

ОЦЕНКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ ОБОРУДОВАНИЯ, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОРРОЗИОННЫХ СРЕД

Оценка свойств существующих и поиск новых металлических материалов для изготовления высоконадежного и долговечного оборудования, работающего в жестких климатических условиях при воздействии высокоагрессивных сред, требуют назначения критериев оценки коррозионной стойкости материалов и эффективности защитных мероприятий с целью своевременной и оперативной оценки состояния узлов и деталей оборудования и прогнозирования срока его безопасной эксплуатации, создания оборудования и методик экспериментальных исследований.

Оренбургское газоконденсатное месторождение (ОГКМ) является одним из крупнейших в стране, причем продукция его имеет повышенное содержание высокоагрессивных компонентов – сероводорода, углекислого газа, меркаптановой серы, минерализованных пластовых вод. В результате длительной эксплуатации оборудования стали чаще проявляться связанные с коррозией различные разрушения деталей и узлов, в связи с чем вопросы коррозионных исследований для него особенно актуальны. Около пятидесяти процентов отказов металлокон-

струкций связано с сероводородным растрескиванием [1].

В области теории и экспериментальной проверки теоретических моделей коррозионного разрушения металлоконструкций под воздействием агрессивных сред много сделано зарубежными и отечественными учеными, такими как Паркинс Р.Н., Скалли Ж.К., Теракаки Ф., Трояно А., Арчаков Ю.И., Василенко И.И., Карпенко Г.В., Зикеев В.Н., Стеклов О.И., и многими другими. Тем не менее многие вопросы данной проблемы остаются нерешенными и в настоящее время.

Экспериментальные исследования являются одним из важнейших элементов процесса изучения проблемы коррозии. Многие исследователи независимо друг от друга определяли влияние различных коррозионных сред на изменение характеристик материалов. Результаты анализа известных публикаций [2] показаны на рисунке 1.

Экспериментальные методы исследований [4] характеризуются совокупностью четырех параметров: применяемыми образцами, используемой агрессивной средой, способом нагружения образцов и критериями оценки материала, подвергаемого испытанию.

Для исследования процессов коррозионного разрушения применяют специальные образцы-вырезки исследуемого объекта. Натурный эксперимент на физических объектах дорог и опасен [3]. В связи с этим эксперименты с натурными образцами составляют менее 10 процентов. Наибольшее распространение получили цилиндрические и плоские образцы (вместе более 80 процентов случаев).

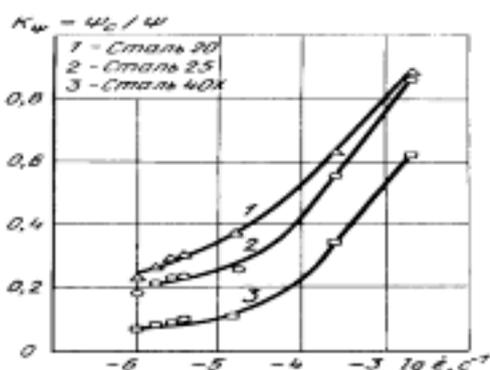
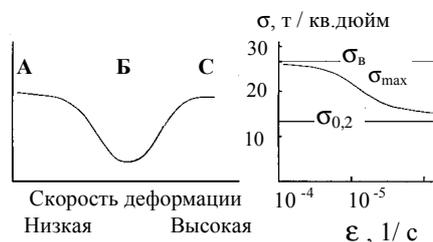


Рисунок 1. Реакция металла на скорость нагружения ϵ ($1/s$) (из работ Р.Н. Паркинса: А – полная пассивность; Б – коррозионное растрескивание; В – вязкое разрушение; σ_{max} – напряжение разрушения; σ_b – предел прочности; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести) и изменение величины K_w относительного сужения стальной (получено авторами статьи)

В качестве испытательной среды наиболее логично использовать производственную среду, но сложность ее отбора на объекте, транспортировки и хранения приводит к использованию искусственных (лабораторных) сред. При доле производственных сред около 19 процентов лабораторные составляют около 80 процентов. Чаще всего в отечественной и мировой практике это водный раствор хлористого натрия (содержание NaCl 1...5%), насыщенный сероводородом. Примерно шестая часть исследователей использует деминерализованную воду, насыщенную сероводородом.

Из описываемых способов нагружения образцов в 50 процентах работ используется постоянная нагрузка на образец, создаваемая при помощи груза либо пружины. Примерно треть исследований ведется при постоянной деформации образца. Весьма незначителен процент использования динамического изгиба и растяжения. Последнее обстоятельство было вызвано недостаточностью данных о возможности использования метода медленного растяжения образцов при воздействии сероводородсодержащих сред и риском получения необъективных результатов, с одной стороны, и отсутствием специального оборудования и необходимых значений эксплуатационных параметров у стандартных разрывных машин.

В качестве критериев оценки материалов по результатам коррозионных испытаний большинство авторов принимают среднее время до разрушения образца (свыше 50 процентов), значения пороговых напряжений (аналог предела выносливости) [5] и изменение значений механических характеристик (относительного удлинения и сужения образца) – примерно по 16 процентов случаев. Относительно мало используются критерии «время до разрушения 50 процентов образцов» и «время до появления первой трещины».

Данные известных работ, к сожалению, трудно сопоставимы в силу больших отличий в материалах и размерах используемых образцов, в процентном составе компонентов испытательных сред, равно как и в сочетании параметров испытаний упомянутых

методов. Исследователи констатируют высокую избирательность действия коррозионной среды на различные материалы.

Наиболее распространенные испытания постоянной нагрузкой относительно просты. Их проводят для нескольких групп из 3...7 образцов в группе на безприводных стендах различной конструкции индивидуального исполнения. Сложность поддержания стабильных условий эксперимента ввиду его длительности (база испытаний принята равной 720 часам) является существенным недостатком этих испытаний. Практически невозможно определить этим способом эффективность защитных мероприятий, так как образцы не разрушаются в течение базового времени даже при уровнях напряжений, близких к значениям предела текучести. Не определяются характеристики материалов трещиностойчивых (стойких к образованию трещины), но имеющих низкую трещиностойкость (сопротивление развитию трещины). Метод не обеспечивает оперативного принятия решений в экстремальных ситуациях.

Второй по степени использования метод постоянной деформации также прост, применим для испытаний в производственных условиях, но, в силу неопределенности и нестабильности напряженного состояния из-за релаксации напряжений в образцах, обусловленной ростом трещин, характеризуется большим разбросом результатов. По длительности экспериментов метод сопоставим с методом постоянной нагрузки.

Отмеченные недостатки известных методов делают актуальной постановку вопроса разработки более совершенной методики [6] экспериментальных исследований материалов конструкций, контактирующих с сероводородсодержащими средами. Основные требования к такой методике:

- обеспечение механизма разрушения образцов в условиях опыта, близкого к механизму разрушения в реальных условиях эксплуатации конструкции;
- обеспечение стабильных условий эксперимента;
- малая длительность эксперимента;
- возможность сопоставления результатов с данными конкурирующих методик.

Доктор Паркинс Р.Н. еще в начале 70-х годов обратил внимание на отличия в результатах экспериментов с идентичными материалами и схожими средами (кипящие растворы щелочей) в публикациях разных авторов, использовавших в опытах неодинаковые скорости деформирования образцов. При этом определялись три области скоростей с разной реакцией материала на воздействие агрессивной среды: малая скорость – пассивность материала, средняя скорость – склонность к коррозионному растрескиванию, высокая скорость – вязкое разрушение (рис. 1). Сказывается влияние скорости деформирования и на значениях максимальных разрушающих напряжений. В своих работах Паркинс Р.Н. сделал вывод о том, что при динамическом растяжении время до разрушения и относительное сокращение площади сечения (относительное сужение) взаимосвязаны и могут быть в равной мере использованы для оценки склонности материала к коррозионному растрескиванию. Медленное растяжение позволяет уменьшить инкубационный период развития коррозионных трещин, который составляет до 80 процентов времени коррозионного разрушения.

Реальные конструкции (трубопроводы, емкости, аппараты) с внутренним давлением агрессивной среды из-за колебаний давления и температуры окружающей среды работают в условиях медленного деформиро-

вания. Следовательно, медленное растяжение образцов в эксперименте отвечает реальным условиям нагружения, и можно обеспечить в этом случае механизм сероводородного растрескивания, наблюдаемый в реальных конструкциях и в образцах при использовании метода постоянной нагрузки.

Учитывая высокую избирательность действия коррозионной среды на материал и используя вместо щелочных сред сероводородсодержащие среды, мы провели эксперименты по определению степени влияния скорости относительной деформации образцов из сталей 20, 25 и 45 в сероводородсодержащей среде на изменение значения относительного сужения относительно значений, получаемых при испытании на воздухе согласно ГОСТ 1497-84. Установлено, что существенное изменение свойств материала происходит в интервале скоростей относительной деформации от $2.5 \cdot 10^{-3}$ (механические испытания, излом вязкий ямочный) до $1.7 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Разрушение образцов приобретает характер хрупкого при снижении скорости. При скоростях ниже $5.2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ $\psi = 15\%$ в изломе проявляются вторичные трещины («ручьистый» излом), характерные для сероводородного растрескивания и при испытаниях постоянной нагрузкой. Для испытаний медленным растяжением можно рекомендовать скорость относительной деформации, равную $2 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$. При выбранной скорости

Пороговые напряжения для сталей

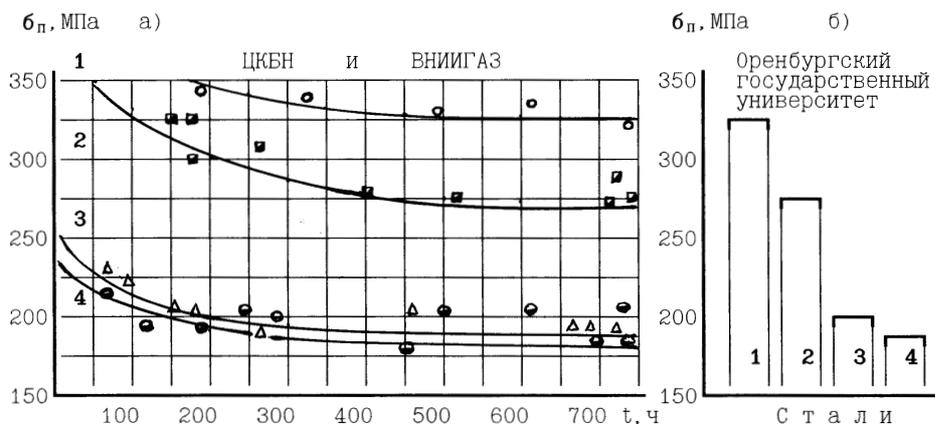


Рисунок 2. Результаты испытаний по определению пороговых напряжений: а) постоянной нагрузкой; б) медленным растяжением; 1 – Сталь 09ХГ2НАБЧ (ЦКБН); 2 – Сталь 09Г2С; 3 – Сталь 20МРТУ; 4 – Сталь 20 (ВНИИГАЗ)

были определены и значения пороговых напряжений для четырех сталей. Полученные данные хорошо согласуются с данными ЦКБН и ВНИИГАЗа, где эксперименты проводились с использованием метода постоянной нагрузки (рис. 2).

Таким образом, результаты исследований показали возможность использования метода нагружения образцов медленным растяжением при определении сопротивления материалов сероводородному растрескиванию. Получение сопоставимых с конкурирующими методиками результатов сопровождается сокращением времени испытаний в несколько раз. Предварительные эксперименты проводились на однопозиционных разрывных машинах, использование которых для объемных промышленных коррозионно-механических испытаний нецелесообразно как в силу длительности (даже в случае медленного растяжения время испытания одного образца составляет от 15 до 30 часов), так и по причине сложности обеспечения стабильных условий эксперимента для последовательно испытываемых образцов (общее количество в серии от 3 до 7 штук). Параметры существующих стандартных отечественных и зарубежных разрывных машин таковы, что для проведения коррозионно-механических испытаний они требуют модернизации для обеспечения меньших скоростей движения активных захватов и горизонтального расположения образцов при испытании. Последнее связано с исключением «ватерлинии» на образце и требованиями экономии агрессивной среды, объем которой в коррозионной камере уменьшается при горизонтальном положении образца. Известные разрывные машины не применимы для проведения испытаний в полевых условиях.

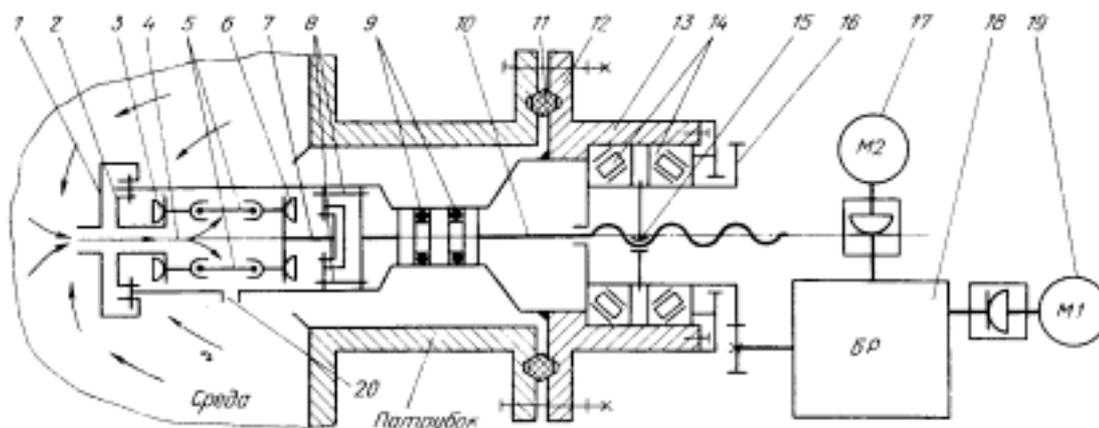
Таким образом, комплекс специального оборудования для коррозионно-механических испытаний должен отвечать требованиям (с учетом характеристик существующего в настоящее время оборудования):

- варианты исполнения разрывных машин – стационарные и переносные;
- форма образцов – цилиндрические и плоские по ГОСТ 1497-84;

- расположение образцов при испытании: горизонтальное в лабораторных машинах; произвольное для экспериментов на производственных объектах;
- интервал значений силы нагружения образцов – 6...50 кН;
- значения скорости движения активных захватов – $3,6 \cdot 10^{-8}$... $3,6 \cdot 10^{-5}$ м/с;
- значение удельной массы машины (на образец) – не более 250 кг;
- значение удельной площади испытаний (на образец) – не более 1,4 м²;
- значение удельной мощности (на образец) – не более 2 кВт;
- число однотипных образцов в серии – не менее 5;
- длительность испытания серии образцов – не более 100 ч.

Для проведения экспериментов на объектах Оренбургского и Астраханского газоконденсатных месторождений вначале были разработаны и изготовлены компактные переносные однопозиционные разрывные машины массой до 12 кг под цилиндрические образцы с диаметром рабочей части до 6 мм, причем конструкцией машины обеспечивалось требование эксплуатационников – монтаж разрывных машин в местах установки стандартных коррозионных водородных зондов, что позволяло производить установку и снятие установок без прерывания технологического процесса на объектах. С целью уменьшения количества разрывных машин и ускорения процесса испытаний далее были разработаны двух- и шестипозиционные машины (рис. 3), монтируемые на стандартных присоединительных узлах технологического оборудования.

Варианты исполнения позволяли осуществлять растяжение образцов как с малыми скоростями, так и со скоростями традиционных механических испытаний для сравнительной оценки исходных материалов и материалов, подвергшихся воздействию коррозионной среды. Оригинальные конструкции [7] нагрузжателей всех перечисленных установок, защищенные патентами России, позволяют при малых радиальных габаритах помещать в рабочую агрессивную среду 2...6 образцов, обеспечивая для них идентичные условия экспе-



1 – крышка; 2 – захват пассивный; 3 – гайка пассивного захвата; 4 – отверстие провода среды; 5 – образец; 6 – гайка активного захвата; 7 – захват активный; 8 – шпонка направляющая; 9 – кольцо уплотнительное; 10 – винт силовой; 11 – уплотнение фланцевое; 12 – фланец нагружателя; 13 – корпус нагружателя; 14 – подшипник; 15 – гайка силового винта; 16 – передача зубчатая; 17 – двигатель ускоренных перемещений; 18 – блок редуцирующий; 19 – двигатель малых скоростей деформирования; 20 – окна провода среды

Рисунок 3. Машина КМУ-3-6

римента. Требуемый кинематический эффект обеспечивается использованием набора цилиндрических и червячных передач и передач винт-гайка в узле активного захвата.

Вопрос о выборе числа образцов в стационарной разрывной машине решался с позиций получения объективных результатов эксперимента и исключения неоправданного усложнения машины. Анализ известных публикаций по данной проблеме показал, что исследователи рекомендуют проводить эксперименты на серии образцов, причем число их в серии колеблется от 3 до 7. Образцы сами по себе достаточно дороги, изготовление и подготовка к испытаниям их требуют квалифицированного персонала. Данные предварительных испытаний (где стабильность условий менее обеспечена) с учетом разброса результатов подтвердили, что число образцов в серии желательно иметь 7. С учетом этих соображений при разработке лабораторной стационарной разрывной машины [8] в ее конструкции было предусмотрено восемь позиций (восьмая резервная – для установки контрольно-измерительного прибора – динамометра либо специального силоизмерителя).

Машина защищена патентом России, имеет оригинальную вертикальную компоновку с двухсторонним расположением го-

ризонтальных блоков нагружателя. Привод располагается в нижней части машины и обеспечивает перемещение активных захватов через вертикальный вал с дополнительными винто-зубчатыми передачами и передачами «винт-гайка». Конструкция машины достаточно универсальна и позволяет проводить как механические испытания, так и коррозионно-механические испытания с постоянной нагрузкой (грузовыми ключами) и медленным растяжением с помощью электромеханического привода. Машина комплектуется различными приспособлениями (коррозионные камеры, устройство для испытания трубчатых образцов, привод пульсирующей нагрузки).

Конструктивные решения позволили обеспечить соответствующие ранее определенным значения эксплуатационных параметров, причем удельная масса в 1,16 и удельная площадь в 2,8 раза меньше проектного задания, удельная потребляемая мощность в 9 раз меньше, число одновременно испытываемых образцов в 8 раз больше, чем в известных конструкциях разрывных машин. Дополнительным эффектом использования многопозиционной разрывной машины стала возможность уменьшения (за счет стабильных условий эксперимента) числа образцов в серии до 5.

С использованием созданной экспериментальной базы и разработанной методики по предложенным критериям произведены: экспресс-оценка пороговых напряжений [5] различных сталей и сварочных материалов и сравнение с результатами испытаний по традиционной методике постоянной нагрузки (подтверждены адекватность предложенных расчетных зависимостей и целесообразность использования методики с медленным растяжением образцов); классификация используемых на ОГКМ сталей по сопротивлению СР в лабораторной коррозионной среде НАСЕ и натурном продукте ОГКМ по качественному критерию функции желательности Харрингтона; классификация сварочных материалов по сопротивлению СР; классификация покрытий [9] по защитным свойствам при СР сталей; классификация ингибиторов [10] по степени защиты от СР; предложена методика оценки ресурса работы металлоконструкций, под-

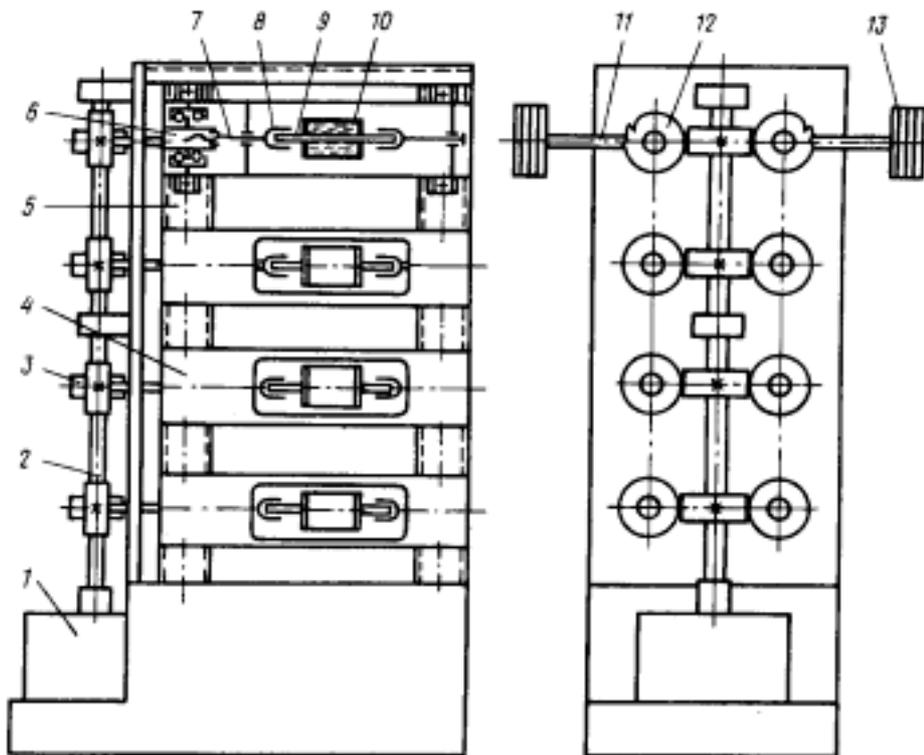
верженных длительному воздействию сероводородсодержащих сред.

Общие выводы и заключение

На основе теоретических и экспериментальных исследований создан комплекс одно- и многопозиционных разрывных машин (МРМ) и вспомогательного испытательного оборудования и разработана методика, обеспечивающие требуемые параметры испытаний в условиях специализированных лабораторий и на действующих трубопроводах и оборудовании в процессе их эксплуатации.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований положены в основу ряда нормативных документов в области коррозионно-механических испытаний металлов и сплавов [6, 9, 10].

Разработанный комплекс оборудования и методика испытаний с постоянной малой скоростью деформирования позволяют в



1 – привод; 2 – вал вертикальный; 3 – передача винто-зубчатая; 4 – нагрузитель; 5 – рама вертикальная; 6, 7 – элементы передачи «винт-гайка»; 8 – захват; 9 – образец; 10 – камера коррозионная; 11 – ключ грузовой; 12 – механизм храповой; 13 – груз рабочий

Рисунок 4. Машина МР-5-8В

10...30 раз быстрее по сравнению с существующими методами оценить коррозионно-механические характеристики различных новых и бывших в эксплуатации материалов

конструкций, работающих в сероводородсодержащих средах, обеспечить оперативную оценку состояния конструкций и эффективности защитных мероприятий.

Список использованной литературы:

1. Гафаров, Н.А. Коррозия и защита оборудования сероводородсодержащих нефтегазовых месторождений: Монография / Н.А. Гафаров, Н.Г. Гончаров, В.М. Кушнарченко. – М.: Недра, 1998. – 437 с.
2. Паркинс, Р.Н. Методы испытания на коррозию под напряжением / Р.Н. Паркинс, Ф. Маца, Ж.Ж. Ройела и др. // Защита металлов. – 1973. – Т.1. – N3. – С. 515 – 540.
3. Кушнарченко, В.М. Оборудование для коррозионно-механических испытаний в натуральных условиях / В.М. Кушнарченко, А.П. Фот, Р.Н. Узьяков // Заводская лаборатория. – 1991. – Ч.1, N7. – С. 47 – 48. – Ч.2, N 9. – С. 64 – 65.
4. Фот А.П. Экспериментальное оборудование и методики для коррозионно-механических испытаний: Аналитический обзор результатов исследований на объектах с воздействием сероводородсодержащих сред. – Оренбург: ОГУ, 1997. – 77 с.
5. Кушнарченко, В.М. Экспрессная оценка пороговых напряжений / В.М. Кушнарченко, А.П.Фот, Н.Г. Гончаров // Защита металлов. – 1990. – N9. – С. 1032 – 1034.
6. Кушнарченко, В.М. Методы определения сопротивления материалов воздействию сероводородсодержащих сред: Р 54-290-92 / В.М. Кушнарченко, О.И. Стеклов, А.П. Фот и др. – М.: ВНИИНМАШ Госстандарта СССР, 1992. – 26 с.
7. Кушнарченко, В.М. Установка КМУ-3-2 для испытаний в натуральных условиях / В.М. Кушнарченко, А.П.Фот Б.В.Перунов, В.С. Уханов, И.Ф. Миргородский // Заводская лаборатория. – 1989. – N7. – С. 86 – 87.
8. Кушнарченко, В.М. Машина МР-5-8В для коррозионно-механических испытаний / В.М. Кушнарченко, А.П. Фот, О.И. Стеклов и др. // Заводская лаборатория. – 1991. – N 6. – С. 60 – 61.
9. Кушнарченко, В.М. Метод определения защитной способности металлических покрытий: Р 54-275-89 / В.М. Кушнарченко, В.В.Романов, В.Ю. Филиновский, А.П.Фот и др. – М.: ВНИИНМАШ Госстандарта СССР, 1989. – 23 с.
10. Бугай, Д.Е. Методика определения степени защиты сталей ингибиторами от коррозионно-механического разрушения в сероводородсодержащих минерализованных средах: РД 39-0147103-324-88 / Д.Е. Бугай, М.Д.Гетманский, В.М. Кушнарченко, А.П.Фот и др. – Уфа: ВНИИСПТнефть, 1988. – 25 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 06-08-96904р_офи)

12.11.06 г.