных, растянутых, экспериментальных образцов прямоугольной формы размерами 300x40x12 мм, на образцах были размечены контрольные сечения, остаточная деформация в которых оценивалась значениями δ_{1-5} . В каждом из этих сечений образцов проведены по 25 измерений Н при T_{1-6} . Затем из этих образцов были вырезаны, подготовлены и испытаны образцы KCV по ГОСТ 9454 по 6 образцов для каждой δ_{1-5} и каждой T_{1-6} . Наводороживанию были подвергнуты 5 образцов размерами 60x40x12 мм. Из них получены и испытаны на ударный изгиб 20 образцов, выполнены более 150 измерений твердости при каждой из T_{1-6} . Результаты обработаны и оценены статистическими методами по ГОСТ 8.207 и признаны удовлетворительными: коэффициент вариации менее 3%, Относительная погрешность для 95%-го доверительного интервала составила 1,5-2%.

На рисунке 2 приведены полученные в эксперименте зависимости $H(T)$ и $KCV(T)$ деформированных на δ_{1-5} зон образцов и наводороженных образцов металла обечайки.

Статистическая обработка результатов показала, что 95%-й доверительный интервал H не превышает $\pm 7\text{HB}$, 95%-й доверительный интервал KCV при температурах равных и менее -40°C не превышает $\pm 4\text{Дж/см}^2$, а при температурах выше -40°C не превышает $\pm 6\text{Дж/см}^2$.

С использованием обоснованной модели (выражения 4-9), алгоритма (рис.1) и зависимостей (рис.2) для каждого состояния были определены T_k . Погрешность оценки T_k менее 10%.

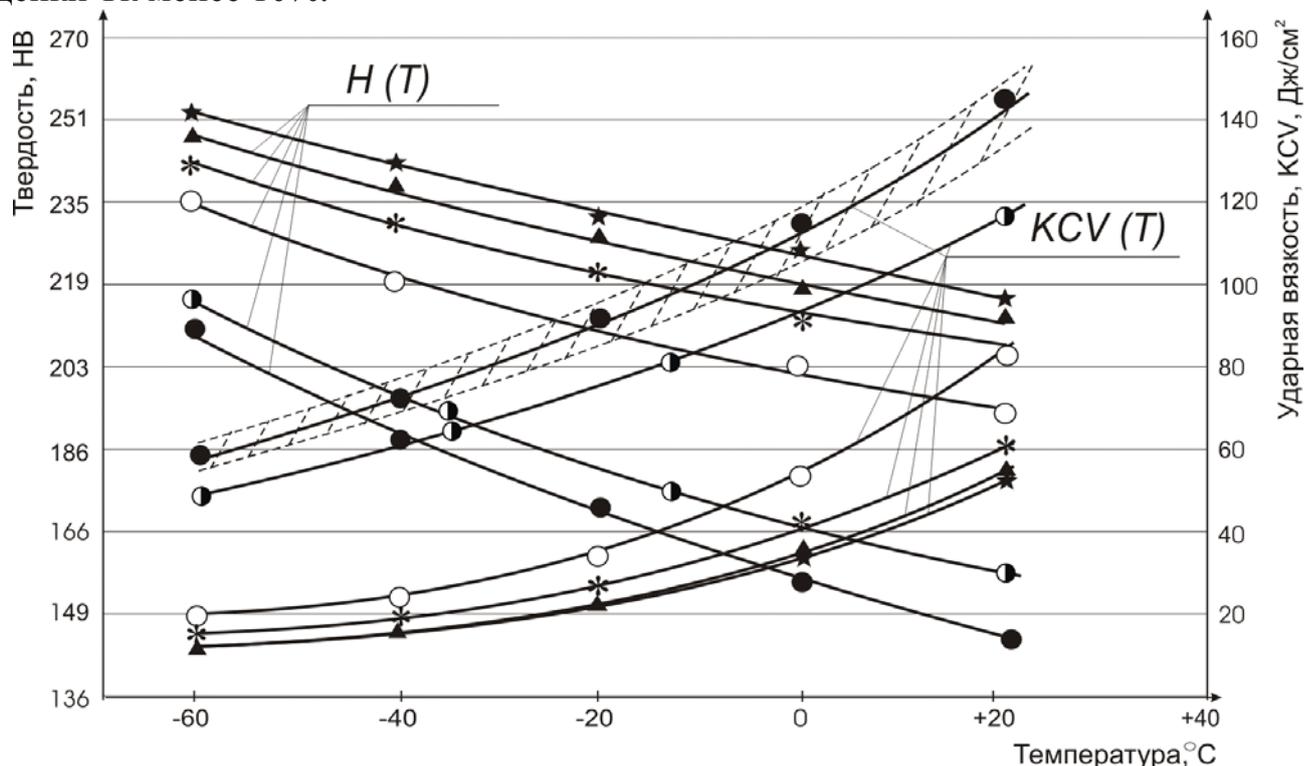


Рисунок 2 – Усредненные экспериментальные температурные зависимости $H(T)$ и $KCV(T)$ для металла обечайки теплообменника, сталь T1StE36: условные деформации: ● - $\delta=0\%$, ○ - $\delta=10\%$, * - $\delta=20\%$, ▲ - $\delta=30\%$, ★ - $\delta=40\%$, ⊖ - наводороженные образцы; штриховкой показан 95% доверительный интервал

Для использования при диагностировании оборудования ГХК экспериментально полученные значения H и KCV охрупченных образцов были представлены (рис. 3) в координатах « H - KCV » для каждой из T_{1-6} . Эти зависимости с достаточной точностью могут быть представлены в виде функции вида:

$$KCV = A e^{b \cdot H} \quad (10)$$

Коэффициенты A и b , экспериментально полученные для различных температур испытаний, также зависят от температуры и могут быть представлены в виде полиномов:

$$A = -9 \cdot 10^{-5} T^4 - 0,0064 T^3 - 0,1133 T^2 - 2,4381 T + 270 \quad (11)$$

$$b = 2 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,0002 T - 0,019 \quad (12)$$

Точки значений H и KCV для наводороженных образцов расположились в зоне 95% доверительного интервала значений H и KCV деформированных образцов.

Результаты оценки зависимостей и коэффициентов показывают: коэффициент детерминирования во всех случаях не ниже 0,89; погрешность расчетного определения среднего значения KCV по твердости не более $\pm 7 \text{ Дж/см}^2$.

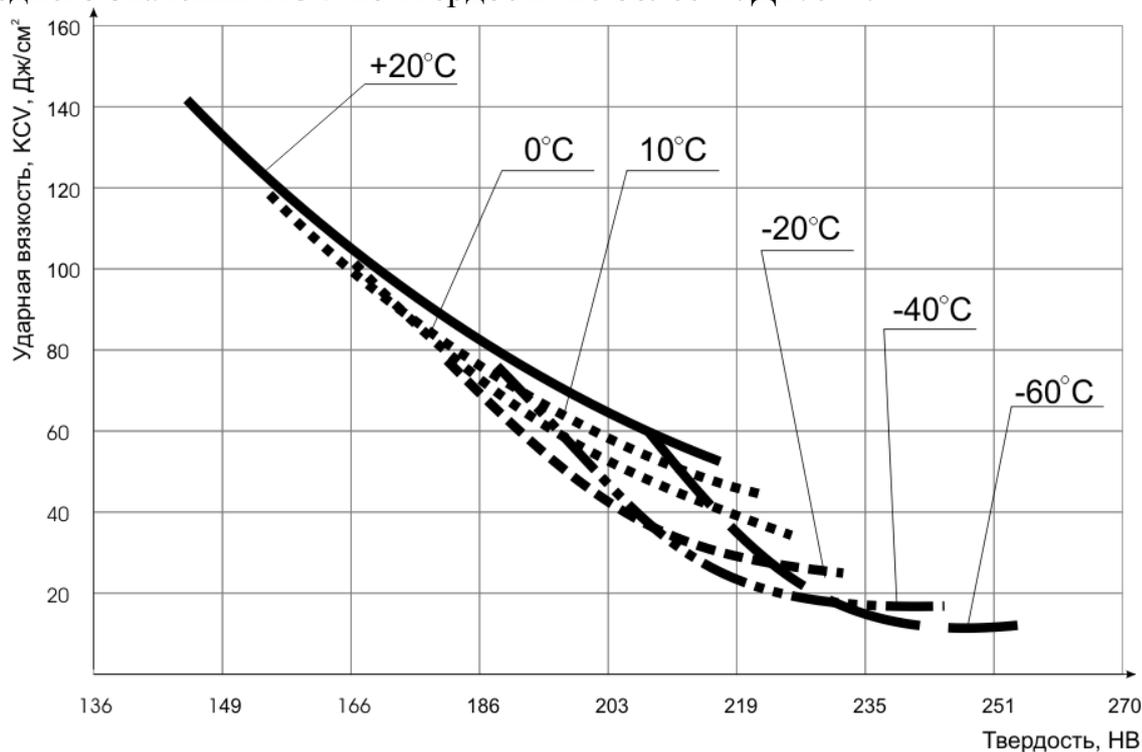


Рисунок 3 – Графики зависимости H-KCV охрупченного металла обечайки теплообменника E-101 для T₁₋₆, сталь T1StE36

Таким образом, по результатам эксперимента установлены индивидуальные для испытуемого металла зависимости значений H-KCV при T₁₋₆, установлена возможность по данным новых измерений H исследуемого металла при T₁₋₆ в новом состоянии охрупченности, пользуясь установленными зависимостями H-KCV, получить новую зависимость KCV(T) и по значению [KCV], оценить новое значение параметра T_к, с точностью $\pm 3^\circ\text{C}$.

В четвертой главе представлены результаты решения четвертой и пятой задач исследования: обоснована возможность, разработаны способ, технические решения и условия для отбора минипроб от штуцерных узлов оборудования и измерений значений H отобранного металла при заданных, в т.ч. отрицательных температурах; предложенный метод анализа охрупчивания металла апробирован на металле штуцеров оборудования, разработана «Методика диагностирования нефтегазового оборудования, эксплуатируемого в сероводородсодержащих средах, с применением анализа охрупчивания металла», оценена эффективность ее применения.

Для исследований возможности отбора минипробы рассмотрена конструкция сепаратора первой ступени установки комплексной подготовки газа. Отбор угловой формы треугольного сечения с катетами 20 мм минипробы предлагается от поверхности внутренней кромки штуцера люка-лаза Ду 450мм. Для оценки возможности отбора минипробы выполнен расчет укрепления отверстия до отбора и после методом площадей согласно ГОСТ Р 52857. Результаты расчетов показали, что имеется избыточная площадь металла, участвующая в укреплении, при отборе указанной минипробы изымается 180 мм² площади укрепления, а остающийся запас, после отбора минипробы, составляет 5216 мм². Выполнен также уточненный расчет напря-

женно-деформированного состояния штуцерного узла методом конечных элементов (МКЭ). Распределение напряжений представлено на рис. 4, где $\sigma_{от}$ – напряжения в зоне отбора минипробы, $[\sigma]$ – номинальные допускаемые напряжения, $1,5[\sigma]$ – допускаемые напряжения для категории напряжений «мембранные+изгибные». Результаты показывают, что уровень напряжений, возникающих в конструкции после отбора минипробы не превышает допускаемых значений.

Обоснован и апробирован способ вырезки металла минипробы ручной ножовкой по металлу с модифицированным полотном. Вырезка произведена из фрагмента штуцерного узла внутренним диаметром 450 мм и толщиной 50 мм (рисунок 5).

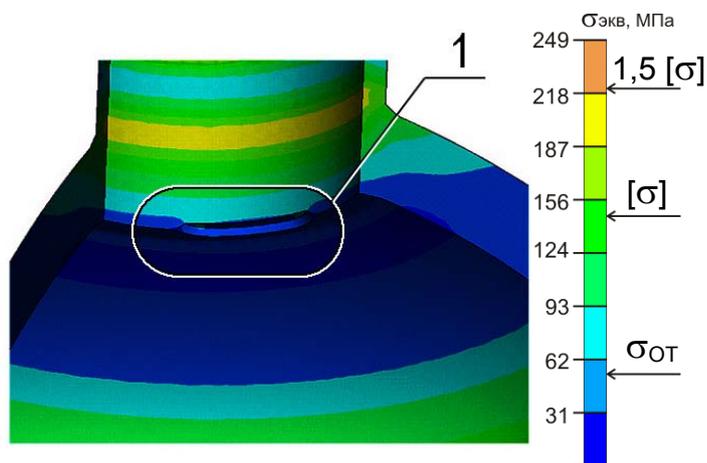


Рисунок 4 – Эквивалентные напряжения в штуцерном узле люка-лаза сепаратора при рабочем давлении после отбора минипробы (вид изнутри): 1 – зона отбора

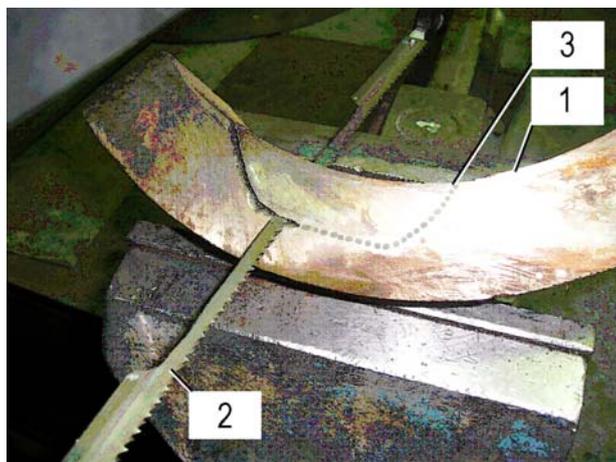


Рисунок 5 – Фото отбора минипробы: 1 – имитатор штуцера, 2 – модифицированное полотно ручной ножовки, 3 – линия разметки реза

Сделаны выводы, что: после отбора пробы нормативные условия прочности штуцерного узла обеспечиваются; длина отбираемой минипробы определяется по объему испытаний металла и при необходимости может быть равна периметру кромки, т.е. для штуцера люка-лаза диаметром 450 мм длина может составить 1400 мм. Это позволяет получить объем металла для проведения комплекса стандартных испытаний на растяжение и ударный изгиб.

С целью снижения разброса измеряемых значений H из-за отклонений температуры металла минипробы разработано и изготовлено захлаживающее устройство - предметный стол твердомера, рисунок 6. Предметный стол выполнен в виде камеры (поз.1) с теплоизолирующим кожухом (поз.2). Минипроба (поз.5) крепится к рабочей поверхности предметного стола и для равномерного захлаживания находится под уровнем спирта. По периметру над рабочей поверхностью предметного стола предусмотрена реборда (поз.3), удерживающая уровень спирта (поз.4). Температура в камере и температура металла минипробы контролируется термометром (поз.6). После захлаживания на время измерений H поверхность минипробы осушается. Для захлаживания в камеру предметного стола подается азот из сосуда Дьюара. На отводящем трубопроводе установлены манометр (поз.7) и регулирующий кран (поз.8).

Для предложенной конструкции захлаживающего предметного стола твердомера выполнены прочностные и термодинамические расчеты. По результатам расчетов выбран материал основных элементов – сплав алюминия Д16 и определены их толщины стенок. Результаты испытаний показали: время захлаживания минипробы

до -70°C составляет не более 10 мин; стабильность регулирования температуры достигает величины $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.

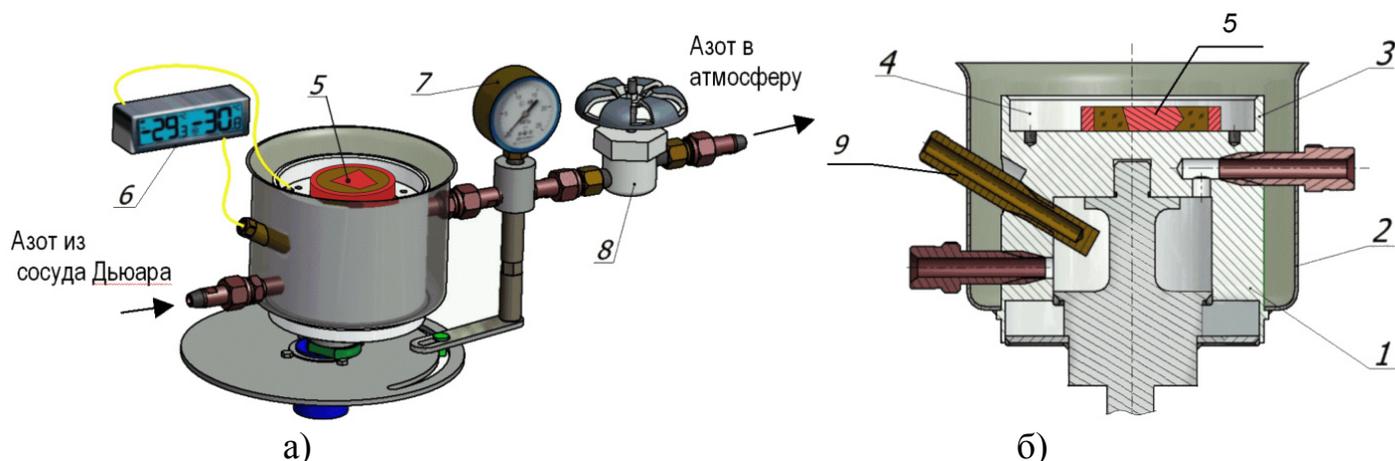


Рисунок 6 – Захлаживающий предметный стол твердомера: а) – общий вид, б) – вид в разрезе

Апробирование предложенного метода выполнено на металле выбракованного ранее штуцера диаметром 254 мм и толщиной стенки 42 мм, изготовленного из поковки – сталь HSB50S (аналог по ASTM – сталь A350LF2, приблизительный отечественный аналог – сталь 10Г2). Всего в составе элементов оборудования ГХК находятся более 300 штуцеров из этой стали. Исходное значение KCV при температуре -40°C (KCV_{-40}) для исследуемого металла штуцера по сертификатным данным составляет 28 Дж/см^2 , с учетом $[KCV]=25 \text{ Дж/см}^2$, исходное значение T_k было принято $\leq -40^{\circ}\text{C}$.

По представленной в главе 3 методике для каждой T_{1-6} получены зависимости $H-KCV$, выражение (10), для охрупченных путем деформирования на $\delta_{1-3}=0, 10, 24\%$ образцов, которые характеризуются следующими коэффициентами: $T=-60^{\circ}\text{C}$: $A=8007$, $b=-0,05$; $T=-40^{\circ}\text{C}$: $A=1678$, $b=-0,019$; $T=-20^{\circ}\text{C}$: $A=541$, $b=-0,011$; $T=0^{\circ}\text{C}$: $A=270$, $b=-0,0055$; $T=+20^{\circ}\text{C}$: $A=342$, $b=-0,005$. Используя полученные зависимости $H-KCV$, определены текущие значения $KCV_{-40}=19 \text{ Дж/см}^2$, $T_k=-18^{\circ}\text{C}$, интенсивности изменения параметров охрупчивания $dKCV/dt=0,34 \text{ Дж/см}^2 \cdot \text{г}$, $dT_k/dt=0,85 \text{ }^{\circ}\text{C/г}$. Прогнозируемое время достижения KCV значений $[KCV]$ и T_k значений минимальной рабочей температуры $T_{\min}=0^{\circ}\text{C}$ составило более 10 лет.

С учетом исходных и текущих значений T_k , $[K_I]$, выполнен расчет максимально допустимых размеров трещиноподобного дефекта ($[L]_{\max}$) в металле штуцера из условия сопротивления хрупкому разрушению: для исходного состояния металла $[L]_{\max}=9,0 \text{ мм}$, для текущего состояния $[L]_{\max}=7,1 \text{ мм}$. С учетом полученного значения $[L]_{\max}$ откорректированы программы диагностирования и технологические карты НК оборудования.

На основе требований НТД (РД 03-421) и результатов апробирования предложенного метода разработан алгоритм диагностирования нефтегазового оборудования с применением анализа охрупчивания металла (рисунок 7).

Разработана «Методика диагностирования нефтегазового оборудования, эксплуатируемого в сероводородсодержащих средах, с применением анализа охрупчивания металла» (далее Методика). Методикой реализуется представленный на рис. 7 алгоритм. Методика устанавливает основные требования к организации и проведе-

нию работ, квалификации специалистов, приборному обеспечению, порядку проведения измерений, обработке и оформлению результатов.

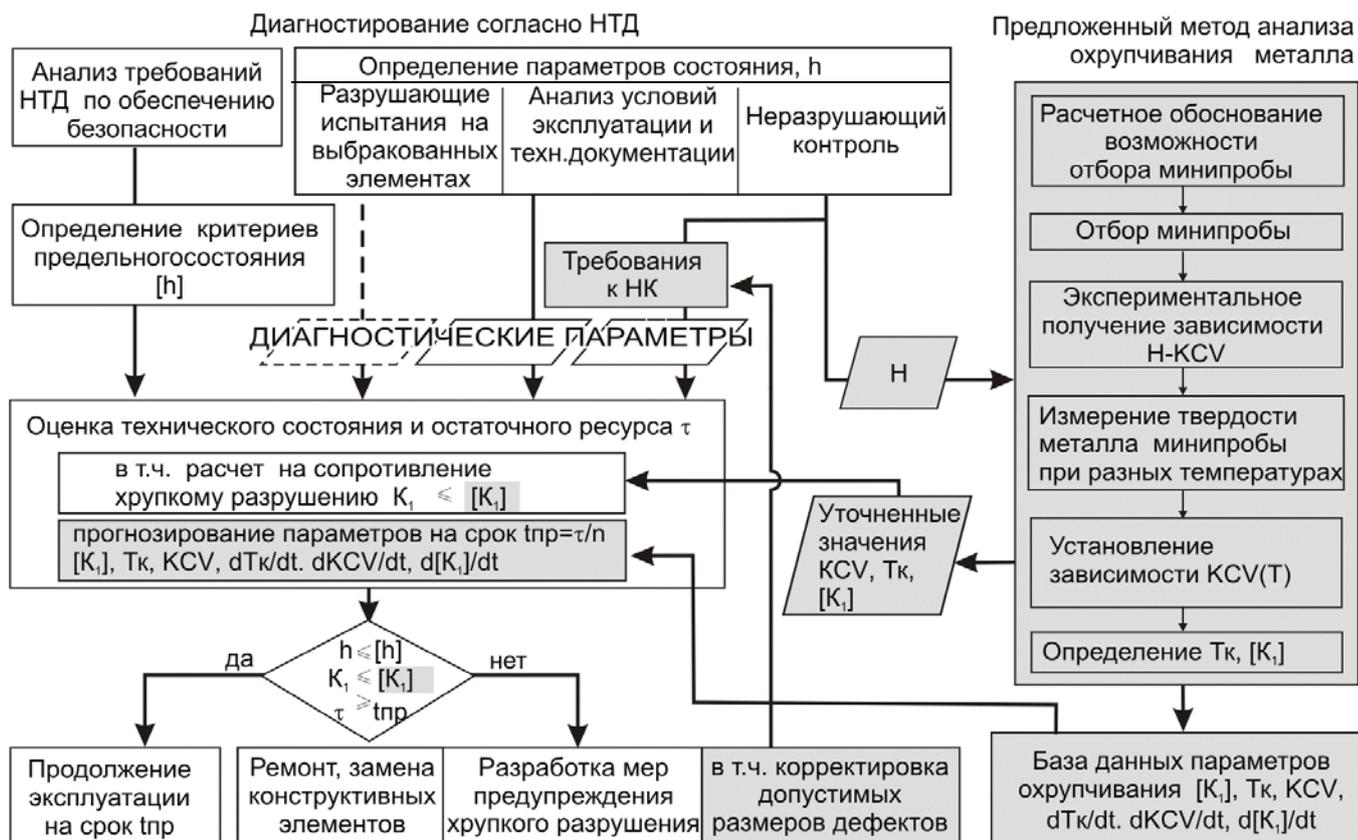


Рисунок 7 – Алгоритм диагностирования нефтегазового оборудования с применением анализа охрупчивания металла. Предложенный метод и получаемые параметры выделены серым цветом. Пунктиром обозначены методы, имеющие ограниченное применение

Основу Методики составляют результаты теоретического и экспериментального обоснования метода определения индивидуальных для каждого металла диагностируемых элементов оборудования ГХК, зависимостей Н-KCV при T_{1-6} , разработок и апробации способа отбора и исследования металла минипроб.

Определение зависимостей Н-KCV для металла диагностируемого оборудования производится на фрагментах металла, отобранного от элементов этого оборудования. Для определения зависимостей Н-KCV проводятся измерения Н и разрушающие испытания KCV при рекомендуемых температурах испытания T_{1-6} для ряда образцов, претерпевших различные степени деформирования. В Методике обосновано минимально необходимое количество измерений твердости и испытаний KCV для каждого состояния и температуры испытаний.

Обоснование возможности, места отбора и размеров отбираемых минипроб осуществляется по результатам прочностных расчетов с использованием данных о фактическом техническом состоянии элементов оборудования до и после отбора минипробы.

В соответствии с требованиями Методики в объеме работ определения фактического состояния осуществляются металлографическое исследование и измерения твердости металла наиболее нагруженных зон и участков основных несущих элементов оборудования. Для целей Методики металлографическое исследование и измерения твердости выполняются непосредственно на оборудовании без вырезки образцов, на подготовленных в соответствии с методическими рекомендациями к контро-

лю участках. Минимальное количество полей зрения металлографии на каждом элементе – три, а измерений твердости - десять.

При положительных результатах оценки фактического технического состояния, металлографических исследований и измерений твердости выполняются работы по обоснованию и отбору минипроб.

После отбора пробы металла производится зашлифовка места отбора для удаления концентраторов напряжений. Переходы поверхностей должны быть плавными, угол между ними не более 30 градусов, радиусы перехода более 10 мм, шероховатость поверхности не более Ra6,3. После зашлифовки предусматривается контроль состояния поверхности элементов оборудования в зоне вырезки минипроб: визуальный контроль, цветная, вихретоковая или магнитопорошковая дефектоскопия.

По окончании отбора минипробы Методикой предусмотрена оценка состояния сосуда условиям безопасности: поверочные расчеты на прочность, испытания на прочность и плотность, сопровождаемые акустико-эмиссионным контролем.

Для обеспечения необходимой ориентации плоскостей минипробы относительно индентора твердомера минипроба облуживается, затем помещается в оправку из отрезка трубы длиной 12-15 мм и диаметром 50-60 мм, заливается легкоплавким припоем. В настоящей работе апробирован припой ПОСК-50 с температурой плавления до 145°C. После затвердевания припоя проводится шлифовка рабочей и обратной поверхностей минипробы вместе с оправкой и припоем до шероховатости не грубее Ra2,5. При подготовке минипробы допускается непараллельность рабочей и обратной плоскостей минипробы не более 0,05 мм.

В соответствии с Методикой результаты измерений твердости для каждой из температур измерений T_{1-6} проходят статистическую обработку и оценку по параметрам коэффициента вариации и доверительного интервала. Средние значения H используются для оценки по представленным в главе 2 математической модели значений KCV (T_{1-6}), затем T_k и $[K_I]$.

Накопленные по результатам нескольких диагностирований при наработке оборудования $t_1, t_2 \dots t_n$ данные зависимостей KCV (T) и значений $T_k, [K_I]$ используются для мониторинга охрупчивания и оценки закономерностей и интенсивностей охрупчивания: $dKCV/dt, dT_k/dt, d[K_I]/dt$ и расчетов значений параметров T_k и $[K_I]$ на прогнозируемый период эксплуатации оборудования.

Установленные таким образом значения указанных параметров используются в расчетах на сопротивление хрупкому разрушению. По значениям твердости оцениваются также механические свойства исследуемого металла.

На основе статистического анализа разброса значений H, KCV, T_k выполняется прогнозирование ресурса продолжения эксплуатации по механизму хрупкого разрушения и обеспечение требуемого уровня надежности при доверительной вероятности безотказной работы от 0,8 до 0,99.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. По результатам анализа накопленных за время длительной эксплуатации исследований причин и последствий имевших место разрушений оборудования ГХК показано, что наиболее опасным повреждающим проявлением воздействия рабочих сред, нагрузок и длительности эксплуатации является охрупчивание металла, влекущее за собой повышение вероятности хрупкого разрушения оборудования. Накопленные за время длительной эксплуатации значения параметров, характеризующих

охрупчивание, могут служить исходными данными для установления интенсивностей и закономерностей их изменения и оценки их значений на прогнозируемый период эксплуатации оборудования.

2. Теоретически обоснованы, экспериментально установлены и оценены закономерности изменения, тесная корреляционная связь и функциональные зависимости между значениями H и KCV при $T = -60, -40, -20, 0, +10, +20^\circ C$ для металла обечайки теплообменника ГХК, бывшего в эксплуатации под воздействием сероводородсодержащих сред в течении 26 лет.

3. Теоретически обоснованы и разработаны метод анализа охрупчивания металла, математическая модель и алгоритм оценки, мониторинга и прогнозирования значений параметров KCV и T_k на основе установления и применения функциональных зависимостей $H-KCV$ металла диагностируемых элементов оборудования.

4. Метод апробирован на образцах металла штуцеров оборудования ГХК, получены функциональные зависимости $KCV(T)$, $H(T)$ и $H-KCV$, определены значения KCV , T_k , $dKCV/dt$, dT_k/dt . Выполнен расчет максимально допустимых размеров трещиноподобного дефекта в металле штуцера из условия сопротивления хрупкому разрушению. По результатам апробирования откорректированы программы диагностирования и технологические карты НК оборудования.

5. Расчетно обоснована возможность, разработан и апробирован способ отбора минипроб металла от высоконагруженных элементов оборудования ГХК. Разработано и апробировано специальное устройство, обеспечивающее захолаживание образцов, стабилизацию требуемой для испытаний температуры и повышающее достоверность результатов измерений твердости.

6. Обоснован и разработан алгоритм диагностирования нефтегазового оборудования на основе анализа охрупчивания металла.

7. По результатам исследования разработана и введена в действие «Методика диагностирования нефтегазового оборудования, эксплуатируемого в сероводородсодержащих средах, с применением анализа охрупчивания металла».

Методикой предусмотрено: применение предложенного метода анализа охрупчивания металла; установление и применение индивидуальных для каждого металла элементов оборудования функциональных зависимостей $H-KCV$ при T_{1-6} ; получение с их помощью при каждом новом диагностировании новых значений параметров охрупчивания KCV , T_k , $[K_I]$, $dKCV/dt$, dT_k/dt , $d[K_I]/dt$; оценивать значения KCV , T_k и $[K_I]$ на прогнозируемый период эксплуатации; устанавливать с учетом их значений условия сопротивления металла хрупкому разрушению; обеспечивать требуемый уровень надежности эксплуатации диагностируемого оборудования, .

8. Разработки внедрены в производство и применяются в практике диагностирования, прогнозирования и обеспечения технического состояния и уровня надежности эксплуатации оборудования ООО «Газпром добыча Оренбург» и ООО «Газпром добыча Астрахань».

9. Выполнен анализ эффективности применения Методики, годовой экономический эффект составляет 2,6 млн. руб.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ:

Статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных Минобрнауки РФ:

1. **Ломанцов В.А.**, Митрофанов А.В. Методы диагностирования процессов деградации металла оборудования, эксплуатируемого в условиях сероводородсодер-

жащих сред // Научно-технический журнал «Нефтепромысловое дело». №8 2009. С. 89 – 91.

2. Обоснование критериев оценки поврежденности шлейфовых трубопроводов по результатам диагностирования / Пастухов С.В., Вдовин А.А., **Ломанцов В.А.**, Кравцов А.В., Егоров С.В. // Научно-технический журнал «Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности», №10 2009. С. 5 – 11.

3. Митрофанов А.В., **Ломанцов В.А.** Проблема оценки параметров технического состояния металла технологического оборудования, эксплуатируемого в сероводородсодержащих средах // Научно-технический журнал «Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяном деле», №12 2009. С. 22 – 25.

4. О методе пробоотбора для целей диагностирования металла сепараторов комплексной подготовки газа и нефти / Митрофанов А.В., Заряев М.Ю., **Ломанцов В.А.**, Меньшин А.Б. // Научно-технический журнал «Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности», №11 2009. С. 36 – 40.

5. Митрофанов А.В., **Ломанцов В.А.** Апробирование методов контроля малоцикловых усталостных повреждений металла нефтегазового оборудования // Научно-технический журнал «Нефтепромысловое дело», №6 2011. С. 38 – 46.

6. Митрофанов А.В., **Ломанцов В.А.**, Меньшин А.Б. Обоснование возможности оценки и мониторинга охрупченности металла нефтегазового оборудования по температурной зависимости твердости // Научно-технический журнал «Нефтепромысловое дело», №12 2012. С. 24-26.

7. Митрофанов А.В., **Ломанцов В.А.**, Меньшин А.Б. Обоснование возможности и апробирование метода отбора минипроб металла нефтегазового оборудования при его диагностировании. // Научно-технический журнал «Нефтепромысловое дело», №12 2012. С.36-37.

Статьи в прочих ведущих научных журналах, сборниках научных трудов и материалах конференций:

8. Барышов С.Н., Воронин С.П., **Ломанцов В.А.** Исследование поврежденности, напряженно-деформированного состояния и оценка несущей способности сосуда давления после пластического деформирования. // Материалы V международной науч.-техн. конф. «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред». – 22-25 ноября 2004 г., Оренбург (Самородово). – С. 273-286.

9. Вдовин А.А., **Ломанцов В.А.** Об экспериментальном подтверждении и оценке сигналом акустико-эмиссионной диагностики от начала деформации до разрушения. // Материалы V международной науч.-техн. конф. «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред». – 22-25 ноября 2004 г., Оренбург (Самородово).

10. Вдовин А.А., **Ломанцов В.А.** К проблеме обеспечения достоверности результатов работ по оценке технического состояния и ресурса оборудования и трубопроводов опасных производственных объектов ГХК // Материалы V международной науч.-техн. конф. «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред». – 22-25 ноября 2004 г., Оренбург (Самородово).

11. Вдовин А.А., **Ломанцов В.А.** Система менеджмента качества работ экспертной организации // Материалы VI международной научно-технической конфе-

ренции «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред». – 20-23 ноября 2006 г.

12. Совершенствование неразрушающего контроля на объектах ООО «Оренбурггазпром». Ультразвуковой контроль сварных швов штуцерных узлов / Церковнов А.Н., Барышов С.Н., Савельев Е.М., **Ломанцов В.А.**, Филатов И.Ф. // Материалы отраслевого совещания «Состояние и основные направления развития неразрушающего контроля сварных соединений объектов транспорта газа ОАО «Газпром»» (г. Уфа, 24 – 27 сентября 2007 г.). – М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2008. – 165 с. С. 85 - 99.

13. Барышов С.Н., **Ломанцов В.А.** Экспериментальные исследования структурно-механических свойств металла оборудования, работающего при воздействии вибрации и пульсации давления сероводородсодержащих сред. // Материалы V международной научной конференции «Прочность и разрушение материалов и конструкций». – 12 - 14 марта 2008 года, г. Оренбург, Россия. С. 65 – 72.

14. Копытов Д.В., **Ломанцов В.А.** Оценка технического состояния оборудования УЭСП ООО «Газпром добыча Оренбург» (по результатам обследований в 2008 году) // Материалы VII международной науч.-техн. конф. «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред». – 26-29 ноября 2008 г., (г. Оренбург, Самородово). С. 287–289.

15. Результаты оценки технического состояния и поврежденности оборудования газоперерабатывающего завода ООО «Газпром добыча Оренбург» / Чуносков О.А., Ралко В.В., Шестаков В.А., **Ломанцов В.А.** // Материалы VII международной науч.-техн. конф. «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред». – 26-29 ноября 2008 г., (г. Оренбург, Самородово). С. 290–294.

16. Митрофанов А.В., **Ломанцов В.А.** Проблема оценки параметров технического состояния металла технологического оборудования, эксплуатируемого в сероводородсодержащих средах // Материалы VII международной науч.-техн. конф. «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред». – 26-29 ноября 2008 г., (г. Оренбург, Самородово). С. 306–310.

17. Заряев М.Ю., **Ломанцов В.А.**, Меньшин А.Б. Обоснование возможности отбора проб для мониторинга деградации металла сосудов, работающих под давлением // Материалы VII международной науч.-техн. конф. «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред». – 26-29 ноября 2008 г., (г. Оренбург, Самородово). С. 317–321.

18. Пастухов С.В., Вдовин А.А., **Ломанцов В.А.**, Кравцов А.В., Егоров С.В. Апробирование метода анализа износа и обоснования частичной замены шлейфовых трубопроводов по результатам диагностирования // Тезисы Третьей научно-технической конференции с международным участием «Основные проблемы освоения и обустройства нефтегазовых месторождений и пути их решения». – 21-22 мая 2009 г. С. 83 – 84.

19. Исследования и оценка охрупчивания металла нефтегазового оборудования, длительно эксплуатируемого в сероводородсодержащих средах / Митрофанов А.В., Барышов С.Н., **Ломанцов В.А.** // Научно-технический журнал «Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса», №5 2011. – С. 19 – 23.

20. Экспериментальное обоснование методов оценки поврежденности металла оборудования объектов сероводородсодержащих месторождений / **Ломанцов В.А.**, Воронин С.П., Меньшин А.Б., Шумилин В.А. // Материалы VIII международной науч.-техн. конф. «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздей-

ствию сероводородсодержащих сред». – 23-26 ноября 2010 г., (г. Оренбург, Самородово). С. 66–75.

21. Обоснование параметров, критериев и методов оценки охрупчивания на минипробах металла нефтегазового оборудования при эксплуатации в сероводородсодержащих средах / Митрофанов А.В, **Ломанцов В.А.**, Меньшин А.Б. // Материалы IX международной науч.-техн. конф. «Диагностика оборудования и трубопроводов, подверженных воздействию сероводородсодержащих сред». – 13-16 ноября 2012 г., (г. Оренбург, Самородово).

Подписано к печати «4» 04 2013 г.

Заказ № _____

Тираж 100 экз.

1 уч.-изд. Лист. формат 60×84/16

Отпечатано на ротапинтере ООО «Газпром ВНИИГАЗ»
по адресу 142717, Московская область,
Ленинский р-н, п. Развилка, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»