

УДК 622.276(476)

СВОДНАЯ ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ОТДЕЛЬНЫХ МАРОК СТАЛИ НЕФТЕГАЗОПРОВОДНЫХ ТРУБ ДЛЯ РУП «ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «БЕЛОРУСНЕФТЬ»

В. О. КУЧЕНЕВ¹, А. Г. РАКУТЬКО¹, А. С. АСАДЧЕВ²

¹РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»
БелНИПИнефть, г. Гомель

²Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь

Ключевые слова: электрохимическая коррозия, коррозионное разрушение, коррозионная стойкость, скорость коррозии, нефтепромысловое оборудование, нефтегазопроводные трубы, марки сталей, добываемая продукция скважин, эксплуатационная температура, агрессивные компоненты, стендовые исследования.

Введение

Одной из причин, вызывающей преждевременный выход нефтепромыслового оборудования, в том числе стальных нефтегазопроводных труб, из работоспособного состояния, является электрохимическая коррозия стали.

Электрохимическая коррозия нефтепромыслового оборудования месторождений Республики Беларусь обусловлена наличием таких факторов, как высокая обводненность добываемой продукции, низкие значения рН (кислые среды), высокая степень минерализации, повышенная эксплуатационная температура, присутствие агрессивных компонентов (сероводород H_2S и углекислый газ CO_2). Продукция эксплуатационных скважин содержит воду, представляющую собой, как правило, рассолы хлоркальциевого типа высокой минерализации. Обводненность добываемой продукции в среднем составляет 70 %. Попутно добываемая вода является коррозионно-агрессивной, так как содержат ионы растворенных солей, растворенные агрессивные газы – сероводород и углекислый газ, имеет низкие значения рН. В составе попутного нефтяного газа (ПНГ) также имеются источники коррозионной агрессивности – углекислый газ и сероводород. Содержание углекислого газа в ПНГ находится в диапазоне от 0,02 до 11,2 % объемных, содержание сероводорода составляет 0–0,5 % объемных. Фактические соотношения PCO_2/P_{H_2S} изменяются в широких пределах (от 1 до > 500), что свидетельствует о протекании всех типов коррозионных процессов. Температура внешней среды и добываемой продукции скважин оказывает в большинстве случаев значительное влияние на скорость электрохимической коррозии нефтепромысловых труб, так как изменяет скорость диффузии, перенапряжение электродных процессов, степень анодной пассивности, растворимость деполяризатора (например кислорода) и вторичных продуктов коррозии. При этом скорость коррозии, как правило, возрастает [1], [5].

Статистические данные о количестве порывов трубопроводов в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» свидетельствуют о том, что при общем еже-

годном количестве порывов на уровне 139–243 ед., основная доля порывов трубопроводов (как водоводов так и нефтегазопроводов), приходится на порывы по причине внутренней коррозии (134–237 ед.), обусловленной агрессивностью перекачиваемых промысловых сред. Затраты материальных активов, направляемых на ликвидацию порывов, простои, связанные с остановкой и ремонтом магистральных стальных трубопроводов, составляют около 10 млн р./год.

Поэтому постоянный поиск методов борьбы с коррозионным разрушением нефтегазопроводных труб является актуальной задачей.

Цель нашей работы – достижение приемлемого уровня долговечности стальных нефтегазопроводных магистралей за счет использования в них выбранных по результатам исследований коррозионной стойкости нефтегазопроводных труб различного материального исполнения, что позволит обеспечить:

- увеличение сроков службы трубопроводов;
- сокращение затрат на ремонты и вынужденные простои;
- уменьшение или даже полный отказ от применения традиционных методов защиты трубопроводов, таких как ингибиторные обработки, покрытия различного назначения, протекторная или электрохимическая защита.

Комплексный подход к решению поставленной задачи включает:

- изучение ассортимента трубной продукции, материалов сталей и сплавов, используемых для строительства трубопроводов, анализ результатов испытаний и эксплуатации трубопроводов из новых марок сталей в конкретных промысловых условиях других нефтегазодобывающих предприятий;
- проведение сравнительных стендовых коррозионных испытаний с различными марками сталей в условиях, приближенных к реальным промысловым условиям эксплуатации трубопроводов РУП «Производственное объединение «Белоруснефть»;
- определение коррозионной стойкости опытных образцов различных марок сталей, используемых для нефтегазопроводных труб нефтепромысловых магистралей;
- выработка рекомендаций и проведение опытно-промысловых испытаний эффективных образцов сталей и сплавов, оценка полученных результатов.

Экспериментально-исследовательская часть

Для эксплуатации в нефтегазодобывающей промышленности предлагается широкий ассортимент трубной продукции, декларируемой как коррозионно-стойкая. В публикуемых материалах приводятся результаты опытно-промысловых коррозионных испытаний новых образцов трубной продукции в различных условиях эксплуатации [1]–[5].

Для достижения поставленной цели нами был выбран метод подбора трубопроводов, выполненных из труб из различных марок сталей, с последующим сравнением их долговечности в промысловых условиях и выдачей соответствующих рекомендаций по эффективному применению наиболее долговечных из них.

Научная новизна нашего предложения состоит в том, что коррозионные испытания сталей различного материального исполнения при повышенных давлениях, температурах, в условиях, моделирующих реальные промысловые условия системы сбора месторождений Республики Беларусь, ранее не проводились.

Кроме того, научный интерес представляет определение зависимости и связи интенсивности развития коррозионно-механического разрушения нефтегазопроводных труб при их эксплуатации в средах повышенной агрессивности от химического состава металла и физико-механических свойств различных марок труб.

В качестве экспериментальных образцов для проведения стендовых исследований были выбраны несколько вариантов материалов, традиционно применяющихся для изготовления линейных нефтегазопроводных трубопроводов, а именно:

- сталь марки 12ХНЗА – низкоуглеродистая, хромоникелевая, конструкционная легированная;
- сталь 40Х – конструкционная, легированная, хромистая;
- сталь 40ХН – конструкционная, легированная, хромоникелевая;
- сталь 13Сг – малоуглеродистая, хромистая;
- сталь 20 – конструкционная, углеродистая, качественная, характеризуется очень низким содержанием легирующих элементов и малым количеством неметаллических включений, после закалки и последующего отпуска имеет микроструктуру (феррит + зернистый перлит);
- сталь 20КТ – конструкционная, углеродистая, качественная, характеризуется низким содержанием легирующих элементов (меди, никеля марганца, ванадия) и малым количеством неметаллических включений; после закалки и последующего отпуска имеет микроструктуру (феррит + зернистый перлит);
- сталь 20А – конструкционная, углеродистая, качественная, характеризуется низким содержанием легирующих элементов (меди, никеля, марганца, ванадия, алюминия) и малым количеством неметаллических включений, после закалки и последующего отпуска имеет микроструктуру (феррит + зернистый перлит);
- сталь 13ХФА – конструкционная, низкоуглеродистая, качественная с содержанием легирующих элементов (хрома, никеля, меди и ванадия) и малым содержанием неметаллических включений;
- сталь 09Г2С – конструкционная, низкоуглеродистая, низколегирующая (кремний, марганец); имеет микроструктуру (феррит + зернистый перлит) с малым содержанием неметаллических включений.

Химический состав исследуемых сталей приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сталей

Марка стали	Содержание элементов, мас. %							
	C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
Сталь 12ХНЗА	0,09–0,16	0,17–0,37	0,3–0,6	2,75–3,15	0,025	0,025	0,6–0,9	0,3
Сталь 40Х	0,36–0,44	0,17–0,37	0,5–0,8	До 0,3	До 0,035	До 0,035	0,8–1,1	До 0,3
Сталь 40ХН	0,36–0,44	0,17–0,37	0,5–0,8	1–1,4	До 0,035	До 0,035	0,45–0,75	До 0,3
Сталь 13Сг	0,10–0,16	0,15–0,35	0,4–0,6	–	< 0,035	< 0,035	0,3–0,5	–
20	0,21	0,27	–	0,05	0,005	0,008	0,08	–
20КТ	0,22	0,20	0,48	0,13	0,004	0,011	0,10	0,23
20А	0,23	0,23	0,53	0,12	0,004	0,012	0,13	0,19
13ХФА	0,14	0,25	0,53	0,09	0,003	0,006	0,53	0,18
09Г2С	0,11	0,53	1,34	0,12	0,006	0,008	0,06	0,21

Стендовые испытания коррозионной стойкости материалов (марок стали) нефтепромысловых труб выполнены на оборудовании «АА-КОНКОР», разработанном в БелНИПИнефть, позволяющем моделировать фактические условия эксплуатации трубопроводов (давление, температура, скорость движения среды и содержание агрессивных компонентов).

Установка «АА-КОНКОР» (рис. 1) является закрытым циркуляционным контуром, в котором установлены две ячейки для размещения образцов-свидетелей и датчиков коррозии, имеет в своем составе циркуляционный насос для поддержания постоянной скорости потока, насос поддержания давления, дозировочный насос, датчики давления и температуры, расходомер, комплект программного обеспечения. На горизонтальном участке контура установлен фрагмент трубопровода, в котором последовательно размещены три пластины из образца испытываемой марки стали.

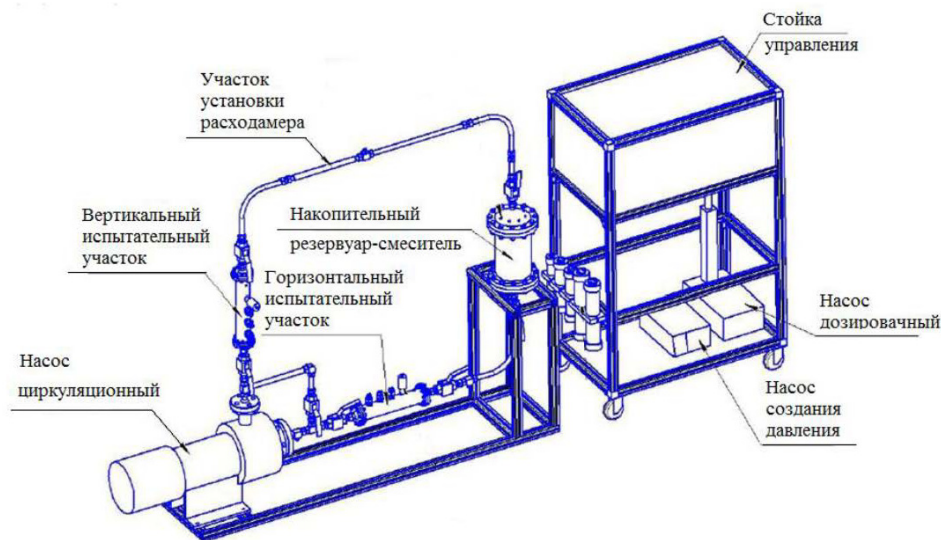


Рис. 1. Принципиальная схема установки «АА-КОНКОР»

Испытания коррозионной стойкости различных материалов проводились в условиях транспорта продукции скважины 191 Южно-Осташковичского месторождения.

Попутно добываемая вода Южно-Осташковичского месторождения скважины № 191 является типичной водой, добываемой совместно с нефтью на нефтяных месторождениях Республики Беларусь. По классификации Сулина такая вода относится к хлоркальциевому типу, в продукции содержится агрессивный кислый углекислый газ (22 мг/л), сероводород отсутствует, водородный показатель равен 6,1, минерализация составляет 204,4 г/л. Согласно РД 39-0147103–362 «Руководство по применению антикоррозионных мероприятий при составлении проектов обустройства и реконструкции объектов нефтяных месторождений», данная вода относится к сильноагрессивной. Физико-химические свойства воды приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-химические свойства воды

Наименование объекта	Содержание компонентов: мг/л; мг-экв./л; %-экв.									
	СГ	НСО ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	H ₂ S	Fe ²⁺	Fe ³⁺	CO ₂
Скважина 191 Южно-Осташковичская	120564,0	112,2	386,0	16032,0	2733,8	54839,4	0,0	14,9	0,5	22,0

Коррозионные испытания проводились при следующих условиях: скорость потока – 0,25 м/с; давление – 1,1 МПа; температура потока – 30 °С.

Скорость потока, температура потока и давление в контуре были выбраны на основании фактических промышленных данных.

Для контроля за изменением параметров рабочей среды в начале и в конце эксперимента отбирались пробы для определения содержания растворенного углекислого газа и сероводорода. Экспериментально было установлено, что достаточное время для испытаний составляет 6 сут, за которое скорость коррозии стабилизируется.

Испытания проводились на трех образцах-свидетелях (пластинах), установленных на горизонтальном участке циркуляционного контура (рис. 1). После соответствующей подготовки образцы устанавливались в ячейки испытательной установки с последующим полным погружением в рабочую среду с заданными параметрами. Скорость коррозии оценивалась гравиметрическим методом.

Полученные результаты испытаний представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты определения скорости коррозии гравиметрическим способом сталей марок 20; 20А; 20КТ; 13ХФА; 09Г2С; 12ХН3А, 40Х; 40ХН; 13Сг

Опытные образцы из марки стали	Средняя скорость коррозии, г/м ² · ч	Средняя скорость коррозии, мм/год	Характер выявленной коррозии
Первый этап стендовых исследований			
Сталь 20	0,36	0,40	Равномерная сплошная коррозия
Сталь 20А	0,39	0,45	То же
Сталь 20КТ	0,59	0,66	«
Сталь 13ХФА	0,62	0,70	«
Сталь 09Г2С	0,17	0,19	Язвенная коррозия
Второй этап стендовых исследований			
Сталь 20	0,23	0,26	Равномерная сплошная коррозия
Сталь 12ХН3А	0,43	0,49	То же
Сталь 40Х	0,45	0,50	«
Сталь 40ХН	0,46	0,51	«
Сталь 13Сг	0,09	0,11	«

На основании полученных данных четко прослеживается разница коррозионной стойкости сталей различных марок и характер коррозионных повреждений.

По результатам стендовых исследований выявлен следующий порядок падения коррозионной стойкости $T_{кор}$ сталей различных марок (в скобках указана средняя скорость коррозии, мм/год): $\max T_{кор} = 13Сг (0,11) \rightarrow 09Г2С (0,19) \rightarrow 20 (0,33) \rightarrow 20А (0,45) \rightarrow 12ХН3А (0,49) \rightarrow 40Х (0,50) \rightarrow 40ХН (0,51) \rightarrow 20КТ (0,66) \rightarrow 13ХФА (0,70) = \min T_{кор}$.

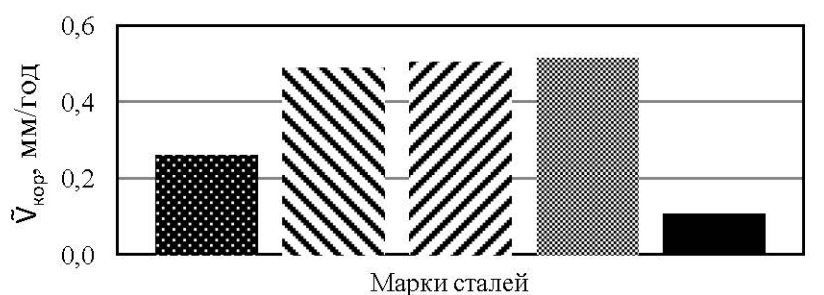
Характер коррозионных повреждений представлен в основном равномерной сплошной коррозией образцов всех марок сталей, кроме образца из стали марки 09Г2С, получившего язвенную коррозию поверхности.

Язвенные коррозионные повреждения на поверхности пластин из стали марки 09Г2С не позволяют рекомендовать ее к использованию в промышленных условиях, несмотря на низкие значения (0,19 мм/год) средней скорости коррозии. Повидимому, развитие язвенной коррозии стали марки 09Г2С объясняется, в первую

очередь, структурой металла (полосчатость – 3 балла; структура перлитно-ферритная; размер зерна – 8 баллов, отдельных зерен – 7 баллов), так как повышенная полосчатость создает определенную неравномерность строения, гетерогенность металла. Скопления неметаллических включений на границах зерен (а в их число может входить активный сульфид марганца) являются участками повышенной термодинамической неустойчивости, которые легко растворяются в коррозионной среде (с образованием сероводорода, который затем локально воздействует на металл), из-за чего происходит развитие питтинговой коррозии [6]. Также развитие коррозии сталей, легированных марганцем, может происходить вследствие того, что марганец, обладая более высокой активностью, чем железо, при реагировании с коррозионной средой образует рыхлые (по структуре кристаллической решетки) продукты коррозии (оксиды и сульфиды марганца), которые делают доступными проникновение к основному металлу агрессивных коррозионных компонентов [1], [2].

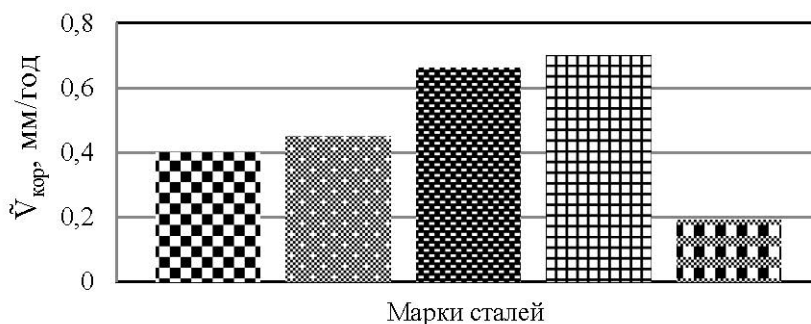
По результатам поэтапно полученных данных были построены графики скорости коррозии образцов труб, изготовленных из различных марок стали (рис. 2, а, б).

Как видно из данных табл. 3 и графиков (рис. 2, а, б) образцы, изготовленные из сталей марок 12ХН3А, 40Х и 40ХН, выявили схожие значения скорости коррозии, находящейся на уровне 0,49–0,51 мм/год, что является весьма значительным уровнем скорости коррозии, и такие марки сталей не могут быть рекомендованы к применению. А минимальное значение коррозионной стойкости $T_{кор}$ установлено для образцов из сталей 20КТ и 13ХФА, имеющих скорости коррозии, соответственно, 0,66 и 0,70 мм/год, что также не позволяет их рекомендовать к применению в нефтепромысловых магистральных.



■ Сталь 20 ▨ Сталь 12ХН3А ▩ Сталь 40Х ▩ Сталь 40ХН ■ Сталь 13Сг

а)



▨ 20 ▩ 20А ▩ 20КТ + 13ХФА ▩ 09Г2С

б)

Рис. 2. Скорость коррозии труб различных марок стали:
а – первый этап исследований; б – второй этап исследований

Образцы, изготовленные из стали марки 13Cr, показали наилучшую коррозионную стойкость $T_{кор}$.

Скорость коррозии образца, изготовленного из стали марки 13Cr, составила 0,11 мм/год, что явилось минимальным значением, обеспечивающим максимальную долговечность исследуемых образцов.

По результатам проведенных исследований сформулированы следующие выводы:

- определено, что стали различного материального исполнения имеют различную коррозионную стойкость при одинаковых условиях испытания;
- наименьшая скорость коррозии установлена для стали марки 13Cr;
- по сравнению с типичными применяемыми в настоящее время трубопроводами из стали марки 20 при условии применения трубопроводов из стали марки 13Cr их срок эксплуатации может быть увеличен в два раза;
- целесообразно рекомендовать к промышленным испытаниям на объектах (скважинах), схожих с добываемой продукцией скважины 191 Южно-Осташковичского месторождения (растворенный углекислый газ, отсутствие сероводорода), нефтегазопроводы, выполненные из стали марки 13Cr;
- продолжить стендовые и промышленные эксперименты по исследованию коррозионной стойкости сталей с целью выбора наиболее коррозионно-стойкого материала при изготовлении нефтепромысловых труб для их применения на нефтяных месторождениях Беларуси.

Заключение

Добываемая продукция нефтяных месторождений РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» является коррозионно-агрессивной. Электрохимическая коррозия нефтепромыслового оборудования месторождений Республики Беларусь, обусловлена наличием следующих факторов: высокая обводненность добываемой продукции; низкие значения pH (кислые среды); высокая степень минерализации; повышенная эксплуатационная температура; присутствие агрессивных компонентов (сероводород H_2S и углекислый газ CO_2).

Статистические данные о количестве порывов трубопроводов в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» указывают на то, что основная доля порывов трубопроводов (как водоводов, так и нефтегазопроводов) приходится на порывы по причине их внутренней коррозии, вызванной агрессивностью перекачиваемых промышленных сред. Затраты материальных активов, направляемых на ликвидацию порывов, простои из-за с остановок и ремонта магистральных стальных трубопроводов, составляют около 10 млн р./год. Вследствие этого постоянный поиск методов борьбы с коррозийным разрушением нефтегазопроводных труб является актуальной задачей.

Для решения поставленной задачи был выбран метод подбора трубопроводов, выполненных из труб из различных марок сталей, в условиях, моделирующих реальные промышленные условия системы сбора месторождений Республики Беларусь, на оборудовании (испытательном стенде) «АА-КОНКОР», разработанном в БелНИПИ-нефть и позволяющем моделировать фактические условия эксплуатации трубопроводов (давление, температура, скорость движения перекачиваемой среды и содержание в ней агрессивных компонентов).

Исходя из результатов стендовых исследований определен следующий порядок падения коррозионной стойкости $T_{кор}$ сталей различных марок (в скобках указана средняя скорость коррозии, мм/год): $\max T_{кор} = 13Cr (0,11) \rightarrow 09Г2С (0,19) \rightarrow 20 (0,33) \rightarrow 20А (0,45) \rightarrow 12ХН3А (0,49) \rightarrow 40Х (0,50) \rightarrow 40ХН (0,51) \rightarrow 20КТ (0,66) \rightarrow 13ХФА (0,70) = \min T_{кор}$.

В результате проведенных исследований установлено, что стали различного материального исполнения имеют различную коррозионную стойкость при одинако-

вых условиях испытания, а по сравнению с типичными применяемыми в настоящее время трубопроводами, выполненными из стали марки 20, при условии применения нефтепромысловых трубопроводов из стали марки 13Сг срок их эксплуатации может быть увеличен в два раза.

В настоящее время опытно-промысловые исследования коррозионной стойкости различных марок испытываемых сталей продолжаются на контрольных образцах (патрубках), установленных в трубопроводах выкидных линий нефтяных скважин, отличающихся свойствами добываемой продукции, скоростью перекачиваемой среды и содержанием в ней агрессивных компонентов.

Для определения сходимости полученных результатов стендовых и промысловых исследований коррозионной стойкости нефтепромысловых труб рекомендуется продолжить стендовые и промысловые эксперименты по исследованию коррозионной стойкости сталей с целью выбора наиболее коррозионно-стойкого материала при изготовлении нефтепромысловых труб для их применения на нефтяных месторождениях Беларуси.

Литература

1. Жук, Н. П. Коррозия и защита металлов / Н. П. Жук. – М. : Машгиз, 1957. – 328 с.
2. Особенности коррозионного разрушения нефтегазопроводных труб в условиях эксплуатации Коми и Западной Сибири / А. В. Иоффе [и др.] // Вектор науки ТГУ : сб. науч. ст. / Самар. инженер.-технол. центр. – Самара, 2010. – С. 50–54.
3. Кичигина, Н. А. Результаты ОПИ труб из сталей повышенной эксплуатационной надежности на месторождениях ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» / Н. А. Кичигина // Инженер. практика. – 2016. – № 9. – С. 8–15.
4. Трубы нефтяного сортамента, стойкие против углекислотной коррозии / Б. А. Ерехинский [и др.] // Коррозия территория нефтегаз : сб. науч. ст. / ПАО «Газпром», ООО «Газпром добыча Надым», ПАО «ТМК». – 2016. – С. 14–17.
5. Софрыгина, О. А. Практика изготовления труб нефтяного сортамента повышенной эксплуатационной надежности / О. А. Софрыгина // Инженер. практика. – 2013. – № 5. – С. 57–59.
6. Семенова, И. В. Коррозия и защита от коррозии / И. В. Семенова, Г. М. Флорианович, А. В. Хорошилов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 336 с.
7. Кученев, В. О. Результаты стендовых испытаний по исследованию термического воздействия на интенсивность коррозии нефтепромысловых труб / В. О. Кученев, А. С. Асадчев, А. Г. Ракутько // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 26–27 апр. 2018 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2018. – С. 118–120.
8. Кученев, В. О. Сравнительные коррозионные испытания сталей повышенной эксплуатационной надежности в РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» / В. О. Кученев, А. С. Асадчев // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 25–26 апр. 2019 г. / М-во образования Респ. Беларусь, Гомел. гос. техн. ун-т им. П. О. Сухого ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – С. 91–94.