

ВЕСТНИК
НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА «ХПИ»

Сборник научных трудов

Тематический выпуск

«Химия, химическая технология и экология»

14'2010

Издание основано Национальным техническим университетом «ХПИ»
в 2001 году

Госиздание

Свидетельство Госкомитета
По информационной политике Украины
КВ № 5256 от 2 июля 2001 года

КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, д-р техн. наук, проф.

Секретарь координационного совета

К.А. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук

А.П. Марченко, д-р техн. наук, проф.
Е.И. Сокол, д-р техн. наук, проф.
Е.Е. Александров, д-р техн. наук, проф.
Л.М. Бесов, д-р техн. наук, проф.
А.В. Бойко, д-р техн. наук, проф.
М.Д. Годлевский, д-р техн. наук, проф.
А.И. Грабченко, д-р техн. наук, проф.
В.Г. Данько, д-р техн. наук, проф.
В.Д. Дмитриенко, д-р техн. наук, проф.
И.Ф. Домнин, д-р техн. наук, проф.
В.В. Епифанов, д-р техн. наук, проф.
Ю.И. Зайцев, канд. техн. наук, проф.
П.А. Качанов, д-р техн. наук, проф.
В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.
С.И. Кондрашев, д-р техн. наук, проф.
В.М. Кошельник, д-р техн. наук, проф.
В.И. Кравченко, д-р техн. наук, проф.
Г.В. Лисачук, д-р техн. наук, проф.
В.С. Лупиков, д-р техн. наук, проф.
О.К. Морачковский, д-р техн. наук, проф.
В.И. Николаенко, д-р ист. наук, проф.
В.А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.
В.Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.
Г.М. Сучков, д-р техн. наук, проф.
Ю.В. Тимофеев, д-р техн. наук, проф.
Н.А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Ответственный редактор

М.И. Рыщенко, д-р техн. наук, проф.

Ответственный секретарь

Г.Н. Шабанова, д-р техн. наук, проф.

В.Л. Авраменко, канд. техн. наук, проф.

Б.И. Байрачный, д-р техн. наук, проф.

Л.Л. Брагина, д-р техн. наук, проф.

Ф.Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.

Г.И. Гринь, д-р техн. наук, проф.

И.Н. Демидов, д-р техн. наук, проф.

А.М. Каратеев, д-р хим. наук, проф.

Н.Ф. Клещев, д-р техн. наук, проф.

А.Я. Лобойко, д-р техн. наук, проф.

А.П. Мельник, д-р техн. наук, проф.

А.С. Савенков, д-р техн. наук, проф.

Г.Д. Семченко, д-р техн. наук, проф.

С.А. Слободской, д-р техн. наук, проф.

Р.Д. Сытник, д-р техн. наук, проф.

Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, д-р техн. наук, проф.

В.И. Тошинский, д-р техн. наук, проф.

В.П. Шапорев, д-р техн. наук, проф.

АДРЕС РЕДКОЛЛЕГИИ

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПИ»

Кафедра керамики

Тел. (057) 707-60-51

e-mail: szelentcov@kpi.kharkov.ua

УДК 621.833

Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Збірник наукових праць. Тематичний випуск “Хімія, хімічна технологія та екологія”. – Харків: НТУ “ХПІ”. – 2010. – № 14. – 164 с.

У збірнику представлено теоретичні та практичні результати наукових досліджень та розробок, що виконані викладачами вищої школи, аспірантами, науковими співробітниками, спеціалістами різних організацій та підприємств.

Для наукових співробітників, викладачів, аспірантів, спеціалістів.

В сборнике представлены теоретические и практические результаты научных исследований и разработок, которые выполнены преподавателями высшей школы, аспирантами, научными сотрудниками, специалистами различных организаций и предприятий.

Для научных работников, преподавателей, аспирантов, специалистов.

**Друкується за рішенням Вченої ради НТУ “ХПІ”,
протокол № 3 від 06.04.2010 р.**

ISSN 2079-0821

© Національний технічний університет «ХПІ», 2010

**ПОСВЯЩАЕТСЯ 80-ЛЕТИЮ
УКРАИНСКОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО И
КОНСТРУКТОРСКОГО ИНСТИТУТА
ХИМИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ**



Представляю вниманию уважаемых читателей юбилейный выпуск журнала к 80-летию Украинского научно-исследовательского и конструкторского института химического машиностроения.

ОАО «УкрНИИхиммаш» – ведущий в Украине и странах СНГ научно-технический и производственный центр по проведению исследований в области химической технологии и оборудования, разработке технической документации, изготовлению и внедрению в промышленность различных видов химического оборудования и машин.

Коллектив института достойно представляет прикладную науку и современный инжиниринг в экономике Украины.

Учеными, конструкторами, инженерами современными методами решаются самые сложные проблемы аппаратурного оформления прогрессивных экологически чистых, энергосберегающих, малоотходных и безотходных технологий.

Установки и аппараты, разработанные специалистами ОАО «УкрНИИхиммаш» эффективно работают в странах СНГ, Европы, Азии и Африки.

ОАО «УкрНИИхиммаш» является одним из первых институтов Министерства Промышленной политики Украины, который успешно прошел аттестацию как научная организация и был назначен головным в Украине по вопросам научно-технического обеспечения по направлениям: химическое, нефтеперерабатывающее, газовое и целлюлозно-бумажное оборудование.

В опубликованных в этом журнале статьях представлены современные научные подходы к использованию аналитических, экспериментальных, компьютерных методов в процессе разработки и внедрения в промышленность нового оборудования для проведения процессов теплообмена, массообмена, смешения и других в различных отраслях промышленности с учетом

технологии изготовления машин и аппаратов на заводах химического машиностроения.

Институт тесно сотрудничает с НТУ «ХПИ», Академической и ВУЗовской наукой, многими промышленными отечественными и зарубежными предприятиями.

Это творческое единение приумножает достижения отрасли химического машиностроения и помогает в подготовке научных и высококвалифицированных инженерных кадров.

НТУ «ХПИ» и ОАО «УкрНИИхиммаш» активно сотрудничают в учебном процессе.

В институте плодотворно работает филиал кафедры «Химическая техника и промышленная экология».

Студенты кафедры проводят лабораторные работы, проходят производственную и преддипломную практики.

При выполнении дипломных работ получают квалифицированные консультации ведущих специалистов института.

ОАО «УкрНИИхиммаш» доброжелательно предоставляет свои экспериментальные установки для соискателей ученых степеней.

Ведущие ученые института щедро делятся своими научными знаниями и производственным опытом.

Многие специалисты, прошедшие научно-производственную школу института стали выдающимися руководителями многих предприятий.

Коллектив ОАО «УкрНИИхиммаш» рассматривает свой 80-летний юбилей не только как дату подведения итогов работы, но прежде всего как значительный рубеж, мобилирующий его на новые трудовые достижения.

Поздравляя всех сотрудников ОАО «УкрНИИхиммаш» с юбилеем, желаю талантливому коллективу успешной реализации огромного творческого потенциала в прикладной науке и химической технике, достойного вклада в развитие экономики нашей любимой Украины.

Заслуженный деятель науки и техники Украины,
лауреат Государственной премии в области
науки и техники, доктор технических наук,
профессор, ректор
Национального технического университета
«Харьковский политехнический институт»

Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ

УДК 541.1.

Ю.Б. ДАНИЛОВ, док. техн. наук, председатель правления,
генеральный директор ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина

УКРАИНСКОМУ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМУ И КОНСТРУКТОРСКОМУ ИНСТИТУТУ ХИМИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ – 80 ЛЕТ

Без прошлого нет будущего. Не мог существовать и развиваться конструкторско-исследовательский институт без новых конструкций, новых технологий, без слаженной и высокопрофессиональной команды исследователей и надежных партнеров.

Именно это в условиях рыночной экономики послужило основой для преобразования института в Открытое акционерное общество и его вхождение в научно-производственный концерн «Кедр-89», г. Москва, состоящий из ряда проектных институтов и заводов-изготовителей оборудования, в частности ОАО «Пензхиммаш», ОАО «Компрессормаш», ОАО «Павлоградхиммаш», монтажно-строительных трестов, что позволяет реализовать проекты модернизации действующих и создание новых производств под ключ в кратчайшие сроки.

Учрежденный 5 июня 1930 года институт с момента основания был нацелен на создание новых конструкций для бурно развивающихся химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности, в первую очередь для отказа от закупок оборудования за рубежом. Были разработаны и внедрены в промышленности выпарные установки, первые советские барабанные сушилки – было разработано и освоено заводами около 20 типов размеров сушилок диаметром от 900 до 2200 мм и длиной от 4 до 18 метров для сушки поташа, аммофоса, калийных удобрений и многих других химических продуктов.

Наряду с разработкой и внедрением химического оборудования институт проводит ряд исследовательских работ в области:

- выпаривания с естественной и принудительной циркуляцией раствора;
- выпаривания кристаллизующихся растворов;
- сепарации вторичных паров выпарных аппаратов;
- сушка;

- разделения суспензий и др.

К 1940 году в институте выросли квалифицированные кадры: руководители отделов Н.Г. Гуляев, Г.Д. Ильин, инженеры-конструкторы П.Г. Завязкин, И.С. Ермаков, профессор М.П. Ластовцев и др., был получен и накоплен отечественный опыт в разработке и создании нового современного высокоэффективного оборудования. По разработкам института строились новые заводы отрасли.

Мирная жизнь страны была прервана нападением фашистской Германии, и институт был перебазирован в г. Златоуст Челябинской области, где выполнял заказы для нужд оборонной промышленности, в частности разрабатывал узлы и детали для легендарных «Катюш», самолетов, минных взрывных устройств и многое другое.

На фронт ушли А.К. Гусев, И.И. Жилевич, Д.И. Кондрашев, А.А. Лапин, М.Я. Мешенгиссер, Н.Е. Стогний, В.А. Николаев, И.Г. Свешников, З.И. Симхович и многие другие.

В группе подпольщиков смело боролся с фашистами, оставленный для подпольной работы сотрудник института Митрофан Егорович Ковшарь, погибший геройской смертью от рук фашистских оккупантов.

В 1943 году после освобождения Харькова институт вернулся из эвакуации. В штат института насчитывал 28 человек. Во главе списка значилась и фамилия директора Ивана Семеновича Ермакова.

В послевоенные годы коллектив института выполнял значительные работы по восстановлению технической документации на заводах отрасли. В 1949 году по разработкам института и с его участием введен цех эмалирования химической аппаратуры на Фастовском заводе «Красный октябрь», организовано производство запорной арматуры для высокоагрессивных сред на Кролевцеком заводе «Металл», выполнял проектирование Полтавского завода химического машиностроения, рассчитанного на выпуск крупногабаритной эмалированной емкостной аппаратуры. По инициативе института на основе его разработок было создано первое в Советском Союзе специализированное производство керамического оборудования для высокоагрессивных сред на Славянском керамическом комбинате.

В пятидесятые годы коллектив института проделал большой комплекс работ по разработке оборудования для новой развивающейся отрасли по использованию атомной энергии в мирных целях. Многие ученые, конструкторы, рабочие получили высокие правительственные награды, а руководитель

работ, директор института И.С. Ермаков был удостоен Государственной премии СССР, Среди награжденных следует отметить плодотворную работу в создании новых конструкций П.П. Черных, Н.К. Авлуковой, Н.А. Козлова, Л.Л. Сукстанского, Г.И. Волова, В.И. Постогварда и др.

В 60-е годы начали складываться научные школы по направлениям – теплообменного оборудования, разделения суспензий, кристаллизационного оборудования, материаловедения и технологии изготовления оборудования, динамики и прочности, механохимии, создание приводов. Создание теплообменного оборудования возглавили Е.М. Ковалев, Л.П. Перцев, А.Б. Тютюнников, О.А. Коробчанский, Л.М. Коваленко. Разделение суспензий возглавили Ю.И. Шарецкий, М.Я. Мешенгиссер, В.П. Сибирко, кристаллизацию из растворов и расплавов – К.П. Ткаченко, В.Г. Пономаренко.

Направление механохимии возглавил А.Ф. Сороченко, а разработку и создание приводов – И.В. Сигов.

Материаловедение, технологию изготовления оборудования возглавили Д.Г. Никитин и Г.Г. Почепцова, работы по динамике и прочности конструкций выполнялись под научным руководством профессора Б.С. Ковальского.

Лабораторные стенды отделов выпарного, теплообменного, фильтровального, колонного, кристаллизационного оборудования, центрифуг, отделов материалов и технологичности конструкций, прочности были широко известны в научном мире и привлекали внимание ученых из других научных организаций СССР и зарубежных фирм для проведения глубоких исследований. Экспериментальная база, созданию которой институт обязан директору Ермакову Ивану Семеновичу, позволяла институту создавать первоклассные конструкции на мировом уровне, а в ряде случаев создавать оборудование, не имеющее аналога в мировой практике. К таким конструкциям, например, относятся автоматические фильтрпрессы, которые в себе сочетают свойства аппарата для фильтрации и машины. Таких конструкций до работ И.С. Ермакова, М.Я. Мешенгиссера, Г.М. Кочкина, А.Н. Станкуна, В.С. Малышкина, В.А. Черников в мире не было. Ведущие мировые державы в области фильтрации – Германия и Япония купили лицензии на их производство.

Научные исследования на стендах под руководством ведущих ученых стали хорошей школой для молодых специалистов и служили воспитанию научной смены.

Конструкции отдельных узлов и аппаратов тщательно отработывались на стендах и после этого закладывались в технические проекты.

На стендах УкрНИИхиммаша отрабатывал свои аспирантские идеи будущий ректор НТУ «ХПИ» – Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ.

УкрНИИхиммаш стал головным институтом в химическом и нефтяном машиностроении по выпарному оборудованию, теплообменникам, колоннам, центрифугам, фильтрам, кристаллизаторам, приводам.

В 70-е годы в УкрНИИхиммаше создается отдел комплектной разработки и поставки оборудования технологических линий, и институт определяется головным за оборудование по производствам двуокиси титана, капролактама, этилбензола и стирола, винилацетата, уксусной и муравьиной кислот, моющих средств, поливинилацетатных дисперсий, соды и содовых продуктов, химико-фармацевтических линий. Был создан штат главных конструкторов проектов по закрепленным линиям. Среди них В.И. Томилин, Д.И. Нечитайло, В.П. Дьяков, В.Е. Лиман, Балабанов, В.П. Кияшко, О.И. Краснухин, В.Н. Протасеня, Н.А. Ширококов, Л.А. Катков.

Институт развивался и рос и в начале 70-х годов пришли молодые специалисты, которые впоследствии выросли в ведущих ученых и специалистов института, среди них Ю.Б. Данилов, А.Н. Сулима, М.А. Харченко, О.И. Невшупа, А.Ф. Мацак, В.Ф. Павленко, О.И. Гуров, В.Н. Юрченко, Н.Е. Загорюлько, Е.К. Гвоздикова, Т.Э. Шепиль, Н.И. Цыбульник, А.Г. Куришко, В.Н. Дудник, Е.Г. Кочкина, В.Ф. Сущенко, И.А. Сущенко и другие.

В школе тепломассообмена выкристаллизовались три самостоятельных направления – выпарное оборудование и все процессы, протекающие в выпарных аппаратах при концентрировании сред, в том числе сепарация, разделение и конденсация. Большим коллективом ученых, инженеров, конструкторов под руководством Е.М. Ковалева, лауреата Ленинской премии в области выпарного оборудования Е.П. Новикова, Л.П. Перцева, Ю.Б.Данилова, В.С. Фокина, В.И. Чирвы, Н.Я. Данилина, З.В. Жуковой и других были созданы теоретические основы концентрирования многокомпонентных смесей, как в водной среде, так и в безводной, отработаны важнейшие элементы конструкций на стендах отдела.

По разработкам отдела заводы отрасли стали изготавливать и поставлять комплектные выпарные установки для целлюлозно-бумажной промышленности, гидролизной, содо-поташной, регенерации осадительных ванн при получении искусственного волокна, упаривания гидролизной серной кислоты, концентрирования электролитических щелоков, поваренной соли, хлористого кальция, роданистого аммония, сточных вод ТЭЦ.

Были созданы многокорпусные выпарные установки пленочного типа с поверхностью до 2200 м² каждый и производительностью 50, 100, 200 т/ч по выпаренной воде.

Разработанные УкрНИИхиммаш выпарные установки погружного горения были поставлены на концентрирование гидролизной серной кислоты в производстве двуокиси титана, упаривание сточных вод, хлористого кальция. Они имели оригинальную конструкцию выпарного аппарата, с лучшими, чем в зарубежных эксплуатационными показателями. Разработка аппаратов погружного горения проводилась под руководством талантливых инженеров Г.И. Волова и В.С. Вирича.

Второе направление тесно связано с первым – теплообменное – теплообменники кожухотрубчатые из металла и неметаллов, пластинчатые теплообменники из листа с толщиной стенки 1,0 – 0,8 мм разборные и сварные. Работы проводились под руководством О.А. Коробчанского, Л.П. Перцева, Л.М. Коваленко, И.П. Ефременко.

На базе теоретических разработок совместно с НТУ «ХПИ» созданы первые отечественные пластинчатые теплообменники разборные, полуразборные и сварные из металла и кожухотрубчатые и погружные теплообменники из фторопласта и других неметаллических материалов.

Третье направление – ректификация, абсорбция и дистилляция, руководители направления А.Б. Тютюнников, А.Н. Марченко, Е.К. Тарынин. Разработка теоретических основ процессов абсорбции, ректификации и дистилляция и отработка элементов конструкций аппаратов на стендах УкрНИИхиммаша позволила развить новое направление по созданию внутренних устройств, конструкций тарелок с принципиально новыми принципами организации взаимодействия сред на контактных устройствах и насадок, высокоэффективных роторно-пленочных аппаратов и т.д.

Школа разделения суспензий, созданная под руководством Ю.И. Шарецкого и М.Я. Мешенгиссера, позволила разработать теоретические основы разделения суспензий в центробежном поле и создать многотоннажные центрифуги для минеральных удобрений, а также создать машины для фильтрации суспензий – автоматические фильтрпресса.

Школа промышленной кристаллизации УкрНИИхиммаша получила широкое признание в СССР и за рубежом.

Возглавляемое В.Г. Пономаренко и К.П. Ткаченко, это направление создало уникальное кристаллизационное оборудование, в частности дисковые

кристаллизаторы с развитой очищаемой поверхностью теплообмена (приоритет СССР).

Указанные кристаллизаторы имеют в 2,5 – 3,0 раза большую поверхность теплообмена и их производительность увеличивается в том же соотношении. Следует отметить значительный вклад в разработки С.Н. Беломытцева, Ю.И. Курлянда, В.Н. Бея, А.И. Калмычкова, Ю.Г. Свердлина, О.И. Невшупы и др.

Для проведения механохимических процессов под руководством А.Ф. Сороченко, О.Л. Запорожца, М.А. Харченко были разработаны теоретические основы реакторно-смесительных машин, КБ под руководством А.Г. Звездина разработало конструкции, а Тамбовский завод полимерного машиностроения освоил выпуск разработанных машин для проведения механо-химических процессов. Эти реакторно-смесительные установки нашли широкое применение во многих химических технологиях.

Особое место в деятельности института занимала лаборатория приводных устройств, возглавляемая неутомимым энтузиастом своего дела, кандидатом технических наук, Ильей Вячеславовичем Сиговым, в состав которой входили талантливые инженеры Ю.П. Кулагин, Е.К. Самборский, Т.А. Волова, Ю.Д. Кондрашов и замечательный механик П.Ф. Тищенко.

В конце 80-х годов под руководством Ю.Д. Кондрашова были созданы привода с электромагнитной муфтой для взрыво-токсичных и пожароопасных сред. Привода, созданные этим коллективом, нашли свое применение и добрую оценку во многих машинах и аппаратах химических производств.

Школа материаловедения и технологии изготовления оборудования, созданная Д.Г. Никитиным и Г.Г. Почепцовой и призванная обеспечить разрабатываемые конструкции конструкционными, сварочными и прокладочными материалами, технологией изготовления оборудования, развивалась и крепла с ростом и становлением института.

Создание выпарных аппаратов потребовало разработать технологию развальцовки трубок в трубных решетках, которая и была разработана Алексеем Яковлевичем Матяшом с сотрудниками, затем эта технология была передана в Волгоградский технологический институт.

Агрессивность сред химической промышленности потребовала применения высоколегированных сталей и сплавов в сварных конструкциях и технологии сварки выпарных аппаратов, теплообменников, колонн. Технология сварки была разработана Юрченко Владиславом Юрьевичем в тесном кон-

такте и творческом содружестве с отделом сварки высоколегированных сталей ИЭС им. Е.О. Патона под руководством Николая Ивановича Каховского, а затем Константина Андреевича Ющенко.

Семидесятые годы прошлого века характерны широким применением титана ВТ1-0 в конструкциях, в которых ранее применялись высоколегированные стали и сплавы и здесь впервые в Харькове Александр Иванович Кабашный при содействии ИЭС им. Е.О. Патона освоил технологии сварки конструкций из титана.

Переход от создания отдельных видов оборудования до поставки под ключ комплектных технологических линий потребовал проведения фундаментальных коррозионных исследований, которые проводились В.А. Качановым совместно с ведущими сотрудниками лаборатории коррозии Б.П. Беляковым, А.С. Мочаевым, Л.А. Ключниковой, Ю.Ф. Циоздой, И.Д. Дорошенко, Е.К. Гвоздиковой, Н.И. Цыбульник, Л.Д. Дрозд, О.К. Барабаш, Т.Э. Шепиль, Т.Е. Цента и др.

Блестяще выполненная работа по выбору конструкционных материалов для линии получения диоксида титана Е.К. Гвоздиковой, Л.В. Ширяевой, О.К. Барабаш с участием главного конструктора проекта В.И. Томилина завершилась разработкой оборудования первых отечественных линий в Сумах и на Крымском заводе двуокиси титана. Было создано институтом уникальное выпарное оборудование из титана ВТ1-0, теплообменное из циркония, фильтровальное из сплава 06ХН28МДТ, которое эксплуатируется и поныне.

Разработка оборудования линии получения этилбензола и стирола под руководством главного конструктора проекта Д.И. Нечитайло и зам. директора по НИР Л.П. Перцева потребовала применения новых конструкционных материалов в связи с высокой агрессивностью перерабатываемых сред. К примеру, титан ВТ1-0 подвергался язвенному разрушению. В этих средах за рубежом в подобных производствах применялся никелевый сплав с содержанием до 30% молибдена. Проведенные коррозионно-электрохимические исследования показали возможность применения сплавов с существенно меньшим содержанием молибдена, который и был принят для изготовления основного оборудования – реактора приготовления катализаторного комплекса, алкилятора и теплообменника. Ведущими конструкторами В.Н. Потапенко и В.В. Рарыкиным под руководством В.И. Шпорхуна были разработаны уникальные конструкции аппаратов из хастеллоя ЭП-567 и ЭП-760. Завод им. М.В. Фрунзе при авторском надзоре УкрНИИхиммаша и ИЭС им. Е.О. Пато-

на изготовил первое в СССР крупнотоннажное оборудование из высоколегированных сплавов для получения этилбензола. Вторая линия получения стирола этого же производства потребовала также создания новых конструкций, которые и были разработаны А.И. Линтваревым под руководством А.Б. Тютюнникова, в частности уникальные колонные аппараты диаметром 7 м с высокоэффективными внутренними устройствами, разработанными УкрНИИхиммашем. Руководители этой работы Л.П. Перцев, Д.И. Нечитайло, Д.Г. Никитин и А.Б. Тютюнников стали лауреатами премии Совета Министров СССР.

Под руководством главного конструктора проекта линии получения адипиновой кислоты В.П. Кияшко и зам. директора В.Г. Пономаренко было разработано отечественное оборудования для Ровенского ПО «Азот». В результате коррозионных исследований применены низко углеродистые стали 03X18H11, 03X17H14M3. Из сплава ВТ1-0 сконструирована центрифуга для разделения суспензии дикарбоновых кислот и азотной кислоты, роторно-пленочный испаритель для концентрирования адипиновой кислоты и кристаллизаторы из стали 03X18H11 с полированной поверхностью. Линия успешно эксплуатируется по настоящее время. Завод-изготовитель – СНПО им. М.В. Фрунзе и завод «КемеровоХиммаш»

УкрНИИхиммашу был поручен выбор материалов для линии получения гидроксиламинсульфата. Проведенные исследования позволили рекомендовать отечественную сталь 03X21H21M4ГБ для изготовления основного оборудования линии. Впервые разработана технология предварительной пассивации оборудования. Работа по технологии сварки проводилась совместно с ИЭС им. Е.О. Патона, завод-изготовитель – Пензхиммаш. Линии успешно эксплуатируются с 1980 года в Черкассах, Рустави и Тольятти.

Под руководством главного конструктора Балабанова и зам. директора В.Г. Пономаренко было разработано оборудование первого отечественного производства получения винилацетата из этилена и уксусной кислоты. В линии применены традиционные и новые конструкционные материалы, в частности, для особо агрессивных условий композитные сварные соединения из хастеллоя ЭП-567 и стали 03X17H13M3, мембраны из циркония, уникальные реактора из стали ЭИ-580. Завод-изготовитель – Пензхиммаш. Оборудование устойчиво работает на заводе Ставропольполимер.

Развитие и становление УкрНИИхиммаша проходило в тесном сотрудничестве с ИЭС им. Е.О. Патона будь-то создание новых конструкций или приме-

нение новых конструкционных и сварочных материалов. При организации производства панельных греющих камер выпарных аппаратов ИЭС им. Е.О. Патона разрабатывал средства автоматизации и механизации процесса сварки, при изготовлении крупнотоннажного оборудования хромоникельмолибденовых сплавов на СМПО им. М.В. Фрунзе ИЭС оказал существенную помощь при отработке режимов сварки хастеллоев в конструкции.

В отделе прочности под научным руководством профессора Б.С. Ковальского выросла целая плеяда молодых ученых, которые стали ведущими сотрудниками института. Среди них Л.П. Перцев, В.М. Долинский, Л.М. Родионов, А.П. Кузьменко, С.А. Белов, П.С. Марченко и другие. Без расчета на прочность, естественно, не могла быть разработана ни одна конструкция. Поэтому, вклад научной школы прочности весьма значителен, и она была широко известна в нашей стране и за рубежом своими работами.

За создание высокоэффективного оборудования и в связи с 50-летием институт был награжден Орденом Трудового красного знамени. Многолетние творческие связи связывают УкрНИИхиммаш с Государственным политехническим университетом «ХПИ». К наиболее важным работам относятся организация производства пластинчатых теплообменников на заводе «Павлоградхиммаш», сварных теплообменников для колонн синтеза аммиака и внедрение их во многих производствах, работы, связанные с производством азотной кислоты и внедрением тепломассообменного оборудования из фторопласта.

Сегодня институт является ведущим научно-техническим центром Украины, он обладает современной лабораторно-экспериментальной базой, высококвалифицированными научными и инженерными кадрами и способен решать сложные научные, конструкторские и проектные проблемы.

Отделы института полностью оснащены компьютерной техникой. Совершенствуется экспериментальная база для проведения работ по диагностике и определению остаточного ресурса работы оборудования, металлографических и коррозионных исследований. ОАО «УкрНИИхиммаш» аттестован в Минпромполитика Украины как научная организация и определен головной организацией в Украине в вопросах научно-технического обеспечения по направлениям – химическое, нефтеперерабатывающее, газовое и целлюлозно-бумажное оборудование, стандартизация оборудования для химической промышленности.

ОАО «УкрНИИхиммаш» Министерством образования и науки Украины внесен в Государственный реестр научных организаций, которым обеспечивается поддержка государства (Свидетельство № 00158, Серия НД).

В последние годы коллективом института выполнен большой объем исследовательских и конструкторских работ по созданию оборудования для регенерации отработанных серной и азотной кислот, каустика после выщелачивания циркониевых руд, разработал экстракторы новой конструкции в процессе очистки сжиженных углеводородных газов от сероводорода и внедрил их на Кременчугском ПАО «Укртатнафта», разработал технологию и оборудование получения искусственного гипса. Для модернизации нефтеперерабатывающих предприятий Украины и России выполнен большой комплекс работ по созданию оборудования нового поколения на основе базовых проектов инофирм - реакторов, колонн, теплообменников, сепараторов, емкостей для заводов в Комсомольске-на-Амуре, ОАО «Салаватнефтеоргсинтез», Рязанский НПХ, ПАО «Укртатнафта», ОАО «НПК Галичина» и другие. Работы выполняются комплексно всеми отделами института и сдаются заказчику «под ключ».

Наряду с разработкой оборудования для модернизации нефтеперерабатывающих предприятий ОАО «УкрНИИхиммаш» продолжает работу и по созданию новых конструкций – компоблоков, более эффективных внутренних устройств колонн, созданию греющих пластинчатых камер для выпарных аппаратов.

Поступила в редколлегию 25.03.10

Ю.Б. ДАНИЛОВ, докт. техн. наук, **В.Н. КОЛОМИЕЦ**, канд. техн. наук,
М.А. ХАРЧЕНКО, канд. техн. наук,
ОАО «УкрНИИХиммаш», г. Харьков, Украина

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОТБЕЛКИ КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ФТОРОПЛАСТОВЫХ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ АППАРАТОВ

У роботі досліджені й описані фактори впливу фторопластових тепломасообмінних апаратів на процес десорбції оксидів азоту у виробництві концентрування азотної кислоти прямим методом. Наведено математичні залежності, що дозволяють прогнозувати проведення процесу десорбції оксидів азоту і його оптимальних умов залежно від основних факторів технологічного режиму. Досягнута можливість оперативного керування температурним режимом вибільної колони в чітко заданих параметрах, що відсутньо у типовій конструкції алюмінієвих вибільних колон.

В работе исследованы и описаны факторы воздействия фторопластовых тепломассообменных аппаратов на процесс десорбции оксидов азота в производстве концентрирования азотной кислоты прямым методом. Приведены математические зависимости, которые дают возможность предсказывать проведение процесса десорбции оксидов азота и его оптимальных условий в зависимости от основных факторов технологического режима. Достигнута возможность оперативного управления температурным режимом отбелочной колонны в пределах заданных параметров, что отсутствует в типовой конструкции алюминиевых отбелочных колонн.

In work are investigated and the factors of influence of fluoroplastic heat and mass exchange devices on process desorption of oxides of nitrogen in manufacture of concentration a nitric acid by a direct method are described. The mathematical dependences allowing to predict realization of process desorption of oxides of nitrogen and his optimum conditions depending on major factors of a technological mode are given. The opportunity of the operative equation by a temperature mode of bleach a column in the strictly given parameters is achieved, that is absent in a typical design aluminium bleach of columns.

Концентрированная азотная кислота и особо чистая азотная кислота пользуются особым спросом в различных отраслях промышленности. Поэтому определение оптимальных условий и получение полных и надежных данных позволяющих обеспечить интенсификацию технологических процессов получения данных кислот, а также усовершенствование аппаратурного оформления этих технологических процессов, является важной и актуальной задачей.

Решению этой задачи посвящен ряд научно-исследовательских работ

выполненных ОАО «УкрНИИХиммаш» в реальных условиях действующих производств концентрированной азотной кислоты.

Одним из важнейших технологических процессов в производстве концентрирования азотной кислоты прямым методом является процесс десорбции оксидов азота из раствора азотной кислоты, который осуществляется по реакции:



Реакция связана с поглощением тепла и смещается вправо с повышением температуры.

Процесс десорбции оксидов азота можно рассматривать как тепловой процесс, где температура является одним из основных факторов, влияющих на скорость десорбции.

В свою очередь, температура зависит от давления в колонне.

Анализ литературных и экспериментальных данных показывает, что повышение давления способствует высоким температурам кипения, а повышение температуры благоприятствует полному разделению веществ при реакциях с поглощением тепла, то есть усиливает эндотермическое направление процесса.

Оптимальную температуру определяем экспериментальным путем.

Соотношения, выражающие влияние температуры на скорость процесса десорбции, определяли зависимостью логарифма константы скорости десорбции от обратного значения абсолютной температуры.

Соотношения между этими величинами (рис. 1) показывают, что логарифмы константы скорости десорбции находятся в линейной зависимости от обратной температуры.

Искомую зависимость выразили уравнением, которое в интервале температур 353 – 359 К для данного процесса имеет вид:

$$\lg K = 1,7723 - \frac{240}{T},$$

где T – температура, К.

Полученная зависимость позволяет выбрать оптимальную темпера-

туру осуществления процесса десорбции оксидов азота при общем давлении 0,1 МПа.

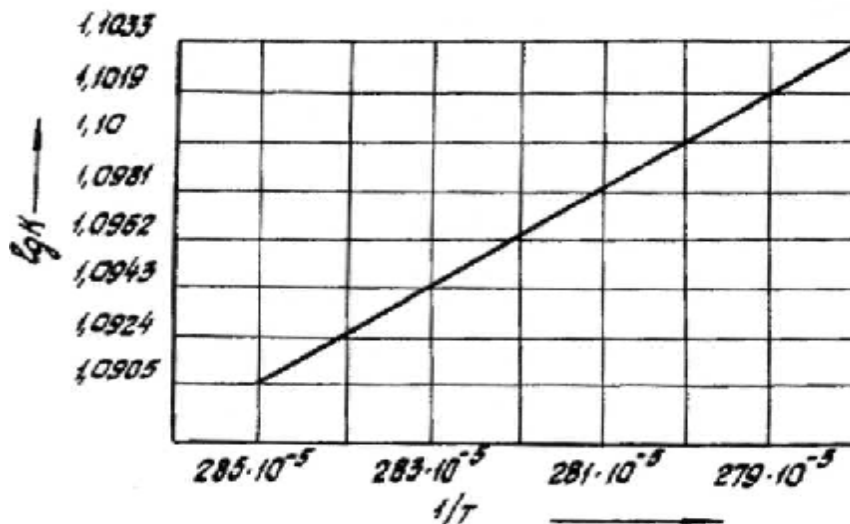


Рис. 1. Зависимость логарифма константы скорости десорбции от обратного значения абсолютной температуры процесса

Осуществление процесса десорбции при повышенной температуре способствует усиленной коррозии отбелочной колонны при существующей организации подвода тепла, чем обуславливаются недостаточный срок службы (6 – 9 месяцев) отбелочных колонн и низкое качество продукционной азотной кислоты вследствие загрязнения ее продуктами коррозии.

Поэтому нами принята организация подвода тепла посредством выносного кипятильника, нагревательные элементы которого, выполненные из труб фторопласта-4Д, представляют собой диск объемной формы (рис. 2).

Объемная форма нагревательного элемента позволяет обеспечить кипение исходного раствора азотной кислоты равномерно во всем объеме кипятильника.

Таким образом, центр воздействия высоких температур перенесен на кипятильник, выполненный из фторполимеров, которые обладают высокой коррозионной стойкостью в широком интервале температур.

С целью стабилизации температурного режима процесса десорбции в верхней части и на выходе отбелочной колонны, снижения брызгоуноса азотной кислоты с потоком газообразных оксидов азота было применено контактное теплообменное устройство из фторопластовых трубок.

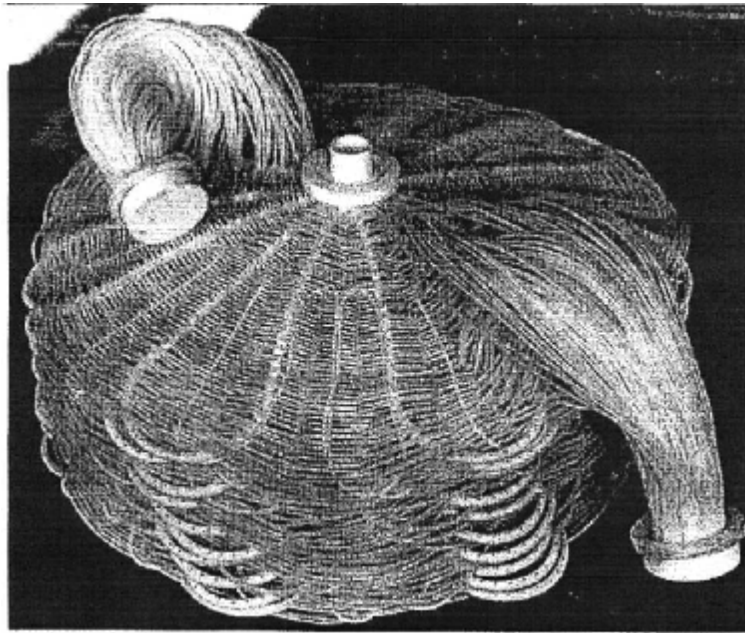


Рис. 2. Нагревательный элемент из фторопластовых труб выносного кипяtilьника отбелочной колонны

Такое устройство обладает свойством одновременно совмещать процессы теплообмена, массообмена и сепарации жидкой фазы из газового потока. На выходе из отбелочной колонны достигается практически «сухой» поток газообразных оксидов азота.

Отсепарированная жидкая фаза возвращается в колонну, что повышает выход готового продукта на 7 – 10 %.

Применение фторопластового дефлегматора в верхней части отбелочной колонны позволяет стабильно поддерживать оптимальную температуру паров на выходе из колонны в интервале 34 – 39 °С, тогда как в типовых отбелочных алюминиевых колоннах температура выходящих из колонны паров лежит в интервале 45 – 50 °С и может регулироваться только изменением температуры в кубе колонны за счет расхода и температуры греющего пара.

Такое регулирование отличается большой инертностью и не может оперативно изменить температурный режим колонны.

Зависимость содержания оксидов азота и азотной кислоты в парах на выходе колонны от их температуры приведена на графике (рис. 3).

Из графика видно, что с уменьшением температуры содержание оксидов азота в парах повышается, а азотной кислоты – понижается.

Такая зависимость изменения содержания оксидов азота в парах от их температуры на выходе отбелочной колонны аппроксимируется уравнением:

$$C_{N_2O_4} = 89,13 + 0,447 \cdot t + 0,003526 \cdot t^2 - 0,0002336 \cdot t^3,$$

а изменение содержания азотной кислоты при тех же условиях аппроксимируется уравнением:

$$C_{HNO_3} = 125,2 - 8,149 \cdot t + 0,1618 \cdot t^2 - 0,00087 \cdot t^3.$$

Температурный интервал использования этих уравнений 34 – 50 °С, а наибольшая погрешность – 3 %.

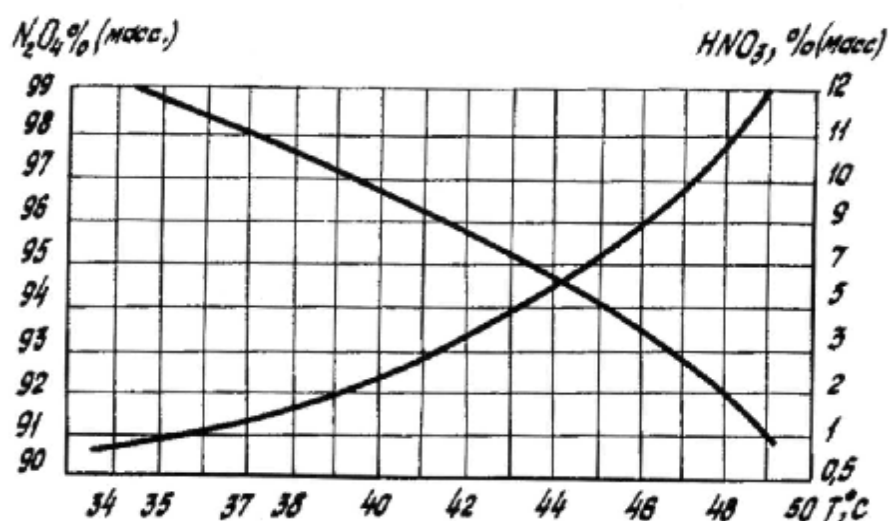


Рис. 3. Зависимость содержания оксидов азота и азотной кислоты в парах на выходе из колонны от их температуры

Оптимизация процесса десорбции оксидов азота путем применения фторопластовых теплообменных аппаратов качественно характеризуется степенью десорбции оксидов азота.

На графике (рис. 4) приведена зависимость степени десорбции оксидов азота от температуры в зоне кипения исходного раствора азотной кислоты.

Из графика видно, что с повышением температуры степень десорбции оксидов азота возрастает. Наибольшее значение степени десорбции достигается при температуре кипения исходного раствора азотной кислоты во фторопластовом кипятильнике – 86 °С. Дальнейшее повышение температуры не дает положительных результатов, так как на степень десорбции начинают влиять продукты термического разложения азотной кислоты.

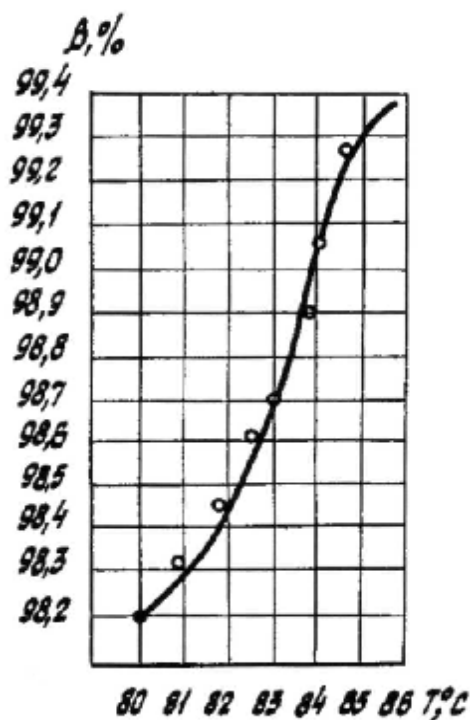


Рис. 4. Зависимость степени десорбции оксидов азота от температуры в зоне кипения исходного раствора азотной кислоты

Зависимость степени десорбции оксидов азота от температуры кипения исходного раствора азотной кислоты аппроксимируется уравнением:

$$b = 85,29 - 1,51 \cdot t + 0,03947 \cdot t^2 - 0,0002355 \cdot t^3$$

Температурный интервал применения приведенного уравнения находится в пределах 80 – 86 °С, а погрешность расчета составляет 0,4 %. Полученная концентрированная азотная кислота соответствует регламентным нормам высшего сорта.

Таким образом, проведенные исследования определили условия оптимизации процесса десорбции оксидов азота из растворов азотной кислоты, что является научной основой для совершенствования аппаратного оформления технологической стадии отбели концентрированной азотной кислоты и интенсификации данного технологического процесса.

Поступила в редколлегию 25.03.10

А.Н. СУЛИМА, канд. техн. наук, **И.А. СУЩЕНКО**, канд. техн. наук,
И.П. ШЕПОТЬКО, **Т.Г. ЯШИНА**, **Т.А. КУРОЧКА**, **М.Ю. ВАСЮК**,
С.П. НЕГОДА, ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОЛОННЫ ДЛЯ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

У статті наведені результати досліджень процесу ректифікації згідно з випарювально-конденсаційним методом у порожній горизонтальній колоні. Визначені конструктивні та технологічні параметри, що впливають на ефективність роботи колони. Показано, що апарати, які працюють згідно з випарювально-конденсаційним методом, перспективні щодо використання їх у разі розділення термонестійких органічних речовин під вакуумом.

В статье приведены результаты исследований процесса ректификации испарительно-конденсационным методом в пустой горизонтальной колонне. Определены конструктивные и технологические параметры, влияющие на эффективность работы колонны. Показано, что аппараты, работающие по испарительно-конденсационному методу перспективны при использовании их в случаях разделения термонестойких органических веществ под вакуумом.

In the article the results of researches of process of rectification are resulted on an evaporated-condensation method in a hollow horizontal column. Structural and technological parameters, influencing on efficiency of work of column, are certain. One can see that apparatus, workings on an evaporated-condensation method perspective for application at the division of thermally not proof of organic matters under a vacuum.

В химической и смежных отраслях промышленности для разделения термонестойких смесей обычно используют роторные пленочные аппараты, обладающие поверхностями испарения и конденсации. В этих аппаратах получают несколько теоретических тарелок на 1 метр высоты аппарата. Роторные аппараты работают при больших окружных скоростях ротора, и основной проблемой надежности работы таких аппаратов является наличие вращающегося ротора с лопатками, требующего большой точности изготовления и сборки. Для вала ротора требуется надежное уплотнение. Изготовление роторных аппаратов дорого обходится потребителю.

Обычные методы перегонки и ректификации требуют нагрева разделяемых смесей до температуры кипения, что практически трудно реализовать для термонестойких и высококипящих смесей при атмосферном давлении. Ограниченная термическая стойкость и недопустимость разложения разде-

ляемых смесей при нагревании в процессе ректификации требует разработки специальных конструкций аппаратов с малым гидравлическим сопротивлением, что обеспечивает возможность ведения процесса в глубоком вакууме.

В настоящей статье приведены результаты исследований процесса разделения смесей с использованием испарительно-конденсационного метода (ИКМ) в горизонтальной полый ректификационной колонне, не имеющей движущихся частей. На основании полученных результатов предложена конструкция горизонтальной ректификационной колонны.

Процесс, протекающий по всей длине колонны, можно рассматривать как последовательное одновременное частичное испарение и частичную конденсацию. При этом изучается влияние силы тяжести падающей с поверхности конденсации капли на поверхность испарения жидкости на образование в колонне поверхности массопередачи. Пар, образовавшийся на поверхности испарения, конденсируется над этой поверхностью и капли с поверхности конденсации вновь падают на ту же поверхность испарения. Конструктивно это оформляется таким образом: верхняя часть колонны охлаждается, а нижняя нагревается. Можно многократно испарять и конденсировать смесь на всем протяжении колонны по типу роторных пленочных аппаратов.

Задачами исследований являлось определение влияния конструктивных и технологических параметров на эффективность работы колонны, работающей по ИКМ, с подводом и отводом тепла. Изучались следующие параметры: величина зазора (расстояния между поверхностями испарения и конденсации) и их типы (трубчатка, полусфера, гладкая, плоская с дополнительными змеевиками). При определении влияния технологических параметров на эффективность работы колонны исследовались: скорость паровой фазы в свободном сечении колонны, соотношение теплот испарения и конденсации, толщины слоя жидкости на поверхности испарения, перемешивания жидкости на поверхности испарения.

С целью получения данных для разработки эффективной конструкции колонны исследовались 8 вариантов аппаратного оформления процесса с вышеприведенными поверхностями испарения и конденсации. В первом варианте была изготовлена колонна прямоугольного сечения. Поверхности испарения и конденсации были выполнены в виде трубочек из параллельно расположенных труб в продольном направлении. Для удобства наблюдений за процессами испарения и конденсации в боковых стенках колонны вставлены смотровые стекла. Технологическая схема экспериментальной установ-

ки приведена на рис. 1.

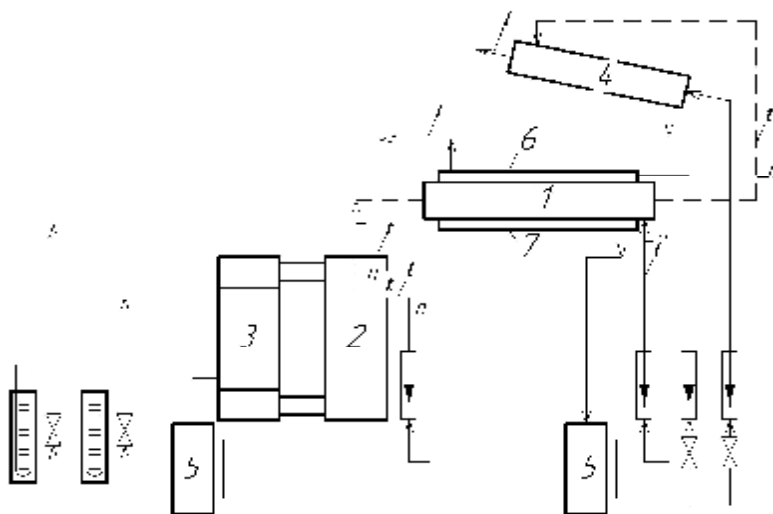


Рис. 1. Технологическая схема экспериментальной установки:
1 – колонна; 2 – куб; 3 – кипятильник; 4 – дефлегматор; 5 – мерник;
6 – поверхность конденсации (конденсатор); 7 – поверхность испарения (испаритель);
t – термометр; n – пробоотборник.

Работа горизонтальной колонны организована по следующей схеме: пар из куба (2) поступает в колонну (1) и попадает на охлаждаемую водой поверхность – конденсатор (6), где происходит частичная конденсация пара. За счет этого происходит обогащение пара низкокипящим компонентом. Проходя через колонну, пар попадает в дефлегматор (4), где конденсируется. Конденсат в виде флегмы полностью возвращается в колонну, т.е. флегмовое число $R = \infty$.

Флегма по колонне движется к кубу навстречу пару, смешиваясь при этом с частью конденсата. Подогреваясь, паром испарителя (7), флегма доводится до кипения и частично испаряется. Получаемый при этом пар более насыщен низкокипящим компонентом, чем сама флегма. Пар, получаемый при испарении, смешивается со стержневым паром. Флегма, пройдя колонну, возвращается в куб (2). Испарение смеси в кубе происходит за счет тепла трубчатого кипятильника (3), обогреваемого паром. Процесс, протекающий по длине колонны, можно рассматривать как последовательное многократное частичное испарение и частичную конденсацию. В результате пар при выходе из колонны обогащается низкокипящим компонентом, жидкость на выходе из колонны обогащается высококипящим компонентом.

В качестве исходной смеси для разделения принята хорошо изученная

смесь этанол - вода с концентрацией спирта от 10 до 60 мол. %.

После выхода на постоянный режим производится отбор проб смеси из пробоотборных устройств в установленных точках. Схема материальных потоков в колонне для легколетучего компонента приведена на рис. 2.

Материальный баланс для потока пара по длине колонны L равен:

$$D_k = D_H + G_n - G_{k0}, \quad (1)$$

где: D_H – количество пара, поступающего из куба в колонну, кг/ч; D_k – количество пара, образовавшегося в колонне, кг/ч; G_n – количество пара, получаемого на греющей поверхности внутри аппарата; y_H – концентрация легколетучего компонента в паре на входе в колонну, % мол; G_k количество конденсата, получаемого с поверхности конденсатора, кг/ч; Φ_k – количество орошения на входе в колонну, кг/ч; Φ_H – количество орошения на выходе из колонны, кг/ч; x_{k0} – концентрация легколетучего компонента в конденсате, мол. %; x_H – концентрация легколетучего компонента в жидкости на входе в колонну, мол. %; D_k – количество пара на выходе из колонны, кг/ч; y_k – концентрация легколетучего компонента в паре на выходе из колонны, мол. %; x_k – концентрация легколетучего компонента в жидкости на выходе из колонны, мол. %.

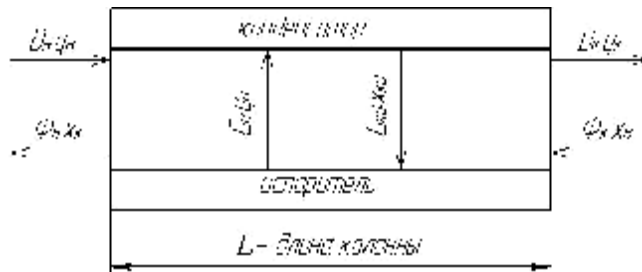


Рис. 2. Схема материальных потоков

Отношение количества пара, сконденсировавшегося на поверхности конденсации $G_{конд}$ к количеству пара, поступающего из куба в колонну D_H называется кратностью конденсации K .

$$K = \frac{G_{конд.}}{D_H}; \quad (2)$$

Отношение количества пара, испарившегося с поверхности испарения $G_{исп.}$ к количеству пара, поступающего из куба D_H называется кратностью испарения:

$$K_{исп.} = \frac{G_{исп.}}{D_H}; \quad (3)$$

Теоретическая мера разделения I_k , достигаемого по длине колонны, определяется:

$$I_k = \frac{a-1}{a+1}(y_k - y_n) + \frac{a}{a^2-1} \ln \frac{y_k(1-y_k)}{y_n(1-y_n)}; \quad (4)$$

где a – относительная летучесть, принимаемая для среднего значения между начальной и конечной концентрацией легколетучего компонента.

Теоретически величины K и I_k должны быть равновелики. Фактически полученное число ступеней разделения оказывается меньшим, и расхождение вычисляется, как $h = \frac{I_k}{K}$. Значение h лежит в пределах между 0 и 1 и представляет собой коэффициент полезного действия всего процесса. Для каждого режима эффективность разделения в колонне оценивалась числом теоретических тарелок на 1 метр длины.

Горизонтальная колонна с поверхностями испарения и конденсации относится к аппаратам, в которых поверхность контакта фаз образуется в свободном объеме. Перенос массы интенсифицируется вследствие образования высокоразвитой быстро обновляющейся поверхности массообмена за счет наличия эффекта дробления капель.

Организация процессов испарения и конденсации на соответствующих поверхностях исключает применение тарелок или насадок. Это способствует движению пара по сечению колонны практически без сопротивления.

Пар, перемещаясь в секции аппарата противотоком к флегме, многократно проходит через зону, где диспергируется жидкость.

Взаимодействие фаз происходит в канале между поверхностями испарения и конденсации.

Непрерывное обновление межфазной поверхности способствует интенсификации работы диффузионных аппаратов, и сводит до минимума эффект продольного перемешивания. Отклонение от поршневого режима течения фаз является следствием осевого рассеивания под влиянием турбулентной диффузии (перемешивания) и молекулярной диффузии.

Одна из основных задач проектирования аппарата – уменьшение размеров оборудования за счет создания большой поверхности контакта фаз. Парожидкостные контактные аппараты можно создать малогабаритными за

счет организации процесса диспергирования одной фазы в виде маленьких капелек или пузырьков, из которых образуется поверхность контакта фаз.

Путем создания условий для развития поверхности контакта фаз можно достичь более эффективной работы аппарата за счет увеличения площади межфазного контакта в единице объема.

Структура парожидкостного слоя в сечении горизонтальной колонны зависит от нагрузки по пару и тепловых нагрузок.

Рабочими параметрами этих поверхностей являются кратности испарения и конденсации.

В таких аппаратах резко улучшается перенос массы за счет высокоразвитой и полностью обновляющейся поверхности, образующейся в свободном объеме между поверхностями испарения и конденсации.

Достоинством горизонтальной колонны является отсутствие пристенного эффекта. Малый уровень жидкости на поверхности испарения исключает обратное перемешивание.

На рабочей площади колонны (поверхность испарения) отсутствуют застойные зоны.

Исследованы 8 вариантов конструкции колонн с различными рабочими поверхностями и расстояниями между ними.

Наибольшая эффективность работы получена при пленочном режиме конденсации и испарения разделяемой смеси, т.е. на колонне, выполненной из трубы и в колонне с полуцилиндрической поверхностью испарения и конденсации (рис. 3 и рис. 4).

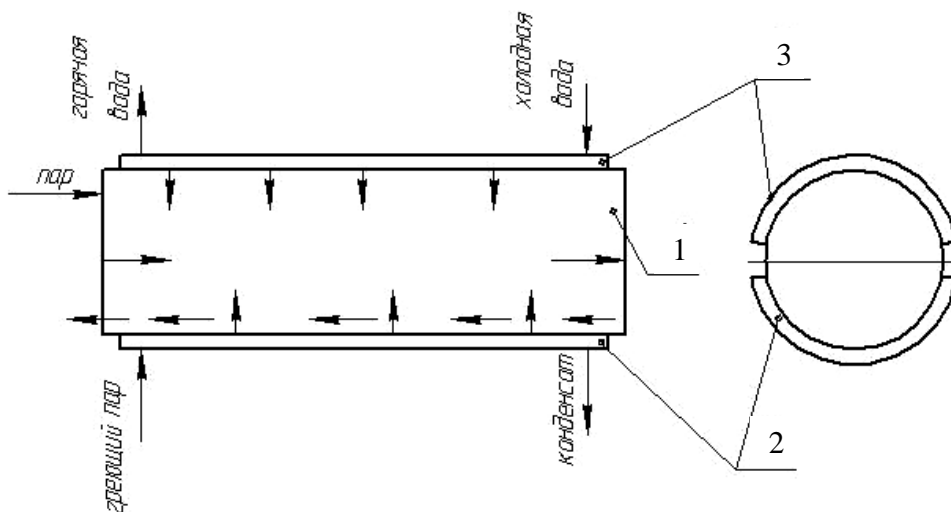


Рис. 3. Схема модели колонны, выполненной из трубы $\varnothing 70$ мм:
1 – труба; 2 – паровая рубашка; 3 – водяная рубашка.

В пересчете на 1 метр рабочей длины колонны получен эффект разделения, равный 5 теоретическим тарелкам (при бесконечном флегмовом числе).

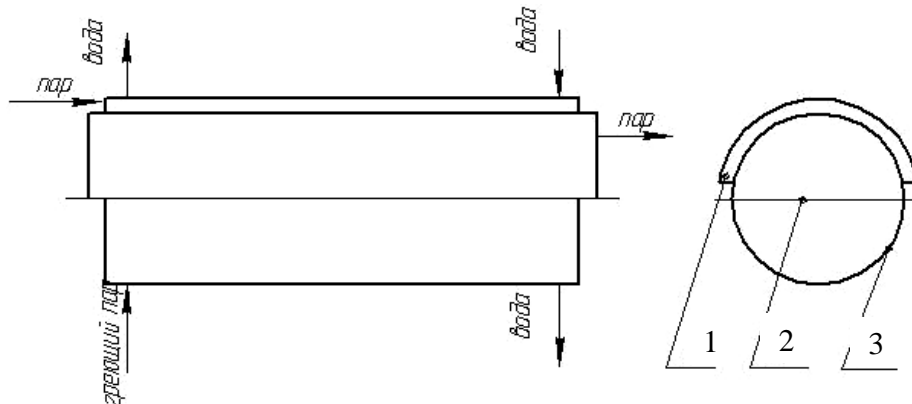


Рис. 4. Схема модели колонны с полуцилиндрической поверхностью конденсации и плоским дном (диаметр трубы 100 мм):
1 – водяная рубашка; 2 – перегородка; 3 – паровая рубашка.

Зависимость числа теоретических тарелок от кратности конденсации в колонне представлен на рис. 5 и рис. 6.



Рис. 5. Зависимость числа теоретических тарелок от кратности конденсации в колонне из трубы $\varnothing 70$ мм

На графиках (рис. 7) приведены результаты разделения смеси этанол-вода в колонне длиной 0,8 м.

Результаты исследований подтвердили возможность применения ИКМ

для разделения жидких смесей в горизонтальной безнасадочной колонне в вакуумных процессах ректификации термонестойких органических веществ.

Получены необходимые данные для разработки технической документации на такие аппараты.

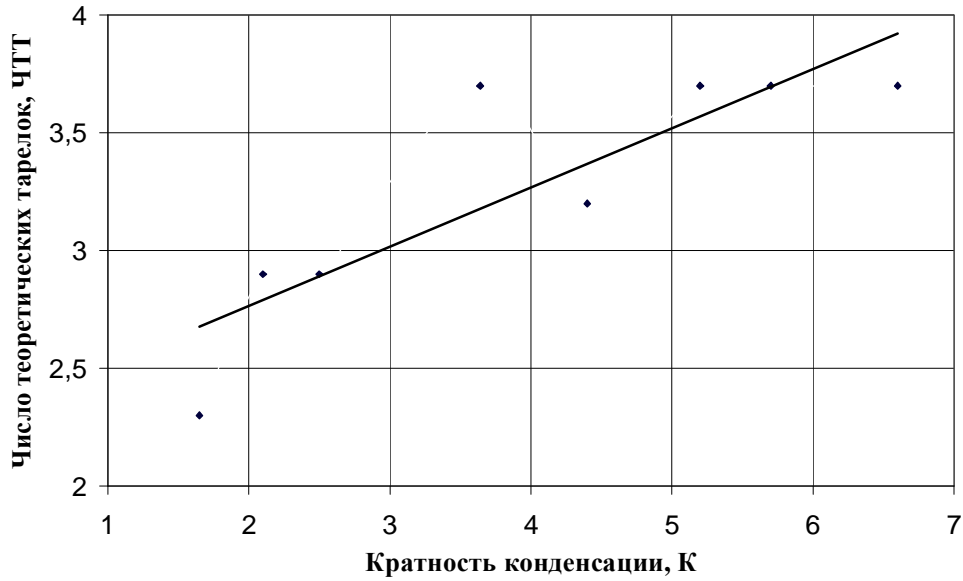


Рис. 6. Зависимость числа теоретических тарелок от кратности конденсации в колонне с плоским дном и полуцилиндром

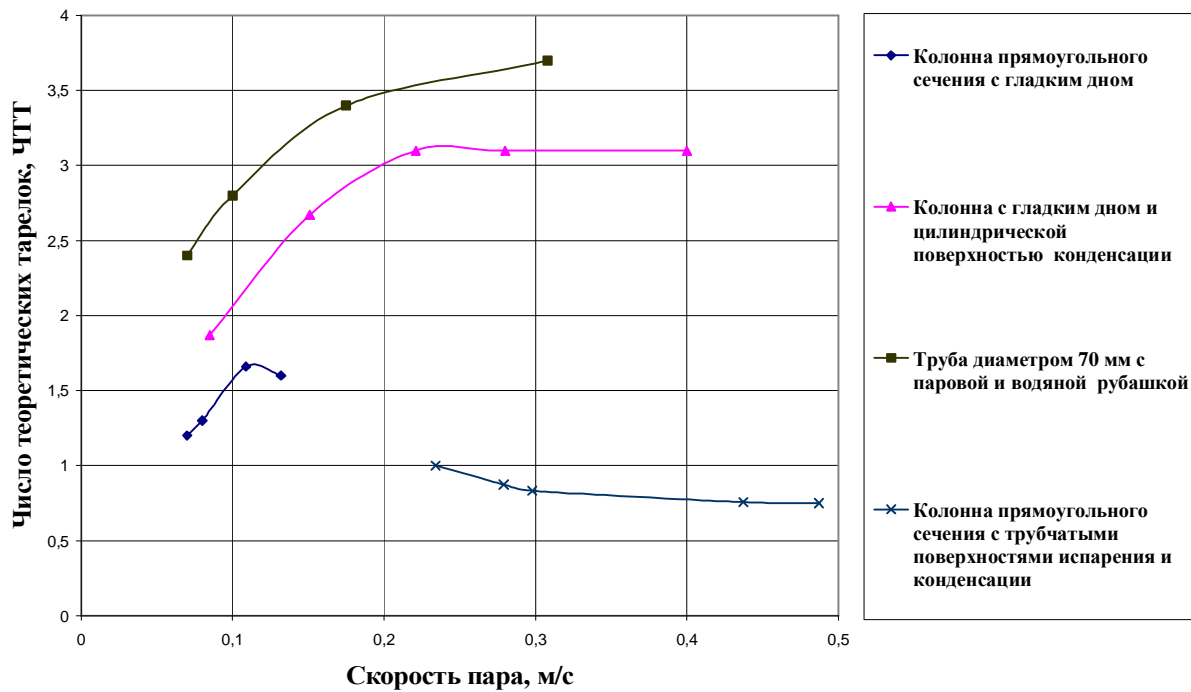


Рис. 7. Зависимость числа теоретических тарелок от скорости пара

Применение таких колонн, например, целесообразно в производстве синтетических жирных кислот вместо дистилляционных кубов.

При дистилляции происходит термическое разложение продукта, в результате чего образуются примеси, идущие в отходы.

Накопление примесей ведет к снижению качества готового продукта.

Применение горизонтальных колонн, работающих по ИКМ, дает возможность снизить потери продукта при дистилляции в кубах примерно на 90 %.

При изготовлении на заводе колонны горизонтального типа ее стоимость будет меньше, чем роторного аппарата при равной производительности.

Колонна проще в изготовлении, т.к. отсутствуют вращающийся элемент – ротор, уплотнение вала.

Поэтому горизонтальные колонны предпочтительнее для вакуумных процессов, чем роторные аппараты.

Список литературы: 1. Шервуд Т. Массопередача / Т. Шервуд, Р. Пигфорд, Ч. Уилки; пер. с англ. Н.Н. Кулова. – М.: Химия, 1982. – 696 с. 2. Кафаров В.В. Основы массопередачи / В.В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1962. – 655 с. 3. Молоканов Ю.К. Разделение смесей кремнийорганических соединений / Ю.К. Молоканов. – М.: Химия, 1974. – 295 с. 4. Марченко А.Н. Теплопередача в роторных пленочных аппаратах / А.Н. Марченко // Химическое, нефтеперерабатывающее и целлюлозно-бумажное машиностроение. – 1966. – №9. – С.12.

Поступила в редколлегию 25.03.10

В.Н. КОЛОМИЕЦ, канд. техн. наук, **Ю.Б. ДАНИЛОВ**, докт. техн. наук,
А.Н. СУЛИМА, канд. техн. наук, **М.А. ХАРЧЕНКО**, канд. техн. наук,
ОАО «УкрНИИХиммаш», г. Харьков, Украина

ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СТАДИИ СТАБИЛИЗАЦИИ СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОСОБО ЧИСТОЙ РЕАКТИВНОЙ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ

У роботі досліджені і описані переваги установки стабілізації сировини для особливо чистої азотної кислоти на базі фторопластових тепломасообмінних апаратів. Наведені математичні залежності, що дозволяють прогнозувати проведення процесу стабілізації сировини і його оптимальних умов залежно від факторів технологічного режиму. Доведена можливість одержання сировини, яка забезпечить високу якість особливо чистої азотної кислоти.

В работе исследованы и описаны преимущества установки стабилизации сырья для особо чистой азотной кислоты на базе фторопластовых теплообменных аппаратов. Приведены математические зависимости, позволяющие прогнозировать проведение процесса стабилизации сырья и его оптимальных условий в зависимости от факторов технологического режима. Доказана возможность получения сырья, которая обеспечит высокое качество особо чистой азотной кислоты.

Benefits of raw materials stabilization plant for the specially clean nitric acid on the basis of fluoroplastic heat-exchange apparatus were investigated and described in scope of the work. Mathematical dependencies are provided, that allow to predict implementation of raw materials stabilization process and its optimal conditions, depending on technological mode factors. An ability to get raw materials was proved, that would assure high quality of specially clean nitric acid.

Концентрированная азотная кислота, получаемая методом прямого синтеза, наиболее подходит в качестве сырья для получения азотной кислоты особой чистоты. Она содержит сравнительно низкое количество примесей. Концентрированная азотная кислота перед переработкой ее в азотную кислоту особой чистоты подвергается процессу стабилизации, во время которого содержание примесей в исходной кислоте доводится до значений, регламентированных техническими требованиями.

В основу процесса очистки азотной кислоты положен процесс уменьшения концентрации микропримеси, осуществляемый многократным проведением операции на установке стабилизации сырья. В состав традиционных установок стабилизации сырья входят промывочные колонны с внутренними

кварцевыми теплообменными устройствами и кварцевые конденсаторы. Опыт эксплуатации таких установок выявил их низкую работоспособность, которая заключается в создании недостаточного контакта жидкой и паровой фаз и неполном удалении примесей, содержащихся в парах азотной кислоты. К тому же, оборудование из кварцевого стекла требует повышенного внимания при его эксплуатации.

При решении вопросов усовершенствования установки стабилизации сырья было принято создать фторопластовую промывную колонну, в которой внутренние теплообменные устройства из кварцевого стекла заменены на встроенные дефлегматоры из фторопластовых трубок площадью поверхности теплообмена 2.5 м^2 и фторопластовые ситчатые тарелки.

Это позволило обеспечить многократный контакт жидкой и паровой фаз благодаря образованию развитого пенного слоя, а также возможность управлять образованием флегмы.

Пять кварцевых конденсаторов, входящих в состав установки стабилизации, было решено заменить на три кожухотрубчатых конденсатора из фторопласта с площадью поверхности теплообмена $6,3 \text{ м}^2$ каждый. Это дало возможность стабилизировать работу всей системы конденсации и обеспечить резерв для увеличения производительности промывочной колонны.

Процесс очистки сырья для азотной кислоты особой чистоты в усовершенствованной установке стабилизации сырья осуществляется методом уменьшения концентрации микропримеси при многократном проведении этой операции на разделительном элементе, состоящем из фторопластового дефлегматора, и фторопластовой ситчатой тарелке.

Результаты анализа опытных данных показывают, что процесс стабилизации азотной кислоты в каждом разделительном элементе сводился к перераспределению азотной кислоты и примеси между жидкой и паровой фазами системы. Процесс происходит при постепенном переходе примесей из паровой фазы в жидкую. При равенстве количества примеси в жидкой и паровой фазах наступает равновесие процесса.

Затем на последующем разделительном элементе происходит повторение процесса, но каждый раз при новом значении исходного процентного содержания примеси.

Проходя каскад таких разделительных элементов, пар азотной кислоты освобождается от примесей, они концентрируются в жидкой фазе, которая далее отводится из промывочной колонны.

Для контроля качества очистки азотной кислоты на установке стабилизации сырья принят коэффициент очистки (КО), который показывает, в какой фазе концентрация примесей наибольшая при определенной концентрации азотной кислоты.

Коэффициент очистки определяется как отношение процентного содержания примесей к азотной кислоте в сырье после конденсаторов к процентному содержанию примесей к азотной кислоте в конденсате после промывочной колонны.

Процент примесей рассчитывается только по отношению к азотной кислоте.

При значениях $КО > 1$ содержание примесей в конденсате после фторопластовых конденсаторов больше, чем в растворе азотной кислоты, отводимой из промывочной колонны.

Если $КО = 1$, то количество примесей в азотной кислоте будет одинаково на выходе из промывочной колонны и на выходе из фторопластовых конденсаторов.

Если $КО < 1$, примеси концентрируются преимущественно в растворе азотной кислоты на выходе из промывочной колонны и содержатся в незначительном количестве в конденсате азотной кислоты после фторопластовых конденсаторов.

С увеличением концентрации азотной кислоты значение коэффициента очистки для различных примесей понижается.

Такая зависимость коэффициента очистки для некоторых примесей (Fe, Al, Zn, Cd) приведена на рис. 1.

Поэтому в качестве сырья для азотной кислоты особой чистоты целесообразно применять азотную кислоту высокой концентрации.

Полезность знания коэффициента очистки заключается в том, что он определяет, в какой точке колонны наибольшая концентрация соответствующей примеси. Это позволяет вести процесс так, чтобы поддерживать такое состояние как можно дольше на нижних тарелках промывочной колонны.

Большое значение для эффективного проведения процесса стабилизации сырья имеет температурный режим данного процесса.

Отмывку примесей в промывочной колонне необходимо проводить при минимальной потере тепла с флегмой, сохраняя температуру паров на выходе из промывочной колонны в пределах $80 - 82$ °С, чтобы при этой температуре пары поступали на конденсацию во фторопластовые конденсаторы.

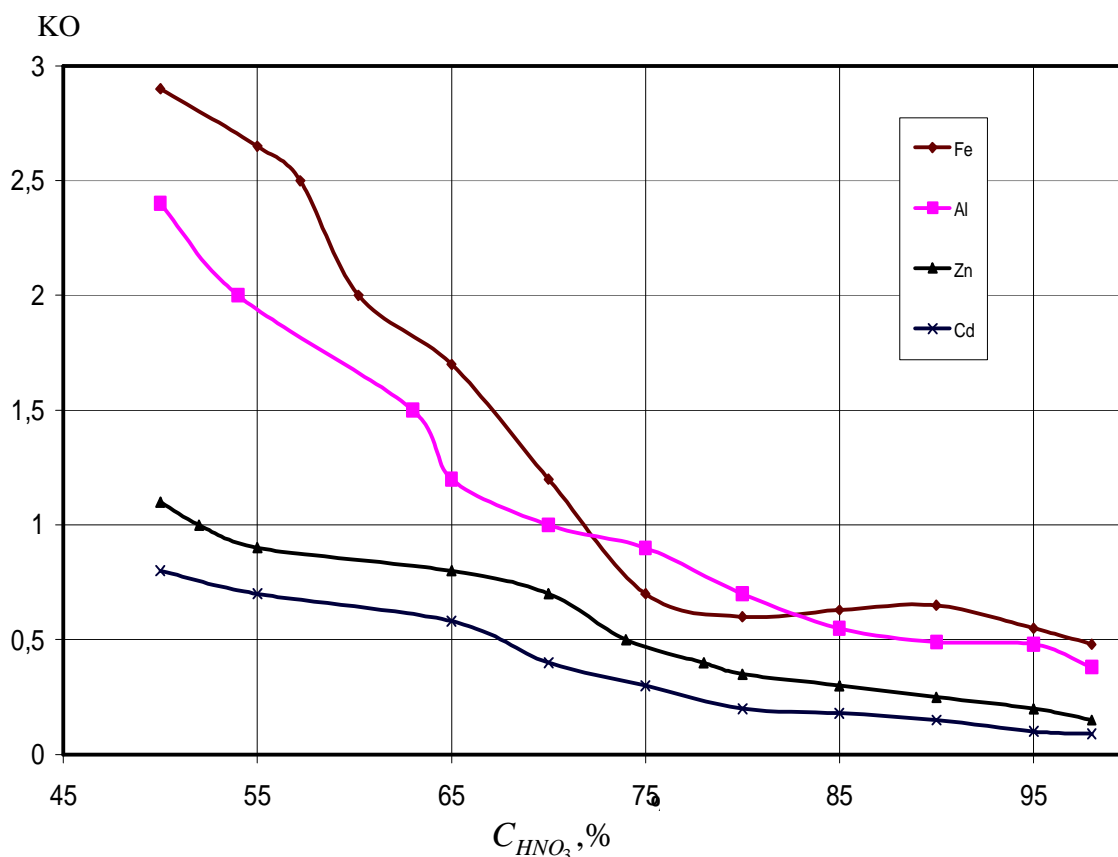


Рис. 1. Зависимость КО для некоторых примесей

Исследования показали, что повышение температуры паров азотной кислоты соответствует понижению в них оксидов азота. Если паровая фаза, состоящая из паров азотной кислоты и оксидов азота, подвергается частичной конденсации, то относительное количество азотной кислоты повышается в образующейся жидкой фазе и понижается в паровой фазе. Продолжая этот процесс, можно довести состав паровой фазы до момента, когда в ней будут содержаться только оксиды азота. Зависимость содержания оксидов азота в конденсате от температуры паров азотной кислоты, поступающих на конденсацию, и температуры хладагента отображена на рис. 2.

Зависимость содержания оксидов азота в конденсате азотной кислоты (сырье для особо чистой азотной кислоты) от температуры паров азотной кислоты, поступающих на конденсацию, выражается прямой линией 1, которая описывается уравнением:

$$C_{NO_2} = 7,43 - 0,0087 t_n,$$

где t_n – температура паров азотной кислоты.

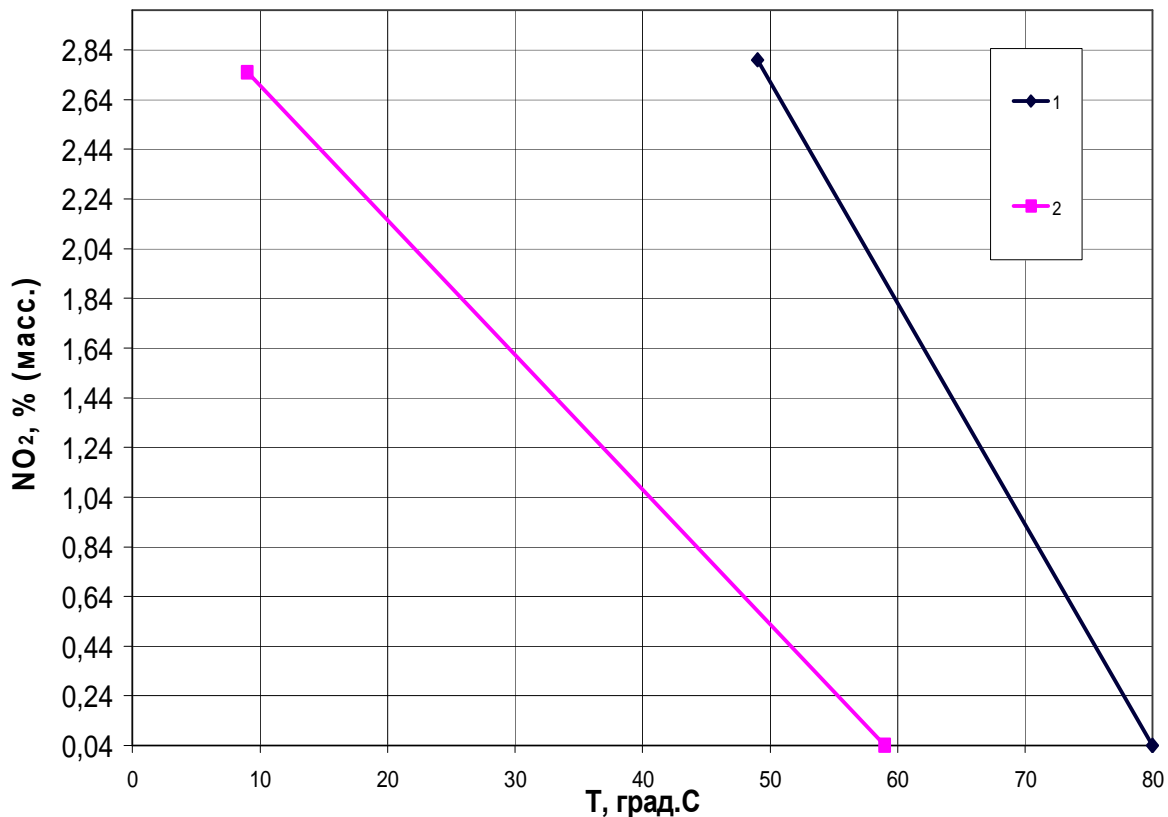


Рис. 2. Зависимость содержания оксидов азота в конденсате от температуры паров азотной кислоты, поступающих на конденсацию, и температуры хладагента

Влияние примененного в работе установки стабилизации сырья горячего цикла охлаждения паров азотной кислоты во фторопластовых конденсаторах на содержание оксидов азота в конденсате азотной кислоты наглядно выражено прямой линией 2, которая описывается уравнением:

$$C_{NO_2} = 3,18 - 0,048 t_x,$$

где t_x – температура хладагента.

Наименьшее содержание оксидов азота имеет азотная кислота, полученная при конденсации паров концентрированной азотной кислоты, поступающих во фторопластовые конденсаторы при температуре 80 – 85 °С и температуре хладагента на входе в конденсаторы 50 – 60 °С.

Применение усовершенствованной технологической схемы установки стабилизации сырья для получения особо чистой азотной кислоты на основе

фторопластовых тепло- и массообменных аппаратов, а также новых технических и технологических решений, уникально стойкого к воздействиям любых коррозионноактивных сред фторопластового материала существенно улучшит качество особо чистой азотной кислоты.

Полученные математические зависимости обеспечивают возможность прогнозировать процесс стабилизации сырья для получения особо чистой азотной кислоты и проводить его в рамках оптимальных показателей технологического режима.

Поступила в редколлегию 25.03.10

УДК 66.045.1:661.48:662.749.2

Ю.Б. ДАНИЛОВ, докт. техн. наук, **В.Н. КОЛОМИЕЦ**, канд. техн. наук, ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина

ОБОРУДОВАНИЕ ИЗ ФТОРОПЛАСТА ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ И НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

У роботі приведені розробки обладнання із фторопластових матеріалів, виконані в ВАТ «УкрНДІ-хіммаш». Таке обладнання завдяки унікальній хімічній стійкості фторопласту цінне для виробництв корозійно активних та особливо чистих речовин. Наведені приклади його застосування та переваги по відношенню до традиційного устаткування з металу та вплив на поліпшення умов проведення технологічних процесів.

В работе приведены разработки оборудования из фторопластовых материалов, выполненные в ОАО «УкрНИИхиммаш». Такое оборудование благодаря уникальной химической стойкости фторопласта ценное для производств коррозионно активных и особо чистых веществ. Приведены примеры его применения и преимущества по отношению к традиционному оборудованию из металла и воздействие на усовершенствование условий осуществления технологических процессов.

The paper presents the development of equipment from fluoroplastic materials, made in ОАО «УкрНИИхиммаш». Such equipment thanks to its unique chemical resistance of Teflon valuable for the production of corrosion-active and very pure substances. Examples of its application and advantages relative to traditional equipment, metal and the impact on the improvement of conditions of technological processes.

В процессе развития промышленности постоянно возникает необходимость в создании и организации промышленного выпуска теплообменной

аппаратуры с высокой коррозионной стойкостью, способной конкурировать по работоспособности с аппаратами из нержавеющей стали и других дефицитных дорогостоящих материалов. Это особенно важно при оснащении технологических линий вновь разрабатываемых или реконструируемых производств, где серийно поставляемая теплообменная аппаратура не удовлетворяет новым требованиям технологии, а также в тех случаях, когда срок службы ее недостаточен.

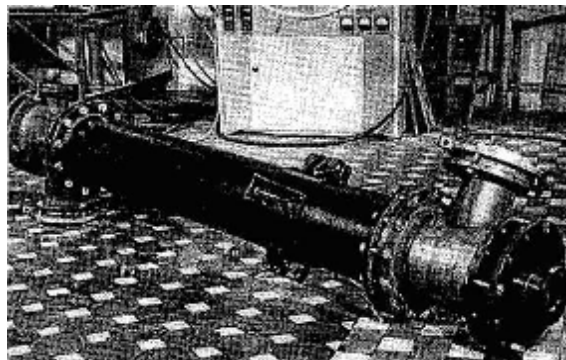
ОАО «УкрНИИхиммаш» является «пионером» и до сих пор остается лидирующей организацией в странах СНГ по разработке фторопластовых теплообменных аппаратов. На протяжении десятилетий в УкрНИИхиммаш поступают запросы о возможности создания теплообменной аппаратуры из фторопласта для производств с особо агрессивными средами, такими как минеральные кислоты (серная, соляная, азотная, фтористоводородная), сильные окислители или смеси органических продуктов с кислотами. Анализ этих запросов показывает, что во многих производствах, в которых теплообменная аппаратура является узким местом в технологических линиях, используемое оборудование, в основном из высоколегированных сталей и сплавов, имеет недостаточный срок службы, низкую эксплуатационную надежность. Решения этой проблемы возможно благодаря фторопластовым теплообменным аппаратам. Универсальная химическая стойкость фторопласта позволяет использовать эти теплообменники для теплообмена в высоко агрессивных средах и в особо чистых веществах.

Материал теплообменника не оказывает каталитического влияния на кинетику химических процессов. Гидрофобные свойства фторопласта способствуют исключению зарастания рабочих поверхностей теплообмена, что обеспечивает неизменность коэффициента теплопередачи на весь период эксплуатации аппарата, а также уменьшению гидравлического сопротивления.

Разработанные и изготавливаемые ОАО «УкрНИИхиммаш» фторопластовые теплообменные аппараты по конструкции могут быть погружными и кожухотрубчатыми. Основная рабочая часть теплообменного аппарата - теплообменный элемент, состоящий из пучка гибких фторопластовых труб внутренним диаметром 3 – 5 мм. Количество и длина труб определяется необходимой площадью поверхности теплообмена. Концы труб сварены во фторопластовую трубную решетку, образуя, таким образом, коллектора для подвода и отвода рабочей среды или теплоносителя в теплообменник. Меж-

трубное пространство образуется переплетением трубок или установкой промежуточных дистанционных решеток.

На рис. 1 представлен кожухотрубчатый фторопластовый теплообменный аппарат для одной агрессивной среды.



Общий вид



Трубный пучок

Рис. 1. Кожухотрубчатый фторопластовый холодильник

Площадь поверхности теплообмена таких аппаратов 20 и 32 м².

Агрессивная среда или особо чистая среда подается в трубное пространство, теплоноситель в межтрубное.

Нашли широкое применение в качестве холодильника на предприятиях по получению и переработке минеральных кислот.

Кожухотрубчатый фторопластовый теплообменник для двух агрессивных сред представлен на рис. 2.

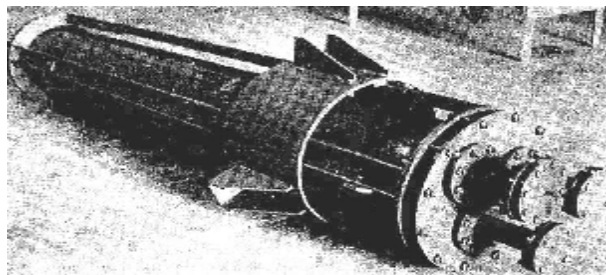


Рис. 2. Кожухотрубчатый фторопластовый конденсатор

Площадь поверхности теплообмена таких аппаратов составляет 6,3; 20; 32; 40 м².

Такие теплообменные аппараты нашли широкое применение для охлаждения и конденсации парогазовых коррозионно-активных и особо чистых сред.

Корпус аппарата футерован фторопластом - 4.

Такой вид аппарата хорошо зарекомендовал себя при охлаждении парогазовой смеси дибромдихлорвинил-фосфата, конденсации паров азотной кислоты, монохлоруксусной кислоты и др.

Процессы конденсации занимают важное место в технологии многих химических и нефтехимических производств.

В конденсаторе, который является первичным аппаратом по переработке парогазовой смеси, поступающей из реактора или колонны, выделяется один или несколько компонентов в виде жидкой составляющей, остальные компоненты направляются на дальнейшую переработку в последующих стадиях производства. Таким образом, конденсатор по прямому назначению выполняет сугубо теплотехническую задачу – отвод тепла.

Одновременно с этим в конденсаторе изменяется фазовый состав смеси в соответствии с заданными теплотехническими условиями, т.е. при необходимости процесс конденсации может осуществляться как изотермический процесс теплообмена.

Образно говоря, конденсатор способен выполнять функции, дополняющие или направляющие основной технологический процесс.

В различных отраслях промышленности широко распространены поверхностные конденсаторы, в которых тепло отнимается от конденсирующегося парогазового потока через стенку.

В таких конденсаторах пар конденсируется на внешних или внутренних поверхностях труб, омываемых с другой стороны хладоносителем.

В качестве поверхностных конденсаторов могут быть использованы теплообменники различных типов, но наиболее широко применяются трубчатые и оросительные холодильники – конденсаторы. Такие конденсаторы изготавливаются из самых различных материалов.

Выбор материала диктуется в основном его коррозионной стойкостью и теплопроводностью.

В качестве недостатков поверхностных конденсаторов из металла следует отнести их большую металлоёмкость, они требуют большого расхода

хладоагента. Последнее объясняется тем, что на стенках теплопередающих труб образуется слой накипи, который оказывает добавочное термическое сопротивление, вследствие чего существенно снижается коэффициент теплоотдачи. Снижению величины коэффициента теплоотдачи также способствует пленочный режим конденсации. Они имеют малый срок службы, особенно в коррозионно-активных средах.

Разработанные ОАО «УкрНИИХиммаш» трубчатые конденсаторы из фторопластовых материалов целесообразно применять в тех случаях, когда исходная парогазовая смесь, обладая высокой коррозионной активностью, содержит в своём составе инертные не конденсирующиеся примеси или необходимо обеспечить высокую чистоту перерабатываемых и получаемых веществ.

Опыт эксплуатации фторопластовых конденсаторов показал, что коэффициент теплоотдачи от парогазовой смеси в большой степени зависит от величины содержания неконденсирующихся составляющих, которая в этих случаях является определяющей.

В связи с этим конденсаторы из фторопластовых материалов с низким коэффициентом теплопроводности фторопластовых материалов имеют сопоставимые величины теплового потока в сравнении с металлическими.

Благодаря гидрофобным свойствам фторопласта на поверхности теплообмена происходит процесс капельной конденсации.

Опыт эксплуатации фторопластовых конденсаторов показывает, что в данных аппаратах коэффициент теплоотдачи выше, чем у фторопластовой теплообменной аппаратуры, применяемой в качестве нагревателей и холодильников. Это объясняется тем, что сконденсированный конденсат стекает по поверхности теплообмена не в виде пленки конденсата, а в виде отдельных капель.

Капли занимают лишь определенную часть поверхности конденсации, а на остальной поверхности процесс теплоотдачи определяется только термическим сопротивлением мономолекулярного граничного слоя жидкости, в котором образуются зародыши капель и термическим сопротивлением толщины стенок фторопластовых трубок на участках, не смоченных жидкостью.

Механизм процесса капельной конденсации можно представить рис. 3.

В результате конденсации пара 2 на холодной поверхности фторопластовых трубок 4 образуется пересыщенный граничный слой сконденсированной жидкости 3 и капли жидкости 1.

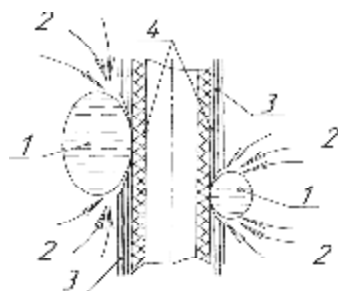


Рис. 3. Процесс капельной конденсации:
 1 – капля; 2 – конденсация пара; 3 – пересыщенный слой;
 4 – холодная стенка фторопластовой трубы

Из пересыщенного граничного слоя 3 в каплю 1 непрерывно поступает жидкость. Капля 1 постепенно растет, соединяется с другими и скатывается вниз по вертикальной теплопередающей поверхности фторопластовой трубы 4 как только её вес превысит действующую на неё силу адгезии. На месте скатившейся капли образуются новые капли.

Рассматривая процесс конденсации на поверхности фторопластовых труб экспериментального стенда, можно определить, что капли конденсата, занимают примерно 40 – 50 % площади поверхности конденсации.

Остальная площадь представляет собой хаотично меняющие друг друга области тонко стекающей пленки жидкости, в которой образуются капли и области вообще не смоченной поверхности теплообменных фторопластовых труб.

Такая картина объясняет высокие значения коэффициентов теплоотдачи при капельной конденсации.

Их значения выше на 30 – 40 % для фторопластовой теплообменной поверхности по сравнению с величинами коэффициента теплоотдачи при пленочной конденсации.

При обработке экспериментальных данных процесса капельной конденсации, а также в результате анализа данных эксплуатации фторопластовых конденсаторов в промышленных условиях выявлено, что с увеличением скорости парогазового потока происходит уменьшение величины значений коэффициента теплоотдачи.

Такое обстоятельство выявило необходимость выполнить корректировку конструктивных размеров фторопластовых конденсаторов.

Наиболее оптимальные величины технической характеристики фторопластовых конденсаторов, разработанных ОАО «УкрНИИхиммаш», приведены в таблице.

Техническая характеристика фторопластовых конденсаторов

Площадь поверхности теплообмена, м ²	Высота трубного пучка из фторопластовых труб (поверхность конденсации), мм	Эквивалентный диаметр межтрубного пространства, м
6,3	1750	0,066
20,0	1940	0,042
32,0	2780	0,042
40,0	2940	0,042

На основании анализа экспериментальных и промышленных данных эксплуатации фторопластовых конденсаторов можно сделать следующие выводы:

1. Исключительно гладкая и несмачиваемая жидкой средой теплообменная поверхность фторопластовых труб обеспечивает проведение процесса конденсации парогазового потока в режиме капельной конденсации.

2. Процессы капельной конденсации характеризуются высокими значениями коэффициентов теплоотдачи, что обеспечивает значительное снижение энергетических затрат.

3. Универсальная химическая стойкость фторопласта в коррозионно-активных средах при температурах до +200°С обеспечивает эксплуатацию фторопластовых конденсаторов до десяти и более лет.

Процессы обработки газов и жидкостей лежат в основе многих технологических операций химической, нефтяной, газовой и ряда других отраслей народного хозяйства.

Большинство этих процессов может проводиться в интенсивно работающих пенных аппаратах.

В последнее время четко определилось направление, связанное с проведением массообменных и тепловых процессов при небольших скоростях потоков газов и жидкостей, что и осуществляется в аппаратах, работающих в турбулентном пенном режиме.

К таким процессам относятся процессы абсорбции газовых компонентов жидкостями и десорбции газов из жидкой фазы, испарения и конденсации жидкостей (перегонка), ректификация, охлаждение и нагрев газов или жидкостей путем теплообмена между фазами, очистки газов от пыли, тумана, вредных газовых компонентов.

ОАО «УкрНИИхиммаш» разработал и освоил изготовление фторопластовых теплообменных аппаратов погружного типа площадью поверхности

теплообмена 6,3, 10, 32, 63 м² (рис. 4).

Предназначены они для нагрева, охлаждения и конденсации коррозионно-активных и особо чистых сред, могут быть установлены в аппаратах, емкостях открытого типа.



Рис. 4. Фторопластовый теплообменник погружного типа

Обладают свойством совмещать процессы тепломассообмена и сепарации, что позволяет широко использовать их в колонном оборудовании в качестве встроенных дефлегматоров, газовых холодильников, конденсаторов, сепараторов, контактных тепломассообменных устройств с развитой поверхностью контакта фаз.

Такой аппарат состоит из объёмных дисков, образованных переплетением между собой теплообменных трубок, концы которых собраны и сварены в две трубные решетки.

В зоне расположения теплообменных трубок под воздействием жидкой и парогазовой фаз образуется развитый пенный слой контакта рабочих фаз, что способствует интенсификации процессов теплообмена, массообмена и сепарации.

Аппарат обеспечивает проведение процессов, например, абсорбции в изотермическом режиме, отвод избытка жидкой фазы из области контакта фаз, а также уменьшает до минимума брызгоунос из колонного аппарата.

Эксплуатация таких аппаратов в качестве контактных тепло-массообменных устройств в промышленных колоннах производства минеральных кислот в качестве дефлегматоров, газовых холодильников, массообменных тарелок подтверждает их высокую эффективность и работоспособность.

Так применение таких аппаратов для охлаждения абгазов ректификационных колонн позволило уменьшить содержание продукционных веществ в газовом потоке на 50 – 80 % и снизить температуру газа.

Такие устройства, установленные на ситчатых тарелках колонных аппаратов в качестве мобильной насадки с развитой пенообразующей поверхностью, обеспечивают значительную интенсификацию процесса абсорбции.

Их применение в отбелочных колоннах производства концентрирования азотной кислоты прямым методом позволило значительно оптимизировать процесс десорбции оксидов азота.

За счет стабильного поддержания оптимальной температуры паров на выходе из отбелочной колонны в интервале 34 – 39 °С содержание оксидов азота в парах увеличилось до 98 – 98,9 масс. %, а содержание азотной кислоты снизилось до 1 – 2 масс. %.

Таким образом, было достигнуто получение концентрированной азотной кислоты высшего качества.

Отсепарированная жидкая фаза контактным тепло-массообменным устройством возвращаясь из газового потока (брызгоунос) обеспечивает повышение выхода готового продукта на 7 – 10 %. Аналогичные показатели получены при применении контактного тепло-массообменного устройства в колоннах концентрирования азотной кислоты нитрат-магниевым методом.

Теплообменный аппарат данного типа находит свое применение и в нефтеперерабатывающей промышленности, например, в колонне разложения сульфит – бисульфита натрия серной кислотой установки мокрого катализа на ОАО «Новокуйбышевский НПЗ».

Технологический проект колонны разложения сульфит – бисульфита натрия разработан ОАО «УкрНИИхиммаш» по заданию ООО «Гипрохим», г. Москва.

Рассматриваемый фторопластовый теплообменный аппарат используется в колонне разложения в качестве конденсатора.

На предприятиях аналогичных ОАО «Новокуйбышевский НПЗ» образуются большие количества низкосортного сульфата натрия, а именно сульфит – бисульфита натрия, который после соответствующей переработки в качественный сульфат натрия имеет большое практическое значение. Он используется в производстве синтетических моющих средств, стекла, соды, технических сортов бумаги, «крафт»-целлюлозы и глауберовой соли, которая применяется в лечебных целях.

Процесс переработки некачественного сульфата натрия в качественный осуществляется в колонне разложения, оснащенной фторопластовым конденсатором. Введение колонны разложения в эксплуатацию намечено в 2010г.

Ярким примером преимущества оборудования из фторопласта является разработанный и поставленный на производство ОАО «УкрНИИхиммаш» реактор получения диэтилового эфира для эфирных производств. В эфиризаторе нового поколения в качестве конструкционных материалов полностью использованы фторопластовые материалы.

Углеродистый корпус типового эфиризатора защищен от коррозии гомотенным освинцеванием (свинец 99, 98 %), а змеевик для создания рабочей температуры в эфиризаторе от 70 до 140 °С изготовлен из свинцовой трубы Ø 30 мм с толщиной стенки 8 – 9 мм.

Срок службы свинцового покрытия толщиной 10 мм корпуса эфиризатора составляет 6 – 8 месяцев, а свинцового змеевика 2 – 4 месяца.

Трубный пучок фторопластового теплообменного аппарата, выполненный в виде объемного цилиндра, обеспечивает поддержание необходимой температуры равномерно в любой точке нагреваемой среды. Кроме того, такая поверхность теплообмена одновременно используется в качестве развитой поверхности массообмена, то есть насадки. Такая насадка, обладая развитой удельной поверхностью порядка 100 м²/ м³, имеет свободный объем 80 % в силу чего образуется эффективная поверхность фазового контакта серной кислоты и паров этилового спирта.

Такое сочетание теплообменника и насадки в одном аппарате способствует улучшению эффективности реакции этерификации эфира за счет полноты проводимой реакции в реакторе – эфиризаторе.

Кроме того, принятые при разработке новые конструктивные и технологические решения обеспечивают высокое качество эфира в процессе эксплуатации промышленного эфиризатора из фторопластовых материалов уже в течение более семи лет.

Кроме выше перечисленного оборудования ОАО «УкрНИИхиммаш» разработал и изготавливает фторопластовые теплообменные аппараты площадью поверхности теплообмена от 1.0 до 25 м² для гальванических производств.

Анализ промышленных предприятий показывает, что во многих случаях, особенно в производствах большой химии, требуется более производи-

тельные теплообменники площадью поверхности теплообмена 100 м^2 и выше.

Эта необходимость способствовала началу разработки нового типа теплообменников из фторопласта – оросительных конструкций.

Такая конструкция теплообменных аппаратов выбрана вследствие того, что данный тип теплообменной аппаратуры имеет широкое применение в химической и нефтехимической промышленности из-за упрощенной конструкции, удобство изготовления и эксплуатации, сравнительно легкое достижение необходимой теплопроизводительности, экономного расхода воды.

При этом преследуется цель уменьшить или устранить полностью недостатки присущие подобным конструкциям из металла.

Удельная поверхность в оросительных теплообменниках из фторопласта может составлять $100 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и более.

Тогда как в традиционных чугунных она составляет $7 - 10 \text{ м}^2/\text{м}^3$, а это значит, что на порядок увеличивается количество воды на единицу объема теплообменного пучка при тех же плотностях орошения.

То есть трубный пучок из фторопластовых трубок находится в плотной водяной рубашке, что способствует эффективному теплообмену.

Используя блочно-модульный принцип можно легко варьировать его возможности, добиваясь наиболее эффективной работы теплообменника в конкретных условиях, увеличивая его мощность добавлением блоков развивая площадь поверхности теплообмена до 500 м^2 и более.

Эффективная работа оросительного теплообменника из фторопластовых трубок малого диаметра возможна при значительно меньших плотностях его орошения, что выгодно с энергетической точки зрения.

Антиадгезионные свойства фторопластовой теплообменной поверхности исключают образование загрязнений и всякого рода отложений на поверхности теплообменных труб, за счет чего обеспечивается постоянство теплопередачи в процессе эксплуатации.

Обслуживание сводится к эпизодическому промыванию трубных пучков струей воды без разборки и остановки аппарата.

Высокая стойкость фторопласта в коррозионных средах сводит к минимуму возможность выхода трубок из строя.

Вследствие этого сокращаются потери кислоты при авариях и неизмеримо уменьшается степень закисления водооборотного контура и затраты на восстановление качества оборотной воды.

Заслуживает внимание разработанный ОАО «УкрНИИхиммаш» по заказу ОАО «Славнефть-Ярославнефтеоргсинтез» каплеотбойник из фторопластовых материалов для конденсатора WSA на установке «Производство серной кислоты и регенерация отработанной серной кислоты».

Каплеотбойник представляет собой прямоугольный корпус, объем которого заполнен каплеотбойным элементом в виде объемного пористого блока (рис. 5).



Рис. 5. Каплеотбойник фторопластовый

Эффективность работы каплеотбойника по сепарации капель жидкости из отходящего газожидкостного потока обеспечивается необходимой плотностью объемного пористого каплеотбойного элемента и разностью площадей сечения проема в опорной и защитной рамках корпуса каплеотбойника.

Сепарация капель жидкости из газожидкостного потока при его прохождении через каплеотбойник, осуществляется за счет удара капель об сетку каплеотбойного элемента и многократного изменения (увеличение – резкое падение) скорости газо-жидкостного потока.

Температура парожидкостного потока, поступающего в каплеотбойник для сепарации жидкости, составляет 100 °С.

Есть основание утверждать, что при такой температуре имеет место потеря серной кислоты, которая уходит в атмосферу в виде паровой фазы.

ОАО «УкрНИИхиммаш» разработал эффективный метод очистки отходящего парогазового потока после конденсатора WSA на базе фторопластового теплообменника представленного на рис. 4.

Отходящие газы практически будут «сухими» и экологически чистыми.

Одновременно увеличивается производительность установки по серной кислоте за счет предотвращения ее потерь с отходящим парогазовым потоком.

ОАО «УкрНИИхиммаш» имеет также опыт разработки и изготовления широкой гаммы химического оборудования для производств малотоннажной химии, выпускающих особо чистые вещества и химреактивы: колонны дефлегмационные, ректификационные, абсорбционные, десорбционные, промывные; реакторы, эфиризаторы и емкостное оборудование, сильфонные дозирующие насосы, запорная арматура Ду 10, 15, 20, 25, фильтры патронные и мембранные, трубопроводы для обвязки оборудования.

На базе данного оборудования можно создавать установки для получения особо чистых веществ, например, особо чистой серной кислоты. Инертность фторопласта по отношению к перерабатываемым веществам позволяет обеспечить высокую степень чистоты получаемых особо чистых веществ.

Поступила в редколлегию 25.03.10

УДК 666.1.038

А.М. ХАРЧЕНКО, М.А. ХАРЧЕНКО, канд. техн. наук,
ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина

АППАРАТ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

В статті описана конструкція розробленого апарату дискового для термічної обробки сипучих матеріалів та дані рекомендації для його розрахунку на задану продуктивність відносно до процесу одержання бажаного продукту.

В статье описана конструкция разработанного аппарата дискового для термической обработки сыпучих материалов и даны рекомендации для его расчета на заданную производительность относительно к процессу получения желаемого продукта.

In this article the construction of disk device elaborated for thermal processing loose materials is described and the recommendations for calculation of apparatus for necessary process and productivity are given.

Самые разнообразные типы сушильных аппаратов применяются в различных отраслях промышленности для сушки, прокалки и химического превращения сыпучих материалов.

Особое место среди них занимают подовые сушилки [1, 2].

Преимуществом их является возможность создания заданных условий на каждом поде (полке), что очень важно для осуществления некоторых процессов обработки сыпучих материалов, а для некоторых исходных материалов получение заданных продуктов без обеспечения условий на каждом поде при перемещении материала сверху вниз из пода на под неосуществимо [2].

Учитывая вышеизложенное, а также значительное подорожание природного газа и мазута, дымовые газы от сгорания которых в основном используются в подовых сушилках, в ОАО «УкрНИИХиммаш» разработан аппарат для термической обработки сыпучих материалов [3, 4].

В аппарате, который представляет собой установленные друг над другом горизонтальные круглые диски, используется нагрев через поверхность диска, в том числе и электрический нагрев.

Материал при прохождении сверху вниз по дискам подвергается нагреву, сушке с отводом выделяющихся паров из пространства между дисками, прокалке и охлаждению. При этом горячая жидкость, полученная при охлаждении горячего продукта в нижних дисках, используется для нагрева исходного материала в верхних дисках, чем достигается экономия энергоресурсов.

Благодаря специальной конструкции скребков обрабатываемый материал равномерно распределяется по поверхности дисков (рисунок).

Толщина слоя материала на диске может устанавливаться заданной, время пребывания материала на диске регулируется изменением частоты вращения центрального вала от привода и, соответственно, скорости перемещения скребков. При этом, часть радиальных скребков выполнены наклонными, что позволяет пересыпать материал через них и, таким образом, интенсифицировать процессы теплообмена на дисках.

Проектирование аппарата для обработки исходных материалов с получением конечного продукта на заданную производительность основывается на известных зависимостях по теплопередаче от дисков к обрабатываемому материалу.

В случае обработки коксовых фракций или близких к ним по свойствам материалов при электрическом нагреве дисков коэффициент теплопередачи может быть принят на основе промышленной эксплуатации дисковых подог-

ревателей аналогичной конструкции на Братском алюминиевом заводе: $k = 85 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}$ – для мелких фракций кокса и $k = 60 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{°C}$ – для крупных фракций кокса.



Рисунок – Распределение материала по диску

При принятом диаметре дисков, соответственно, поверхности диска, определяют необходимые поверхности для нагрева, сушки, прокали или химического превращения с получения заданного продукта, а также необходимую поверхность охлаждения продукта до заданной температуры.

По необходимой поверхности определяют количество дисков.

В случае, если необходимое количество дисков больше 18, принимают больший диаметр диска и расчет повторяют.

Необходимые поверхности сушки, прокали и химического превращения определяются на основании кинетических закономерностей проведения процессов в лабораторных условиях, максимально приближенных к промышленным.

Степень соответствия учитывается коэффициентом k , определяемым на основе эксплуатации аналогичных аппаратов.

Разработанный в ОАО «УкрНИИхиммаш» аппарат дисковый для обработки коксовой мелочи имеет следующие параметры:

Производительность по исходному материалу, кг/ч	1500
Влажность материала, %	
- начальная	24
- конечная	0,35
Температура, °С	
- кокса на входе, не менее	10
- кокса на выходе, не более	95
- на поверхности диска, не менее	250
Диаметр диска, м	1,2
Площадь поверхности нагрева одного диска, м ²	1,0
Число дисков нагревательных, шт.	12
Число дисков охлаждающих, шт.	1
Частота вращения скребкового вала, с ⁻¹	0,067...0,1
Установленная общая мощность электрообогрева, кВт	216
Установленная мощность привода, кВт	15,0

Список литературы: 1. *Исламов М.Ш.* Печи химической промышленности / *М.Ш. Исламов.* –Л.: Химия, 1969. – С. 37 – 43. 2. *Зеликман А.Н.* Металлургия тугоплавких редких металлов / *А.Н. Зеликман.* – М.: Металлургия, 1986. – С. 100 – 102. 3. Пат. 89974 Украина, МПК F 26 В 15/ 00. Аппарат дисковый для термічної обробки сипучих матеріалів / *Харченко А.М., Данилов Ю.Б. та інші., заявник і патентовласник Данилов Ю.Б.* – № а2007 06917; заявл. 19.06.2007; опубл. 25.03.2010, Бюл. № 6. 4. Пат. 2350864 Российская Федерация, МПК F 26 В 15/06. Аппарат дисковый для термической обработки сыпучих материалов / *Харченко А.М. Данилов Ю.Б. и др., патентообладатель Данилов Ю.Б.* – № 2007 124 395/06, заявл. 28.06.2007, опубл. 27.03.2009, Бюл. № 9.

Поступила в редколлегию 25.03.10

С.А. БЕЛОВ, канд. техн. наук,

С.А. ГОНДАРЕВА, ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ГЕРМЕТИЧНОСТИ АРМАТУРНЫХ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

У справжній роботі проводиться дослідження напружено-деформованого стану й герметичності арматурного фланцевого з'єднання. У роботі розглядаються режим монтажу та робочий стан. При постановці завдання розглядається дві контактні пари: з'єднання гайок і фланця, а також прокладки із фланцями. Прокладка моделювалася завданням нелінійних характеристик матеріалу на базі експериментальних даних. Розрахунок зроблений за допомогою програмного комплексу, заснований на методі кінцевих елементів. Дано порівняння результатів розрахунку з результатами, отриманими за наближеною методикою, розробленої «УкрНДІхімашем».

В настоящей работе проводится исследование напряженно-деформированного состояния и герметичности арматурного фланцевого соединения. В работе рассматриваются режим монтажа и рабочее состояние. При постановке задачи рассматривается две контактные пары: соединения гаек и фланца, а также прокладки с фланцами. Прокладка моделировалась заданием нелинейных характеристик материала на базе экспериментальных данных. Расчет произведен с помощью программного комплекса, основанный на методе конечных элементов. Дано сравнение результатов расчета с результатами, полученными по приближенной методике, разработанной «УкрНИИхимашем».

The present work carries out research tensely-deformed conditions and tightness reinforcing flanged connections. In work the mode of installation and a working condition are considered. At statement of a problem it is considered two contact pairs: connections of nuts and a flange, and also a lining with flanges. The lining was modeled by the task of nonlinear characteristics of a material on the basis of experimental data. Calculation is made with the help of the program complex, based on a method of final elements. Comparison of results of calculation with the results received by the approached technique, developed "UKRNIICHIMMASH" is given.

Разъемные фланцевые соединения нашли широкое применение в различных отраслях промышленности.

Наиболее полный обзор фланцевых соединений и методов их расчета дан в монографии [1].

В настоящей работе рассматриваются арматурные фланцевые соединения. Особенностью этих фланцев является наличие малого количества шпилек (болтов), что создает трудности для уплотнений фланцев между шпильками.

В настоящее время в странах СНГ существуют приближенные методики расчета арматурных фланцев: ГОСТ Р 52857.4-2007 [5] и стандарт предприятия ОАО «УкрНИИхиммаш» [2].

Объектом исследования в данной работе является приварное в стык фланцевое соединение. Фланец состоит из фланцевого кольца 1, конической втулки 2 и обечайки 3.

В соединение также входит прокладка 4 и шпильки с гайками 5 (рис. 1).

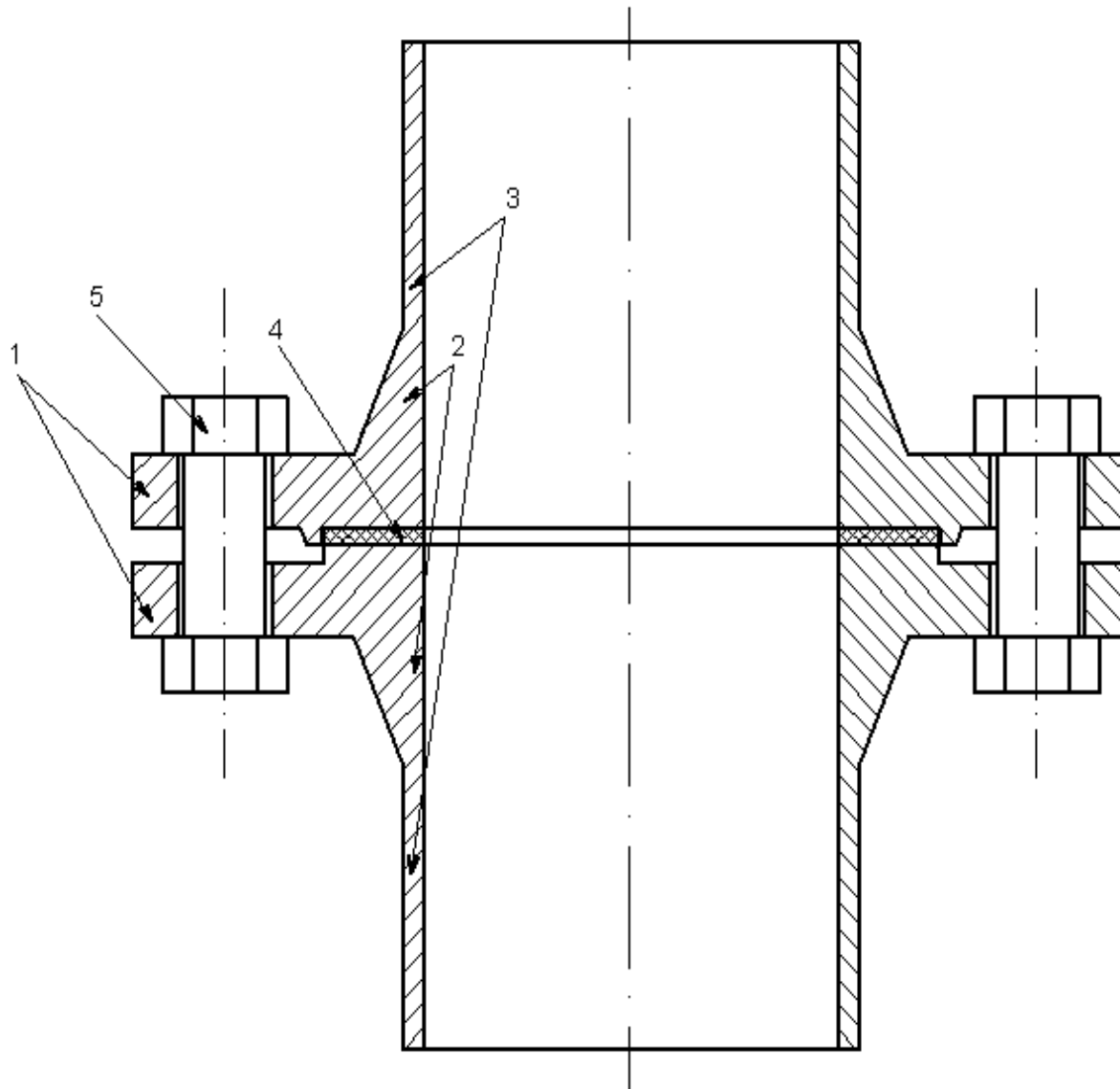


Рис. 1. Фланцевое соединение

Коническая втулка приваривается к обечайке встык.

Фланец затягивается четырьмя шпильками.

Основные геометрические размеры исследуемой конструкции соответствуют типу исполнения фланцевого соединения «выступ-впадина» на условное давление P_y 2,5 МПа и условный проход D_y 50 мм [3].

Для расчета данной конструкции применялся программный комплекс на базе метода конечных элементов [4].

При создании деталей расчетной модели, таких как фланцы, шпильки, гайки и обечайки, использовались объемные 8-узловые элементы с тремя степенями свободы в каждом узле (перемещения в направлении осей X, Y, Z). Прокладка создавалась объемными конечными элементами с перемещениями в качестве степеней свободы в каждом узле.

Общим требованием, необходимым для осуществления герметизации системы, является создание предварительной деформации всех элементов до величины, обеспечивающей удельное давление в контакте, достаточное для необходимого противодействия протеканию уплотняемой среды.

Например, согласно нормам расчета [2] для паронита необходимо создать контактное давление 20,0 МПа.

Для обеспечения герметичности соединения в рабочих условиях необходимо обеспечить давление на прокладке, равное $q_n = t \cdot p$, где t – коэффициент прокладки [2], p – расчетное давление в аппарате;

Для учета нелинейных свойств материала прокладки при решении контактной задачи используются полученные экспериментально на разрывной машине «Instron» кривые деформирования при нагружении и разгрузке, которые представлены на рис. 2.

В программном комплексе кривые деформирования задаются в табличном виде.

Усилие затяжки, обеспечивающее герметичность прокладки, моделировалось специальными 3-узловыми элементами с одной степенью свободы – перемещением в направлении предварительного усилия.

Нагрузка от затяжки шпилек передается на фланцы через гайки.

Взаимодействие гаек с фланцами моделируется контактом двух податливых тел.

Тип контактных элементов – «поверхность-поверхность» с учетом сил трения с коэффициентом трения $\mu = 0,15$.

В алгоритм решения контакта заложен расширенный метод множителей Лагранжа.

В силу симметрии конструкции фланцевого соединения и действующей

нагрузки, рассматривается 1/8 часть фланца. Расчетная модель конструкции показана на рис. 3.

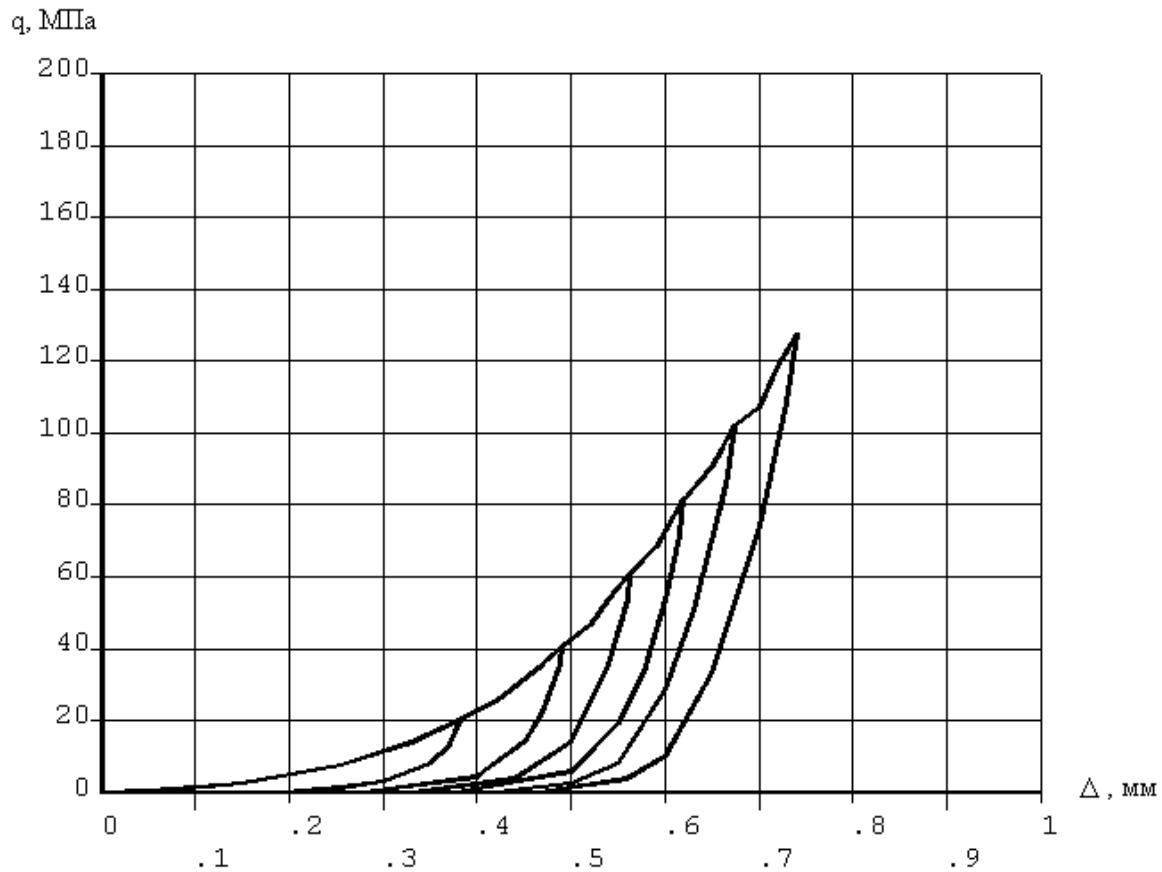


Рис.2. Диаграмма деформирования паронитовой прокладки

Напряжения в конструкции, вызванные ее весом, в расчете не учитываются ввиду их малости.

Напряженное состояние фланцевого соединения рассматривается в условиях двух расчетных режимов: режим монтажа и рабочее состояние.

Для выполнения условия герметичности при монтаже каждая из шпилек в месте соединения гаек с фланцами создает контактное давление с результирующим усилием $N_{60} = 21250$ Н.

В рабочих условиях дополнительно к предварительной затяжки шпилек к внутренней поверхности обечаек прикладывается избыточное давление $p = 2,0$ МПа.

Температура стенки обечаек составляет $t = 200$ °С.

В соответствии с [2], температура фланцев равна $t_{\phi} = 192$ °С, болтов – $t_{б} = 170$ °С как для неизолированного фланцевого соединения.

В результате расчета напряженно-деформированного состояния фланцевого соединения получены распределения напряжений и перемещений во фланцах, шпильках и прокладке.

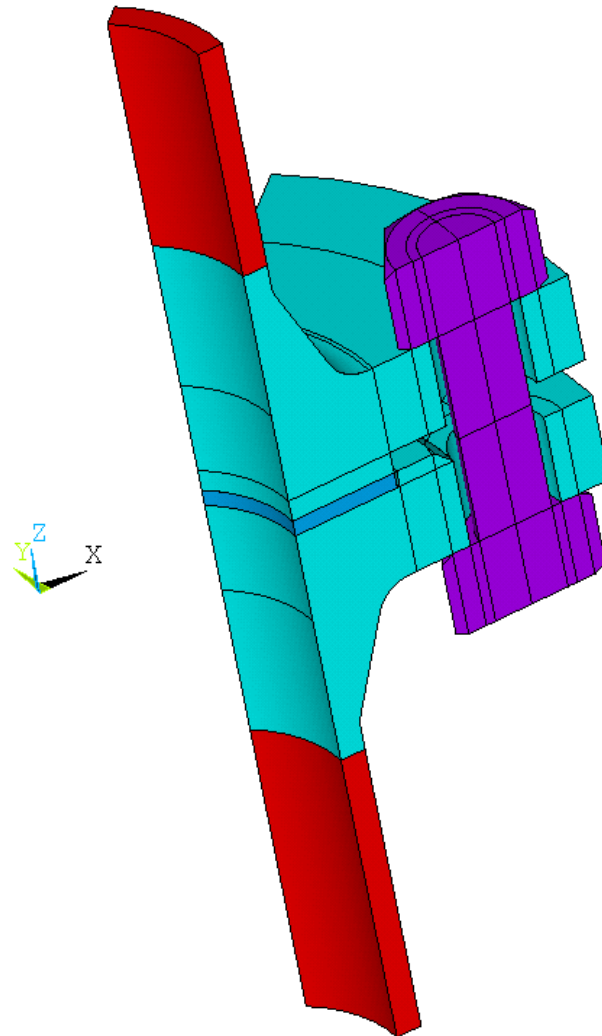


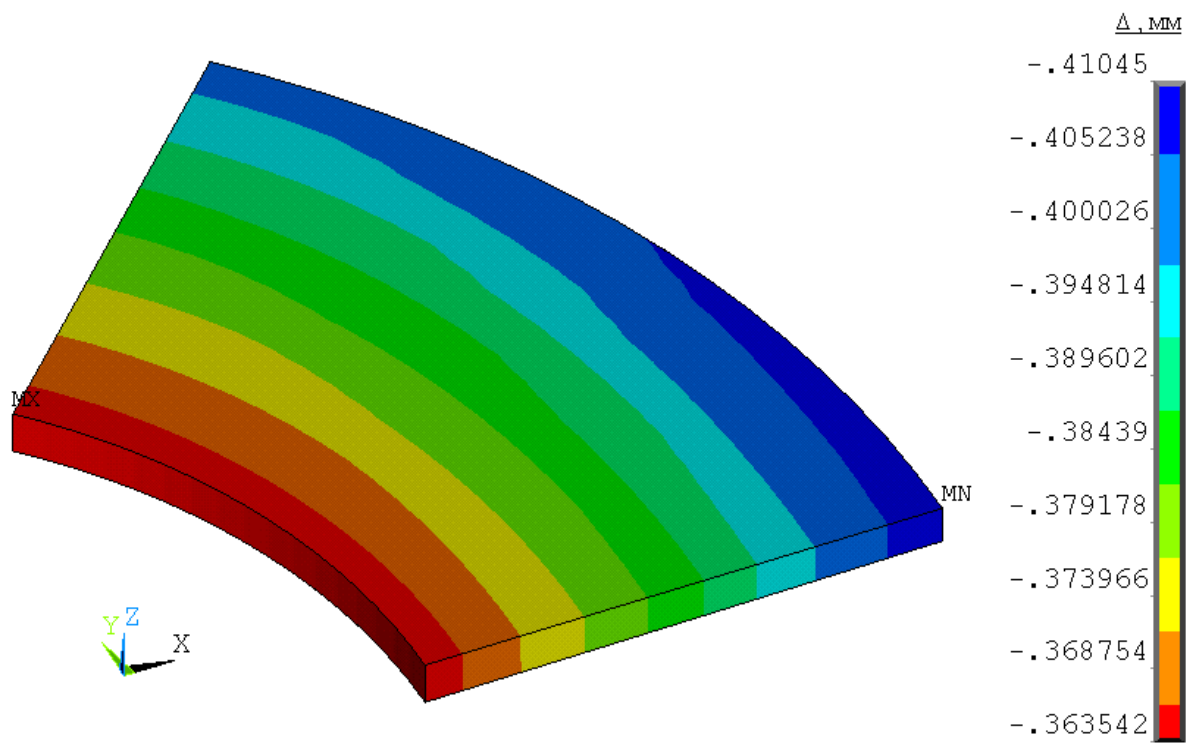
Рис. 3. Расчетная модель фланцевого соединения (1/8 часть)

Деформированное состояние прокладки в режиме монтажа и в рабочих условиях показано на рис. 4.

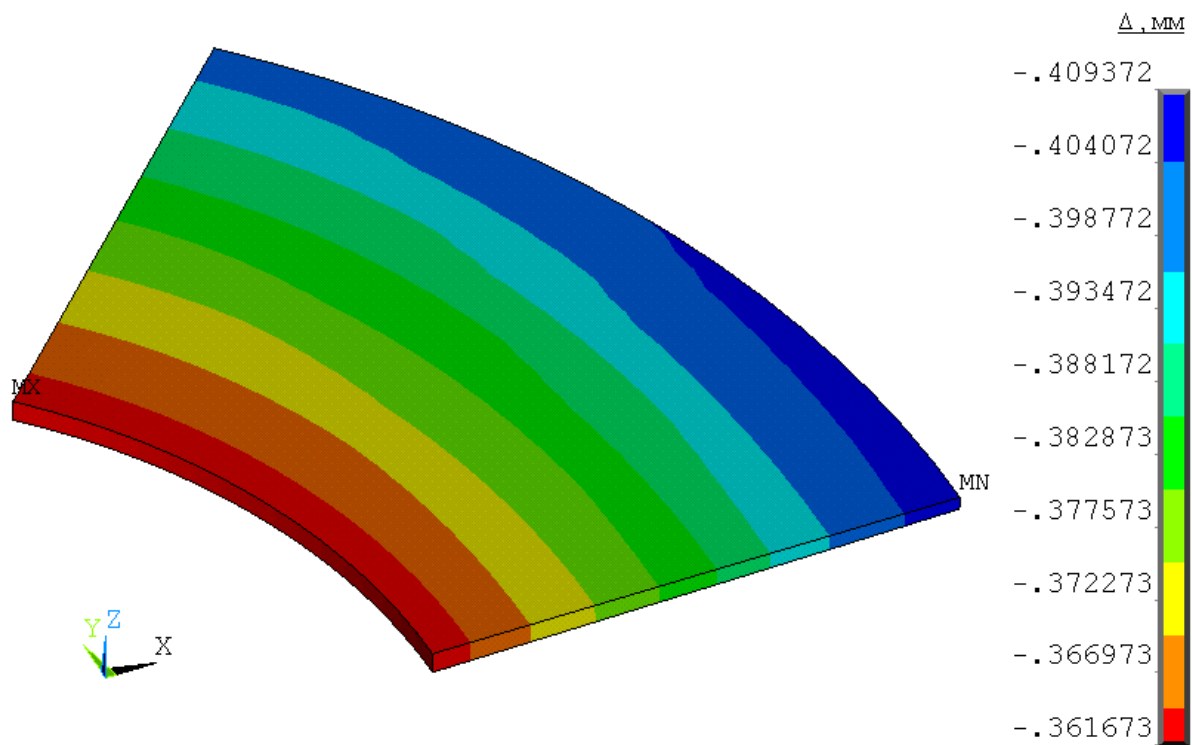
Как видно из результатов, представленных на рис. 4 и рис. 5, контактное давление неравномерно как по ширине, так и вдоль окружного направления.

Максимальное контактное давление создается в сечении, проходящем через шпильки.

Минимальное контактное давление возникает в области между шпильками.

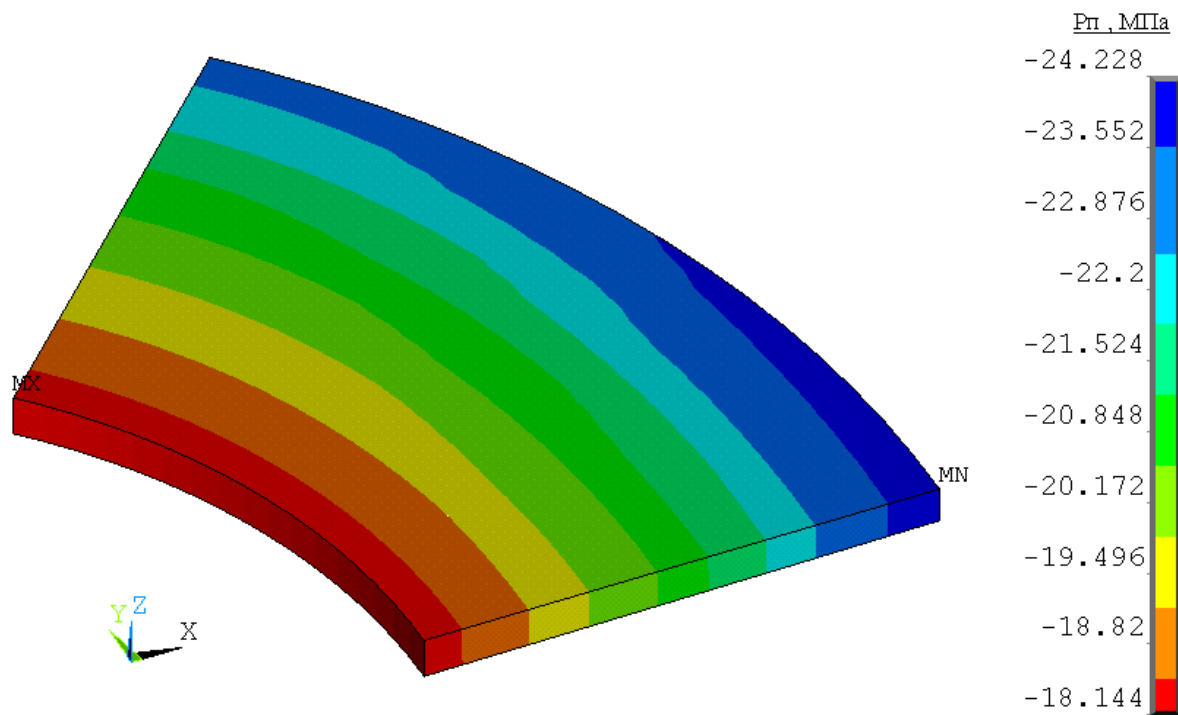


а) при монтаже

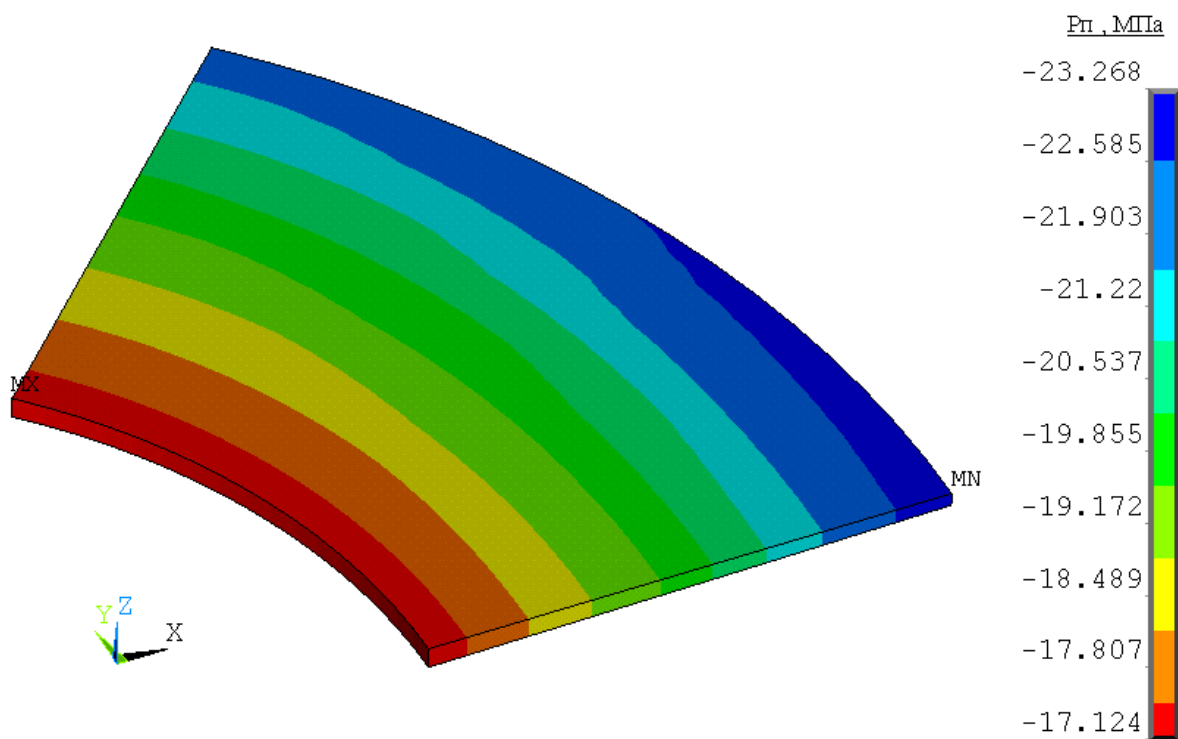


б) в рабочем состоянии

Рис. 4. Деформации прокладки



а) при монтаже



б) в рабочем состоянии

Рис. 5. Давление на прокладке

Для режима монтажа условие герметичности $q_n \geq 20,0 \text{ МПа}$ выполняется на половине ширины прокладки.

Для рабочего режима условие герметичности $q_n \geq m \cdot p = 5,0 \text{ МПа}$ выполняется по всей поверхности прокладки. Следует также отметить тот факт, что в рабочем режиме давление на прокладку несколько снижается по сравнению с режимом предварительной затяжки.

Распределение контактного давления на прокладке для расчетных режимов приведено на рис. 5.

На рис. 6 и рис. 7 представлены диаграммы распределения окружных и осевых напряжений на фланцах в рабочем состоянии.

Как видно из представленных результатов, максимальные окружные напряжения возникают в месте сопряжения фланца с конической втулкой в сечении между шпильками.

Максимальные осевые напряжения возникают в зоне сопряжения фланца с конической втулкой в сечении, проходящем через шпильки.

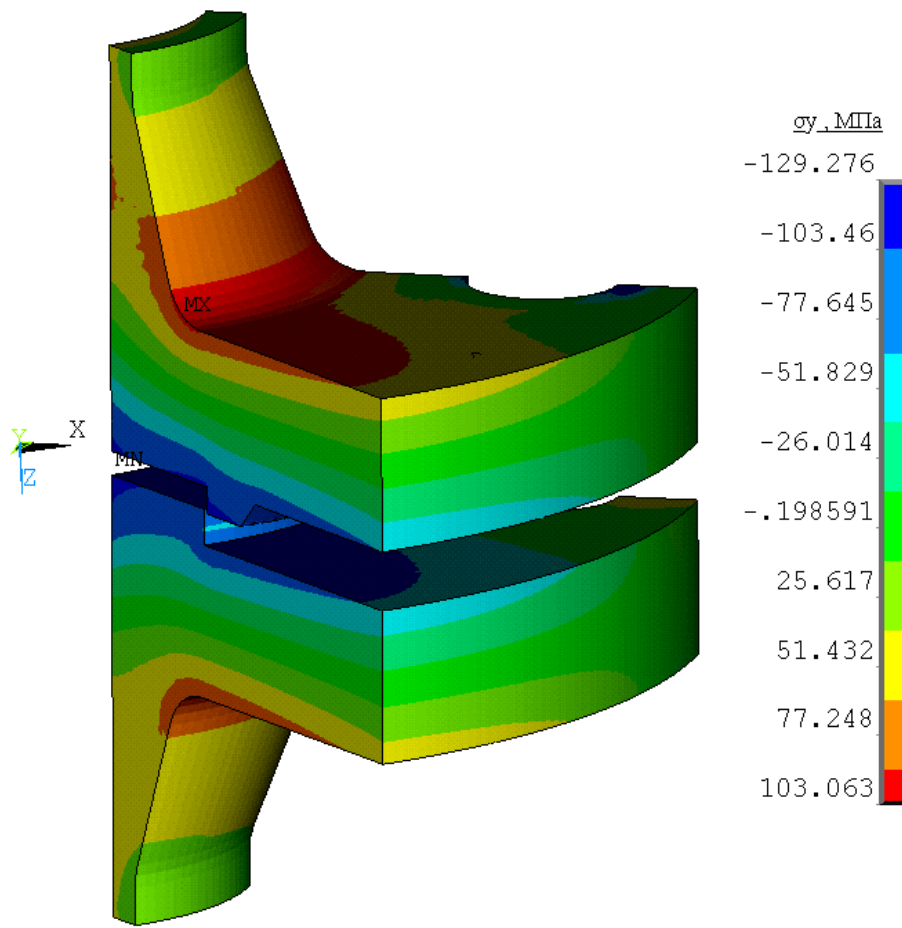


Рис. 6. Окружные напряжения на фланцах в рабочем состоянии

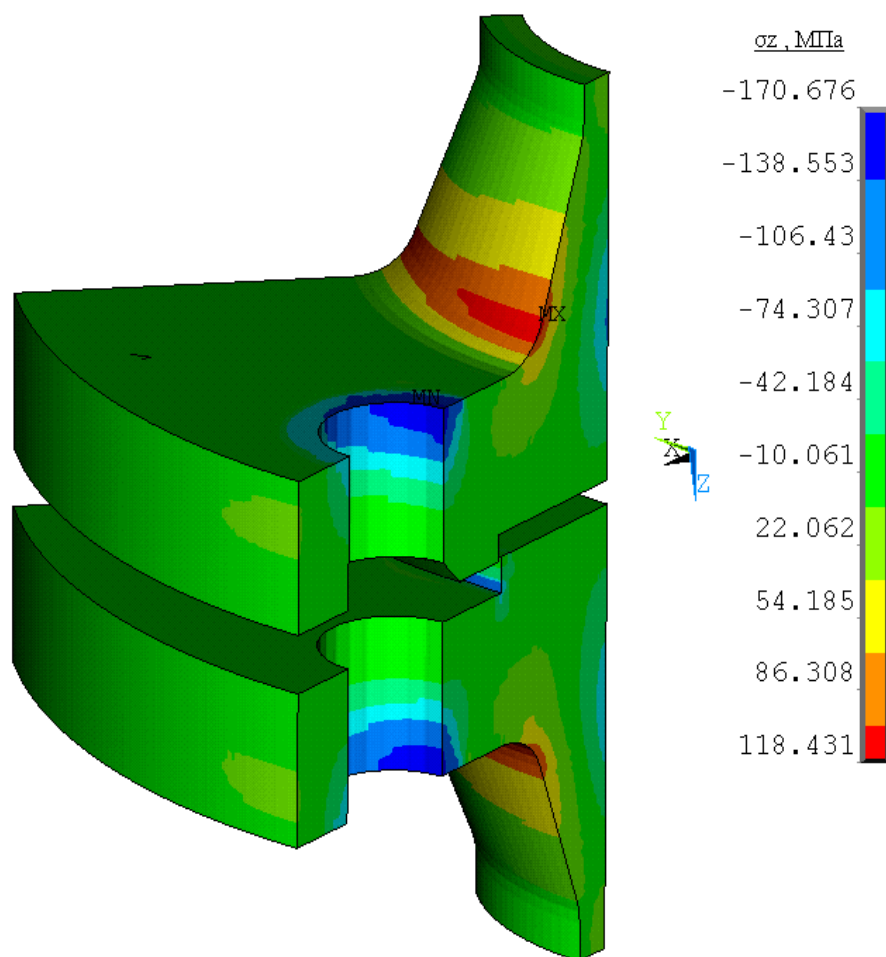


Рис. 7. Осевые напряжения на фланцах в рабочем состоянии

На рис. 8 представлена диаграмма осевых напряжений на шпильке.

Распределение напряжений, возникающих в среднем сечении, показано на рис. 9.

Как видно из этих результатов, шпильки подвержены не только растяжению, но и значительному изгибу.

Это же видно и из распределения контактного давления между поверхностями гайки и фланца, представленного на рис. 10а и рис. 10б.

Видно, что контакт гаек с фланцами распространяется на всю площадь.

Однако наблюдается неравномерное распределение давления, что говорит о том, что фланец и шпилька поворачиваются на различный угол.

Для нашей задачи угол поворота фланца составляет 0,02 рад.

Изменение угла поворота шпильки по длине представлено на рис. 11.

Как видно из результатов, угол поворота фланца превышает максимальный угол поворота шпильки, равный 0,00186 рад.

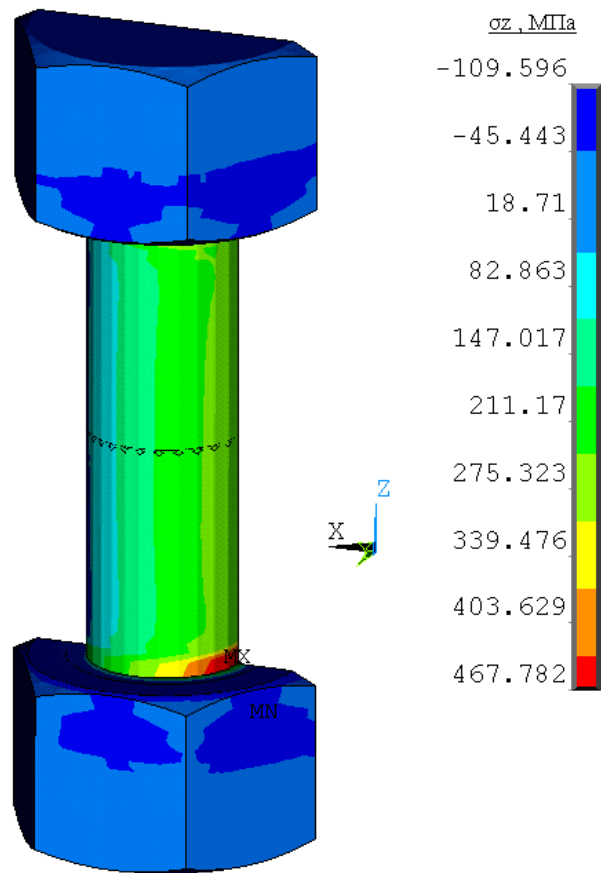


Рис. 8. Осьевые напряжения в шпильке в рабочем состоянии

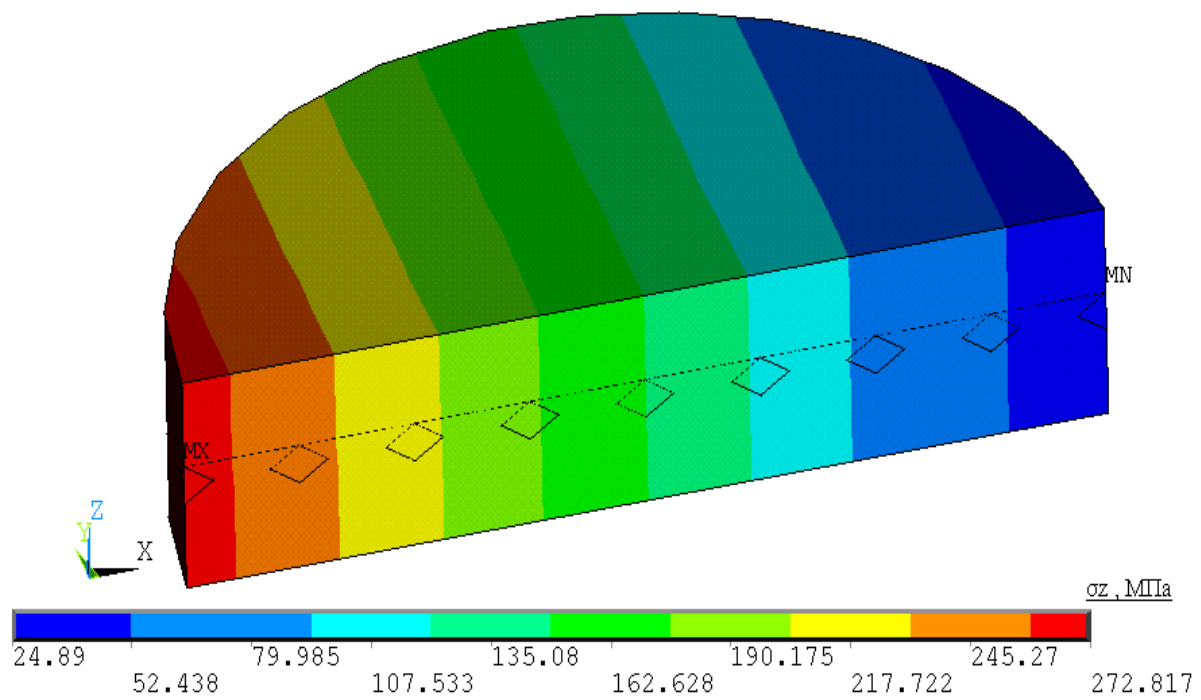
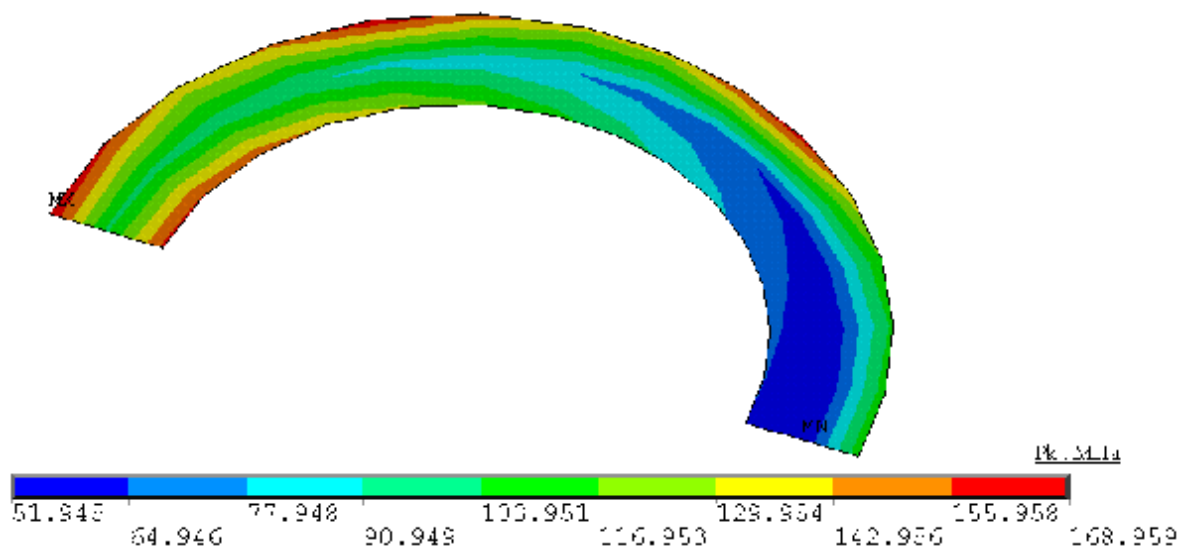
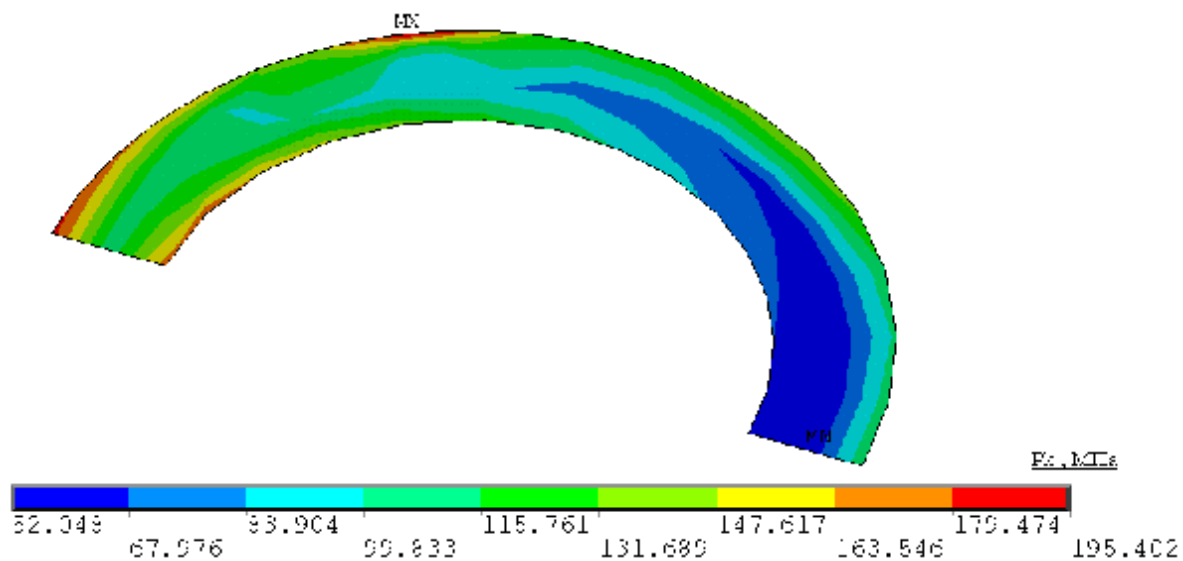


Рис. 9. Распределение осевых напряжений в среднем сечении шпильки в рабочем состоянии



а) на верхней гайке



б) на нижней гайке

Рис. 10. Распределение контактного давления

Далее приведено сравнение результатов, полученных методом конечных элементов и с помощью приближенной методики [2], разработанной «УкрНИИхимашем».

В таблице приведены результаты расчетов методом конечных элементов (МКЭ) и по методике [3] для фланцев в рабочем состоянии.

Из таблицы видно, что результаты практически совпадают, за исключе-

нием осевых напряжений в месте присоединения конической втулки к кольцу фланца.

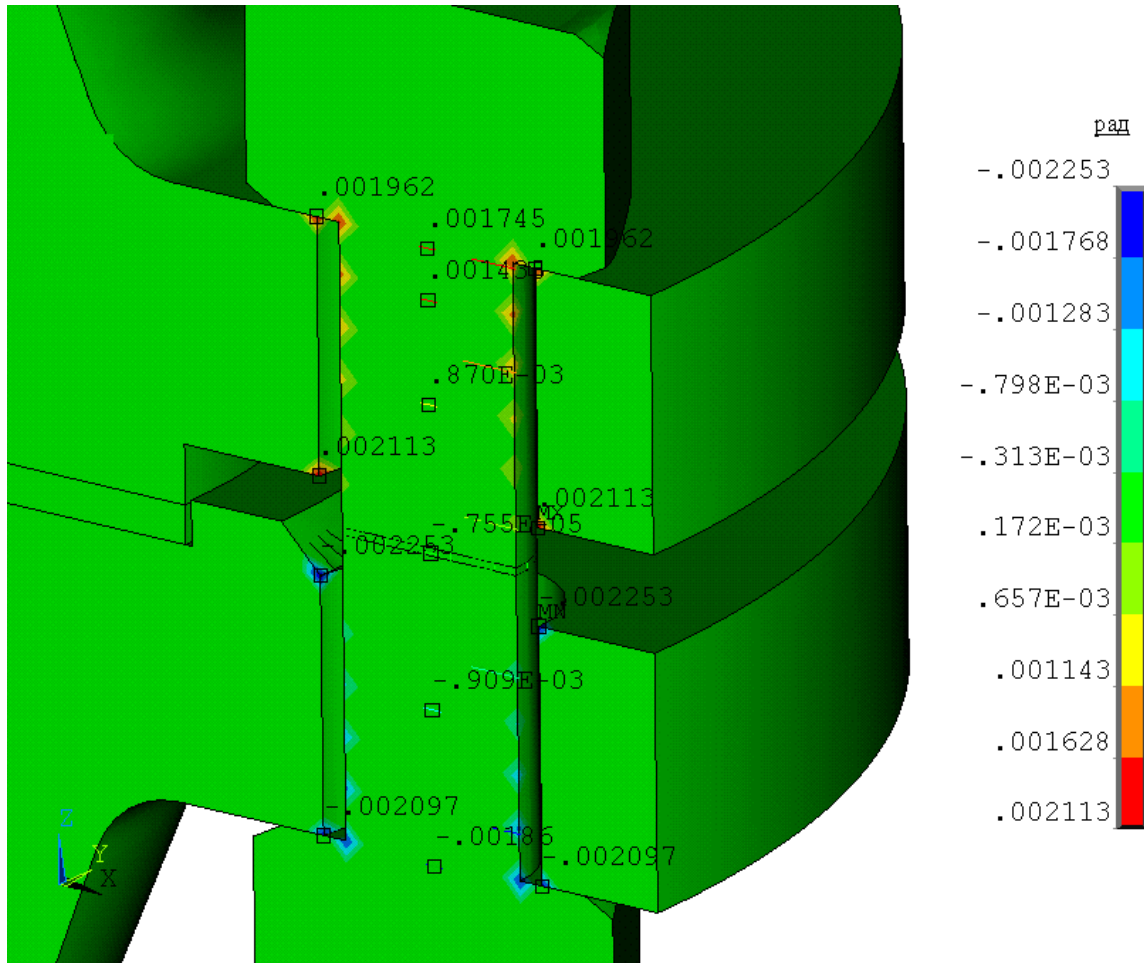


Рис. 11. Углы поворота фланцев и шпильки

Напряжения, определенные по приближенной методике несколько завышены по сравнению с методом конечных элементов.

Выводы.

В результате расчета получены распределение контактного давления на прокладке, напряженное состояние фланцев и шпилек, контактное давление между поверхностями гайки и фланца.

Определены углы поворота фланца и шпильки.

Показано, что фланец и шпилька поворачиваются на различный угол.

Произведено сравнение с существующими методиками расчета арматурных фланцев.

Таблица 1

Результаты расчета

Обозначение	Наименование и размерность	Рабочий режим	
		Методика	МКЭ
P_{60}	Болтовая нагрузка при монтаже, Н	85000	
σ_6	Расчетное напряжения в болтах, МПа	154,5	148,9 ¹⁾
$q_{п}$	Расчетное давление на прокладке, МПа	20,1	20,2 ²⁾
σ_{y0}	Окружные напряжения для обечайки в месте присоединения конической втулки, МПа	44,4 / 29,7 ³⁾	56,0 / 31,6
$\sigma_{yф}$	Окружные напряжения в месте присоединения конической втулки к кольцу фланца, МПа	5,9 / 111,0	27,6 / 103,1
σ_{z0}	Осевые напряжения для обечайки в месте присоединения конической втулки, МПа	29,4 / -19,5	19,6 / -17,1
$\sigma_{zф}$	Осевые напряжения в месте присоединения конической втулки к кольцу фланца, МПа	-173,5 / 176,8	-96,2 / 118,4
θ	Угол поворота фланца, рад	0,00149	0,00204 ⁴⁾

Примечания: ¹⁾ – среднее значение в сечении шпильки; ²⁾ – среднее значение по ширине прокладки в сечении между шпильками; ³⁾ – в числителе приведено значение напряжений на внутренней стороне детали, в знаменателе – на наружной; ⁴⁾ – среднее значение.

Список литературы: 1. *Товажнянский Л.Л.* Расчет и конструирование разъемных герметичных систем химической техники / *Л.Л. Товажнянский, Л.П. Перцев.* – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – 268 с. 2. Сосуды. Аппараты. Трубопроводы. Нормы и методы расчета на прочность и герметичность фланцевых соединений: СОУ ОАО «УкрНИИхиммаш»-005:2009. – [Введен в действие от 22.10.09]. – Х.: ОАО «УкрНИИхиммаш», 2009. – 53 с. 3. Фланцы арматуры, соединительных частей и трубопроводов на P_u от 0,1 до 20,0 МПа (от 1 до 200 кгс/см²). Типы. Присоединительные размеры и размеры уплотнительных поверхностей: ГОСТ 12815-80. – [Введен в действие от 20.05.80]. – М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1980. – 103 с. 4. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике / *О. Зенкевич.* – М.: Мир, 1975. – 541с. 5. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность и герметичность фланцевых соединений. ГОСТ Р 52857.4-2007. – [Введен в действие от 27.12.2007]. – М.: Стандартинформ, 2008. – 38с.

Поступила в редколлегию 25.03.10

П.С. МАРЧЕНКО, канд. техн. наук, **С.А. БЕЛОВ**, канд. техн. наук,
ОАО «УкрНИИХиммаш», г. Харьков, Украина

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ПЕРЕГОРОДОК И ПЛОСКИХ ДНИЩ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОСУДОВ ИЛИ АППАРАТОВ

За допомогою методу граничних навантажень виведені розрахункові формули, які дозволяють обчислити мінімальну необхідну товщину стінки перегородки чи плоского днища горизонтальної циліндричної посудини або апарата під дією гідростатичного тиску.

Используя метод предельных нагрузок получено расчетные формулы, позволяющие вычислить минимальную необходимую толщину стенки перегородки или плоского днища горизонтального цилиндрического сосуда или аппарата под действием гидростатического давления.

With the help of a method of maximum loads settlement formulas which allow to calculate the minimal necessary thickness of a wall of a partition or the flat bottom of a horizontal cylindrical vessel or the device under action of hydrostatic pressure are deduced.

При расчете на прочность перегородки, установленной внутри горизонтального цилиндрического сосуда или аппарата (рис. 1), возникает необходимость учитывать гидростатическое давление, которое можно вычислить по формуле:

$$p_x = p_0 + \gamma r \cos \alpha, \quad (1)$$

где p_0 – давление, возникающее на уровне оси обечайки, γ – удельный вес жидкости, H – высота перегородки. Предполагается, что высота $H > R$ и заполнение одной из полостей жидкостью производится на всю высоту перегородки; R – радиус окружности присоединения перегородки к цилиндрической обечайке; D – внутренний диаметр цилиндрической обечайки сосуда или аппарата; α – координата цилиндрической системы координат, помещенной на оси обечайки (в точке O на рис. 1,а):

$$p_0 = \gamma (H - R); \quad (2)$$

$$R = D / 2;$$

Будем полагать, что в предельном состоянии перегородка приобретает коническую форму, приведенную на рис. 1,б. При этом на границах каждого из участков перегородки длиной $d\alpha$ возникает предельный изгибающий момент интенсивностью:

$$M_T = \frac{\sigma_T h^2}{4}, \quad (3)$$

где σ_T – предел текучести материала перегородки; h – толщина перегородки.

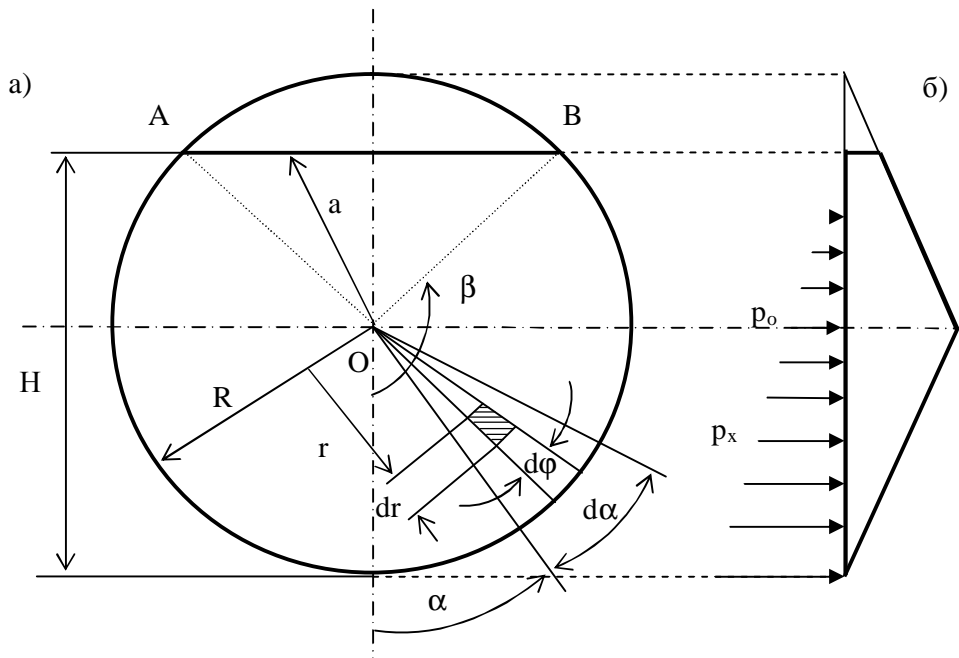


Рис. 1. Расчетная схема перегородки

Чтоб вычислить предельную нагрузку рассматриваемой перегородки, составим условия равновесия выделенного элементарного участка перегородки (рис. 2):

$$M_T R d\alpha = \int_0^{R d\alpha} \int_0^{R-r} (R-r) p_x r d\varphi dr - 2 \int_0^{R d\alpha} \frac{M_T}{2} dr. \quad (4)$$

Подставляя (1) в (4) после интегрирования последнего уравнения получаем следующее условие равновесия элементарного участка:

$$M_T R d\alpha = \left(\frac{p_0 R^3}{6} + \frac{\gamma R^4}{12} \cos \alpha \right) d\alpha - M_T R d\alpha.$$

Вначале не будем учитывать воздействие гидростатического давления на участок OAB (рис. 1,а). В таком случае для определения предельного давления на рассматриваемую перегородку следует просуммировать нагрузки всех выделенных элементарных участков:

$$2 \int_0^\beta M_T R d\alpha = 2 \int_0^\beta \left(\frac{p_0 R^3}{6} + \frac{\gamma R^4}{12} \cos \alpha \right) d\alpha - 2 \int_0^\beta M_T R d\alpha, \quad (5)$$

где β – угловая координата, соответствующая высоте перегородки

$$H = R (1 - \cos \beta).$$

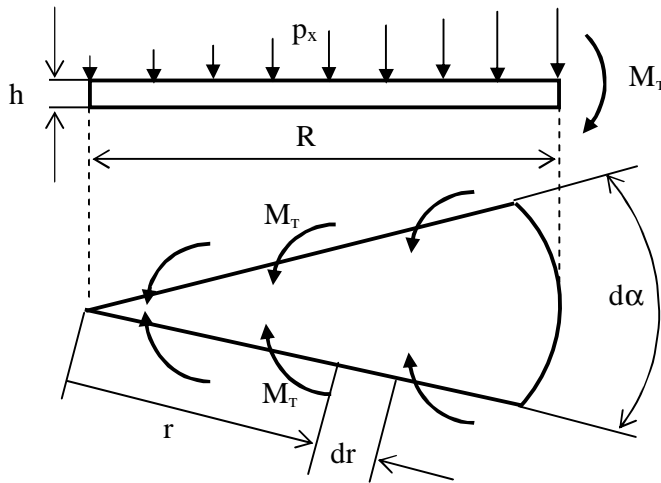


Рис. 2 Схема нагружения элементарного участка перегородки

После интегрирования уравнения (5) можно получить:

$$M_T = \frac{p_0 R^2}{12} + \frac{\gamma R^3}{24} \frac{\sin \beta}{\beta}. \quad (6)$$

Для определения расчетной толщины перегородки h_p необходимо в зависимости (3) заменить предел текучести σ_T на допускаемое напряжение $[\sigma]$.

Подставляя (2, 3) в уравнение (6) можно получить следующую расчетную формулу:

$$h_p = KR \sqrt{\frac{\gamma R}{[\sigma]}},$$

где h_p – расчетная толщина перегородки; K – безразмерный коэффициент, который вычисляется по формуле:

$$K = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{\sin \beta}{2\beta} - \cos \beta \right)}. \quad (7)$$

Пусть, например, требуется определить толщину перегородки, изготовленной из проката стали 08X18H10T и установленной в цилиндрической емкости диаметром $D = 2200$ мм, которая работает при температуре 80 °С. Остальные исходные данные: $H = 1445$ мм, $\gamma = 0,00001$ Н/мм³, $[\sigma] = 159$ МПа. При этом имеем: $R = 1100$ мм, $\beta = 1,88982$ рад., $K = 0,433921$, $h_p = 3,97$ мм.

На плоское днище, кроме гидростатического давления, может действовать внутреннее избыточное давление p . Поэтому, при расчете днища следует принимать:

$$p_o = p + \gamma (H - R),$$

где p – расчетное давление.

Кроме того, для днища $H = 2R$ и $\beta = \pi$. Воспользовавшись этими значениями можно получить:

$$h_p = KR \sqrt{\frac{p_{np}}{[\sigma]}},$$

где

$$p_{np} = p + \gamma R; \quad K = \sqrt{\frac{1}{3}}.$$

Если вместо рассчитанной ранее перегородки установить днище, то при давлении $p = 0$, имеем: $p_{пр} = 0,011$ МПа, $K = 0,57735$ и расчетная толщина будет больше, чем у перегородки: $h_p = 5,28$ мм.

Если при расчете днища не учитывать гидростатическое давление (положить $\gamma = 0$), то зависимость (6) преобразуется к виду:

$$M_T = \frac{pR^2}{12}. \quad (8)$$

Отметим, что А.С. Калманок [1] для жестко заземленной круглой пластины, нагруженной равномерно распределенной нагрузкой, получил такую же зависимость [8], а Н.Н. Малинин [2], используя условие пластичности Треска-Сен-Венана и дифференциальное уравнение изгиба такой пластины, получил несколько уточненное значение:

$$M_T = \frac{pR^2}{11,3}.$$

После этого учтем влияние гидростатического давления на участок ОАВ (рис. 1,а). На нем при $\beta < \alpha \leq \pi$ вместо зависимости (4) необходимо использовать следующее уравнение равновесия:

$$0 = \int_0^a \int_0^{\alpha} (a-r)p_x r d\varphi dr - 2 \int_0^a \frac{d\alpha}{2} M_T dr,$$

где a – отрезок

$$a = \frac{H - R}{\cos(\pi - \alpha)}.$$

При интегрировании по всей площади перегородки, вместо уравнения (5), необходимо использовать следующее уравнение:

$$2 \int_0^{\beta} M_T R d\alpha = 2 \int_0^{\beta} \left(\frac{p_0 R^3}{6} + \frac{\gamma R^4}{12} \cos \alpha \right) d\alpha + 2 \int_0^{\beta} \left(\frac{p_0 a^3}{6} + \frac{\gamma a^4}{12} \cos \alpha \right) d\alpha - 2 \int_0^{\beta} M_T R d\alpha - 2 \int_0^{\pi} M_T a d\alpha$$

После соответствующих преобразований этих зависимостей, вместо формулы (7), получаем более сложную зависимость:

$$K = \sqrt{\frac{1}{3} \left(\frac{\sin \beta}{2A\beta} - B \cos \beta \right)}, \quad (9)$$

где

$$A = 1 + \frac{\cos \beta}{2\beta} C; \quad B = 1 + \frac{\sin \beta - C}{4A\beta} \cos \beta; \quad C = \ln \frac{1 + \sin \beta}{\cos(\pi - \beta)}.$$

Если для ранее рассчитываемой перегородки произвести расчет коэффициента K по формуле (9), то получаем: $C = 1,827116$; $A = 0,848385$; $B = 1,0426918$; $K = 0,455785$ и расчетная толщина перегородки $h_p = 4,17$ мм, что почти на 5 % превышает величину, полученную по формуле (7).

Расчеты показали, что коэффициент A имеет минимум $A = 0,8413$ при $\beta = 116^\circ$ и устремляется к $A = 1$ при $\beta = 180^\circ$ и при $\beta \rightarrow 90^\circ$. Коэффициент B имеет максимум $B = 1,04375$ при $\beta = 105^\circ$ и устремляется к $B = 1$ при $\beta = 180^\circ$ и при $\beta \rightarrow 90^\circ$. Значение коэффициента K , полученное по формуле (9), во всем диапазоне $90^\circ < \beta \leq 180^\circ$ не превышает более чем на 5% значения этого коэффициента, полученного по формуле (7).

Вывод.

Для расчетов на прочность перегородок, устанавливаемых в горизонтальных цилиндрических сосудах или аппаратах, не внося больших погрешностей, рекомендуется использовать более простую зависимость (7).

Список литературы: 1. *Калманок А.С.* Расчет пластинок: справочное пособие / *А.С. Калманок.* – М.: Госстройиздат, 1959. – 212 с. 2. *Малинин Н.Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести / *Н.Н. Малинин.* – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.

Поступила в редколлегию 25.03.10

В.А. КОБЗЕВ, канд. техн. наук,
В.Н. СТОГНИЙ, ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина,
Г.В. РОЗОВ, А.И. ЛОТОРЕВ, Г.А. КАЧКИН, И.А. ГУКОВ,
А.В. СНЕЖКО, ЗАО «ЛИНИК», г. Лисичанск, Украина

АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ РЕАКТОРА С ВНУТРЕННЕЙ ПЛАКИРОВКОЙ

На прикладі проведення акустико-емісійного (АЕ) контролю реактора проаналізовано проблеми, пов'язані з ухваленням рішення спеціалізованими організаціями про стан металу посудини після тривалої експлуатації. Проілюстрована дієвість методу АЕ, стабільність і точність результатів контролю АЕ параметрів на прикладі кількох АЕ випробувань із застосуванням апаратури АЕ різних типів. Визначено недоліки діючих в Україні нормативних документів, пов'язаних з використанням методу АЕ.

На примере проведения акустико-эмиссионного (АЭ) контроля реактора проанализированы проблемы, связанные с принятием решения специализированными организациями о состоянии металла сосуда после длительной эксплуатации. Проиллюстрирована действенность метода АЭ, стабильность и точность результатов контроля АЭ параметров на примере нескольких АЭ испытаний с применением аппаратур АЭ разных типов. Определены недостатки действующих в Украине нормативных документов, связанных с использованием метода АЭ.

The example of acoustic emission (AE) monitoring of the reactor analyzed the problems associated with the decision by the specialized organizations of the state of the metal vessel after prolonged use. Illustrated the validity of the method of AE, stability and accuracy of testing results of AE parameters on the example of several of AE testing using instruments of different types of AE. Drawbacks of the current Ukrainian laws and documents relating to the use of the method of AE.

Для обеспечения бесперебойной и безаварийной работы технологического оборудования, отработавшего проектный ресурс, необходимо регулярно проводить работы по его диагностированию [1]. На нефтехимических предприятиях, как правило, эти работы проводятся в период остановки производства для осуществления планового ремонта. Сроки проведения ремонтных работ, составной частью которых являются работы по диагностированию, относительно небольшие, поэтому диагностирующие организации с целью обеспечения качества диагностического контроля должны использовать в своей работе различные взаимодополняющие друг друга методы обследования, стараясь получить результат о техническом состоянии всего ме-

талла сосуда или аппарата, испытывающих воздействие высоких механических напряжений при рабочих и испытательных нагрузках, на фоне воздействия на металл повышенной температуры, агрессивной среды.

Наиболее оптимально задача диагностирования оборудования решается на ЗАО «ЛИНИК», где цикл диагностирования практически для каждой единицы технологического оборудования заканчивается испытанием пробным давлением с контролем металла оборудования методом акустической эмиссии (АЭ). Использование метода АЭ на завершающей стадии диагностического обследования позволяет дополнительно провести 100 % контроль качества выполненного ремонта и качества предварительного диагностирования металла методами неразрушающего контроля.

При положительных результатах полного цикла диагностирования с применением акустической эмиссии в ходе испытания пробным давлением службы надзора за безопасной эксплуатацией оборудования получают взаимодополняющий набор аргументов о возможности безаварийной эксплуатации: после предварительного контроля стандартными методами неразрушающего контроля, после проведения контроля по результатам ремонта, после успешного проведения испытаний пробным давлением с АЭ контролем, когда в металле не обнаружены зоны повышенной акустической активности.

Если в результате испытания пробным давлением с АЭ контролем в металле обследуемого объекта будут обнаружены области повышенной акустической активности, то после определения координат этих областей в них производят дополнительное обследование методами неразрушающего контроля. При обнаружении дефектов производится дополнительный ремонт обследуемого объекта (сосуда, трубопровода и т.д.).

Если после дополнительного обследования металла в зонах повышенной акустической активности дефекты не обнаружены, то с целью определения причин повышения акустической активности проводится анализ побочных факторов (артефактов), сопутствующих испытанию.

В качестве побочных факторов может быть трение или удары о поверхность металла объекта элементов конструкции внутренних или внешних устройств, инициированные воздействием ветра, падающих капель воды, вибрацией объекта испытания или испытательной среды.

Повышение акустической активности может происходить вследствие возникновения в ходе испытания пробным давлением течей во фланцевых соединениях из-за некачественно произведенного уплотнения.

Обычно, такого рода артефакты АЭ выявляются визуально и, по возможности, устраняются перед испытанием или даже в ходе его проведения. При этом из общего времени испытания исключается та его часть, которая была затрачена на устранение причин возникновения АЭ в металле, не относящихся к разрушению.

Кроме визуального способа выявления артефактов в практике АЭ контроля нередко используются способы, учитывающие закономерности процесса разрушения металла и формирования при этом физических параметров сопутствующей АЭ. Обобщенно процессы устранения ложной составляющей АЭ на уровне физических параметров именуется как «фильтрация» и обычно проводятся после завершения испытания на стадии постобработки результатов АЭ контроля.

Фильтрация АЭ информации может быть проведена по любому из зарегистрированных в ходе испытания параметров. Необходимость фильтрации параметров АЭ определяется условиями проведения АЭ контроля, а также специфическими требованиями по ограничению величин некоторых параметров АЭ, накладываемых требованиями нормативных документов на АЭ контроль определенных объектов.

Такой вид фильтрации может быть использован в ходе АЭ контроля большого количества однотипных объектов, при испытании которых опытным путем были получены данные о необходимости формировать выводы АЭ контроля не по всей базе зарегистрированных параметров АЭ, а по той ее части, которая ограничивается определенными диапазонами.

В ходе практики периодического диагностирования разнотипных сосудов и аппаратов нами разработан алгоритм фильтрации по времени нарастания переднего фронта АЭ импульса и его длительности [2].

Такая фильтрация позволяет максимально учесть те сигналы АЭ, которые были сформированы в ходе разрушения металла или обозначили имеющиеся трещины, заполненные продуктами коррозии.

При проведении испытания трещины раскрываются с разрушением заполняющих их продуктов коррозии.

Наиболее характерным примером проведения АЭ контроля, по результатам которого нам пришлось в кратчайшие сроки принимать неординарные решения, не приведшие к срыву графика пуска оборудования после ремонта, было испытание реактора Р-201.

Реактор Р-201 был изготовлен на Кроровопольском машиностроительном заводе в г. Брно, ЧССР в 1983 г, а с 1986 г. пущен в эксплуатацию на Лисичанском нефтеперерабатывающем заводе.

Рабочая среда реактора – дизельное топливо с примесью водорода при рабочем давлении $46,2 \text{ кг/см}^2$ и рабочей температуре $450 \text{ }^\circ\text{C}$.

Испытание пробным давлением для таких рабочих условий должно проводиться при внутреннем давлении $59,8 \text{ кг/см}^2$.

Габаритные размеры реактора: высота корпуса сосуда 8100 мм (между сварными швами приварки днищ); внешний диаметр: 3600 мм; высота днищ 1102 мм.

Объем внутренней полости составлял $97,2 \text{ м}^3$. Материал стенки реактора сталь 15121.g (аналог стали 12ХМ) толщиной 92 мм с внутренней наплавкой полос из нержавеющей стали 23/ПЕ общей толщиной 4,5 мм (ширина полос 60 мм, толщина – 0,5 мм).

Таким образом, внутренняя плакировка реактора состояла из ~ 9 слоев наплавленного металла.

Для проведения оптимизации технологического процесса одной специализированной организацией был произведен перерасчет рабочих параметров и теоретически показано, что реактор сохранит работоспособность при рабочем давлении 55 кг/см^2 и рабочей температуре $500 \text{ }^\circ\text{C}$, при этом испытательное давление должно быть 110 кг/см^2 .

Эти параметры были приняты за основу при проведении гидроиспытания реактора с АЭ контролем.

АЭ контроль в ходе гидроиспытания проводился после завершения обследования реактора методами неразрушающего контроля, в результате которого дефекты в металле и плакирующем слое не были обнаружены.

В работе использовались 8 каналов модульной системы АЭ А-Line 32D производства ООО «ИНТЕРЮНИС».

Гидроиспытания проводились в соответствии с требованиями НПАОП 0.00-1.07-94 [3] и с учетом рекомендаций ДСТУ 4046 [1] и ДСТУ 4227 [4] по проведению АЭ контроля в ходе испытаний сосудов пробным давлением.

АЭ контроль предполагалось осуществить в пределах от 20 кг/см^2 до 110 кг/см^2 с остановками нагружения при теоретически рассчитанном рабочем давлении $P_1=55 \text{ кг/см}^2$ (10 мин) и максимальном давлении испытания $P_2=110 \text{ кг/см}^2$ (5 мин). Однако, при работе аппаратуры АЭ контроля в режиме прослушивания шума без подъема давления, шум достигал 60 дБ (в то

время, как на большинстве испытанных нами сосудов уровень шума системы сосуд-аппаратура АЭ не превышал 40 дБ).

Убедившись, что источником такого шума не являются возможные внешние шумы, наводимые на корпус реактора (механические, электромагнитные и т.д.), было принято решение продолжить испытания.

В результате последовательного подъема давления до 55 кг/см^2 , выдержки 11 мин, а затем подъема давления до 75 кг/см^2 было принято решение остановить испытание для выяснения причин полученной локационной АЭ картины.

К этому моменту было зарегистрировано 1652 АЭ импульса, представленная на рис. 1 их совокупность соответствовала 4 классу по амплитудному критерию.

В соответствии с АЭ локационной картиной большинство локаций были выстроены в горизонтальные линии, параллельные сварным швам приварки днищ к корпусу, что соответствовало направлению наплавки полос плакировки.

Кроме того, основная масса АЭ локаций располагалась выше опорного кольца реактора, которое, по-видимому, служило дополнительным усилением прочности этой части корпуса, снижая степень деформации металла, а значит и АЭ процессов.

Здесь следует учесть две важные детали.

Во-первых, на рис. 1 представлена АЭ информация предварительно подвергнутая фильтрации по схеме, приведенной в работе [2] (длительность АЭ импульсов не превышала 100 мкс, а время нарастания было не больше 20 мкс). Поэтому число зарегистрированных импульсов АЭ в исходном состоянии было значительно больше.

Во вторых, в соответствии с действующими в Украине нормативными документами на проведение АЭ контроля [1, 4] следует только считать АЭ импульсы, не обращая внимания на их амплитуду. Однако, величина амплитуды является основным физическим параметром, характеризующим любой колебательный процесс, в том числе и сигналы АЭ.

Поэтому амплитуда АЭ является определяющей во всех иностранных нормативных документах, например, в России [5, 6] или в первой фундаментальной работе [7] специалистов СССР в области стандартизации АЭ. В действительности амплитуда АЭ сигнала является основой наполнения его энергетической характеристики.

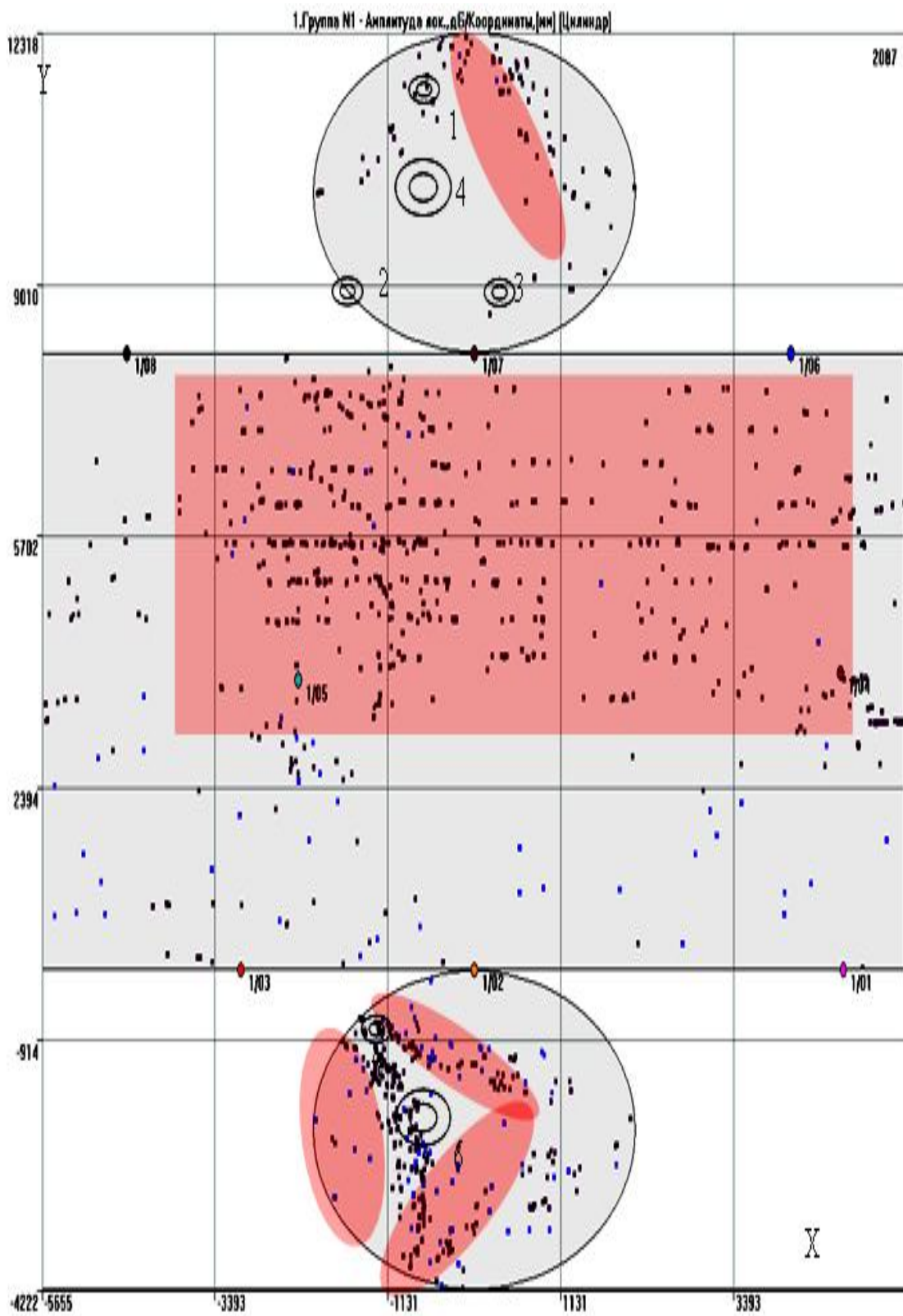


Рис. 1. Схема расстановки преобразователей и результат регистрации АЭ в ходе гидроиспытаний при изменении нагрузки от 20 до 55 кг/см² на развертке внешней поверхности корпуса реактора

Поэтому для любого испытываемого сосуда важнее учесть несколько АЭ сигналов с большой амплитудой, чем тысячи сигналов АЭ, амплитуда которых едва превышает уровень порога.

Учитывая такие погрешности в нормативных документах Украины на АЭ контроль, мы для проведения классификации сигналов АЭ по степени опасности разрушения сосуда воспользовались положениями, приведенными в российском стандарте [5].

Помимо амплитудного критерия, который в нашем случае соответствовал 4 классу, нами был использован локально-динамический критерий [5], результаты применения которого приведены на рис. 2.

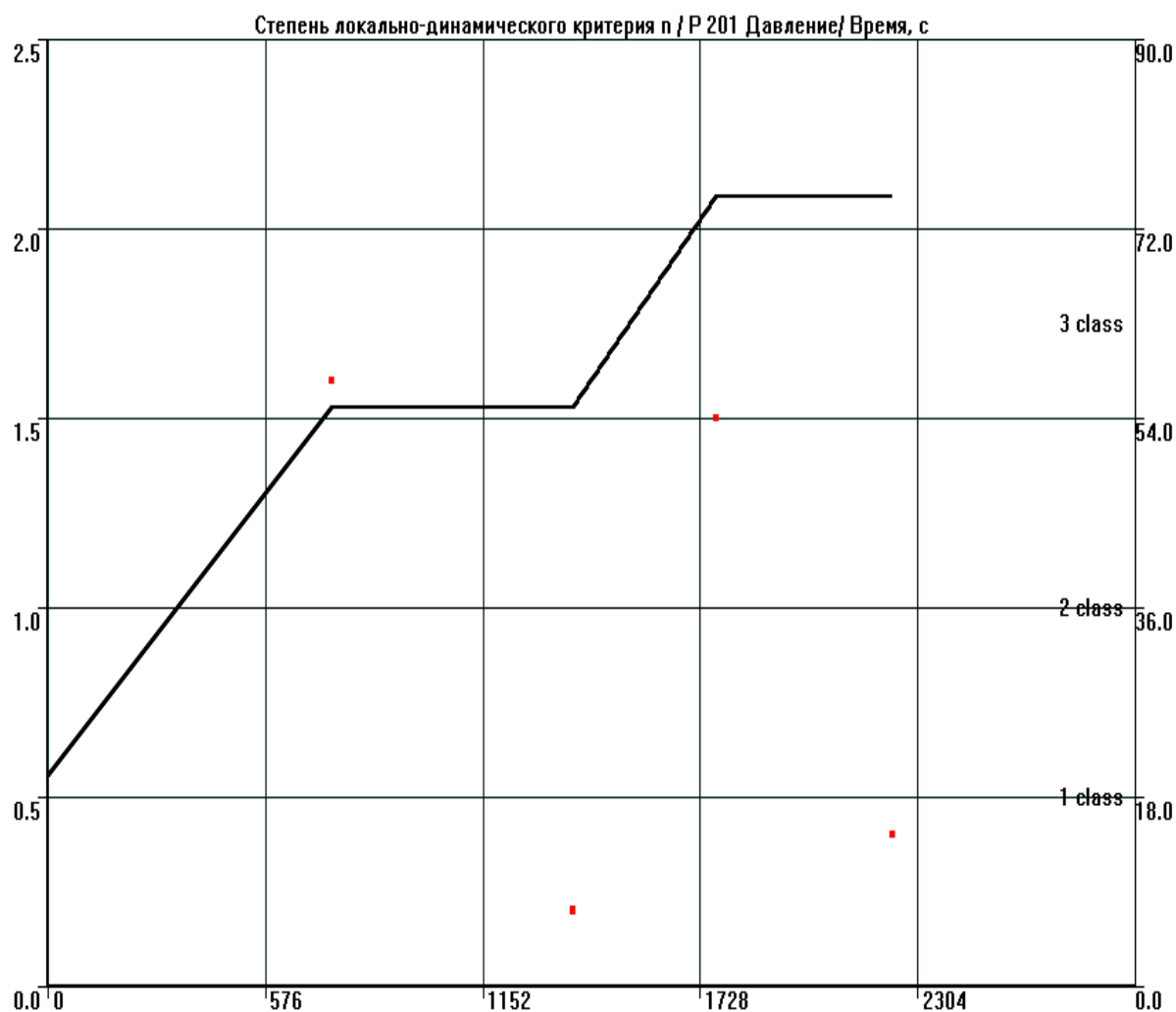


Рис. 2. Степень локально-динамического критерия n АЭ (точки) и характер изменения давления P (сплошная кривая) в ходе гидравлического испытания.

t – время испытания (сек)(при изменении нагрузки от 20 до 75 кг/см²).

Параметр n формируется на основе сопоставления индекса роста нагрузки (давления) и индексов роста со временем числа импульсов АЭ и их амплитуды.

При этом, если индекс нагрузки увеличивается, а индексы параметров АЭ уменьшаются, то это свидетельствует об отсутствии опасности разрушения.

Опасной является ситуация, когда по мере роста нагрузки растет и АЭ индекс и к завершению испытаний параметр $n > 1$, что соответствует 3 или даже 4 классу условной классификации по локально-динамическому критерию. В ходе гидроиспытания реактора Р-201 критерий n был меньше единицы.

После загрузки реактора катализатором было принято решение повторить испытание, но повести его как пневмоиспытания (азотом). А для уверенности в том, что система А-line (DDM) не «ошибается» параллельно с ней была подключена система АЭ ЭМА-2 совместного производства венгерского предприятия «Видеотон» и института Электросварки им Е.О. Патона НАН Украины.

Результаты испытания системой А-line (DDM) повторились, акустическая картина была такой же, как и при гидроиспытании, хотя уровень собственных шумов составлял 55 дБ. Такие же результаты были получены системой ЭМА-2, но точность локации этой системы была значительно хуже, чем системы А-line (DDM) (рис. 3).

На этот раз испытания были остановлены при 36 кг/см².

При этом амплитудный критерий соответствовал 2 классу, а локально-динамический – первому. Тем не менее было принято решение провести обследование мест наибольшей акустической активности методом ультразвуковой толщинометрии. В качестве толщинометра был использован прибор фирмы Krautkramer GmbH с разрешающей способностью 0,01 мм при измерении толщин до 100 мм. На локационной картине зафиксированных локационных импульсов АЭ (рис. 4) с целью проведения обследования методом ультразвуковой толщинометрии были выделены 4 участка (зоны А, Б, В и Г), проведено их увеличение с целью определения более четкой акустической структуры (рис. 5), определены их координаты и условные площади (рис. 5, таблица 1). Затем результаты определения координат выбранных зон были перенесены на внешнюю поверхность реактора и проведены необходимые измерения толщины стенки реактора.

Схема

установки датчиков и расположения участков повышенной АЭ, выявленных
акустико-эмиссионным методом контроля реактора Р-201,
установка ЛЧ24-2000 №2, цех №4.

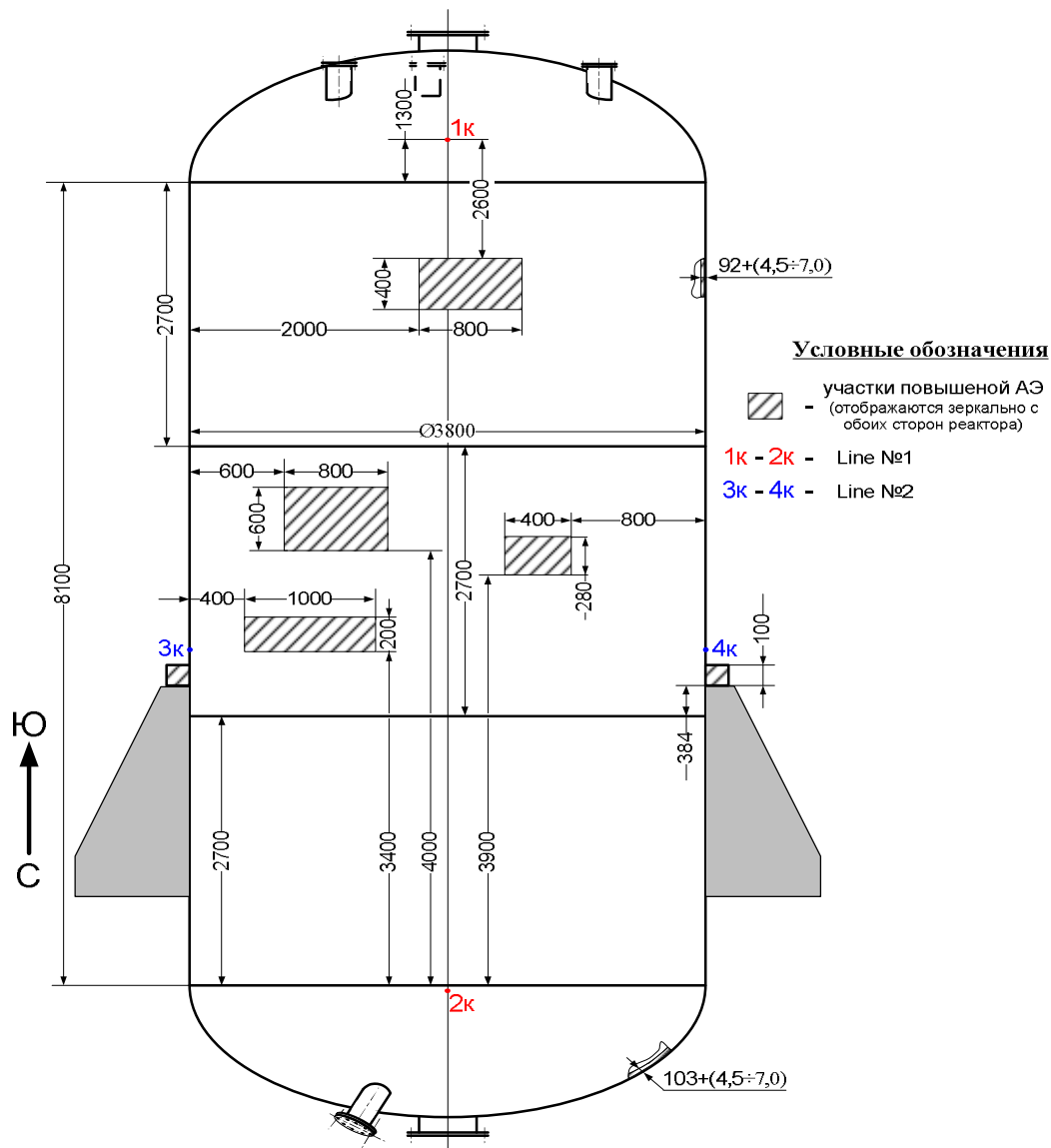


Рис. 3. Схема установки ПАЭ и результат АЭ обследования реактора
в ходе пневмоиспытаний аппаратурой ЕМА-2

В результате анализа полученных результатов показано, что во всех выбранных для обследования зонах повышенной акустической активности измеренное значение толщины стенки реактора на 1,0 – 1,7 мм меньше, чем толщина, измеренная в областях свободных от скоплений локационных импульсов, которая соответствовала номинальной толщине. Этот результат подтвердил наше первоначальное предположение о том, что в плакирующем

слое имеются расслоения, но вместе с тем дал основания утверждать, эти расслоения развились с внутренней стороны плакировки и затрагивают 1 – 3 слоя девятислойной рулонной плакировки. Обнаруженные дефекты плакировки не нарушают необходимую защиту от коррозии основного металла корпуса реактора, полностью обеспечивая его несущую способность при совместном воздействии на корпус рабочих температур и давления.

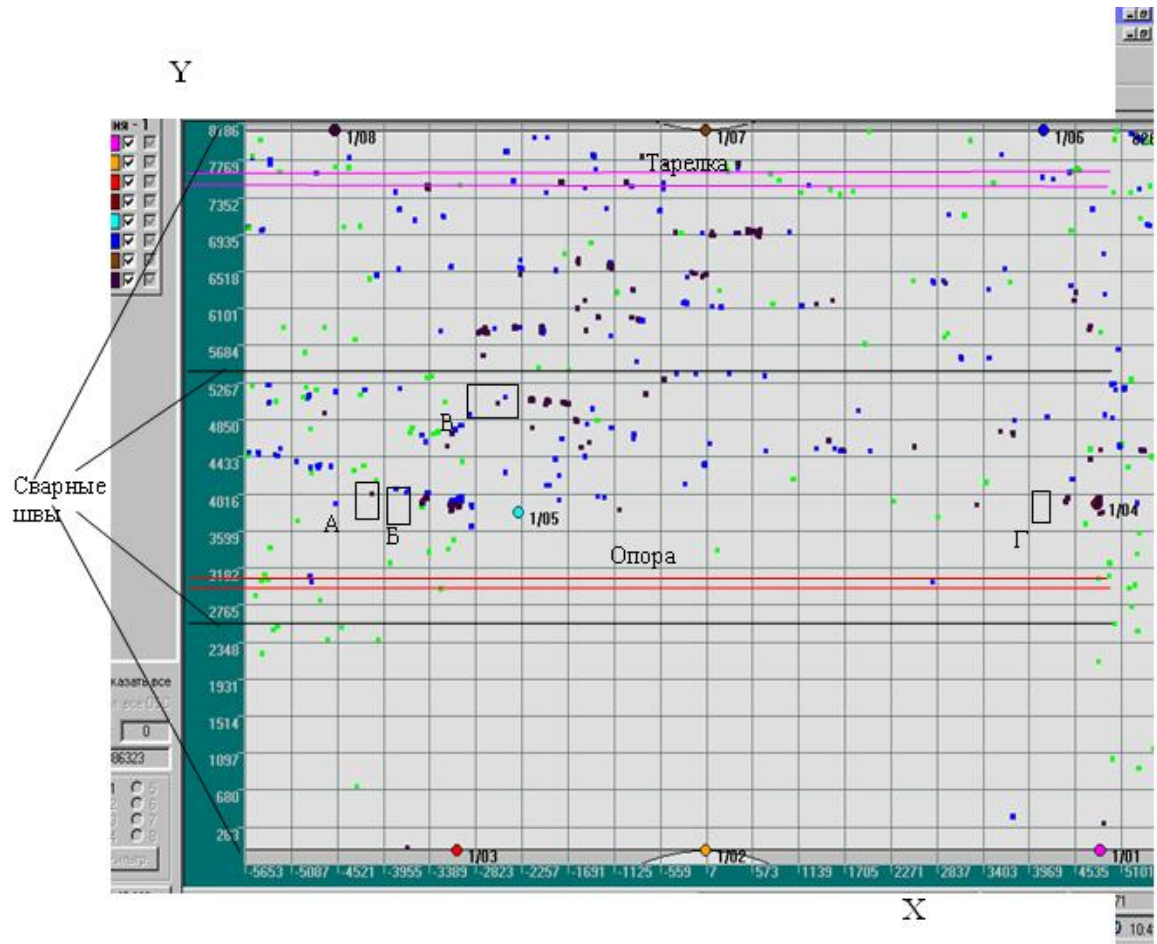


Рис. 4. Результат пневмоиспытания реактора Р-201 с использованием аппаратуры АЭ.А-Line DDM Буквами обозначены места наибольшей акустической активности

С целью определения более четкой акустической структуры мест наибольшей акустической активности было произведено их увеличение (рис. 5), определены их координаты и условные площади (рис. 5, таблица). Затем результаты определения координат выбранных зон были перенесены на внешнюю поверхность реактора и проведены необходимые измерения толщины стенки реактора. В ходе анализа полученных результатов показано, что во всех выбранных для обследования зонах повышенной акустической активно-

сти измеренное значение толщины стенки реактора на 1,0 – 1,7 мм меньше, чем толщина, измеренная в областях свободных от скоплений локационных импульсов, которая соответствовала номинальной толщине. Этот результат подтвердил наше первоначальное предположение о том, что в плакирующем слое имеются расслоения, но вместе с тем дал основания утверждать, эти расслоения развились с внутренней стороны плакировки и затрагивают 1 – 3 слоя девятислойной рулонной плакировки. Обнаруженные дефекты плакировки не нарушают необходимую защиту от коррозии основного металла корпуса реактора, полностью обеспечивая его несущую способность при совместном воздействии на корпус рабочих температур и давления.

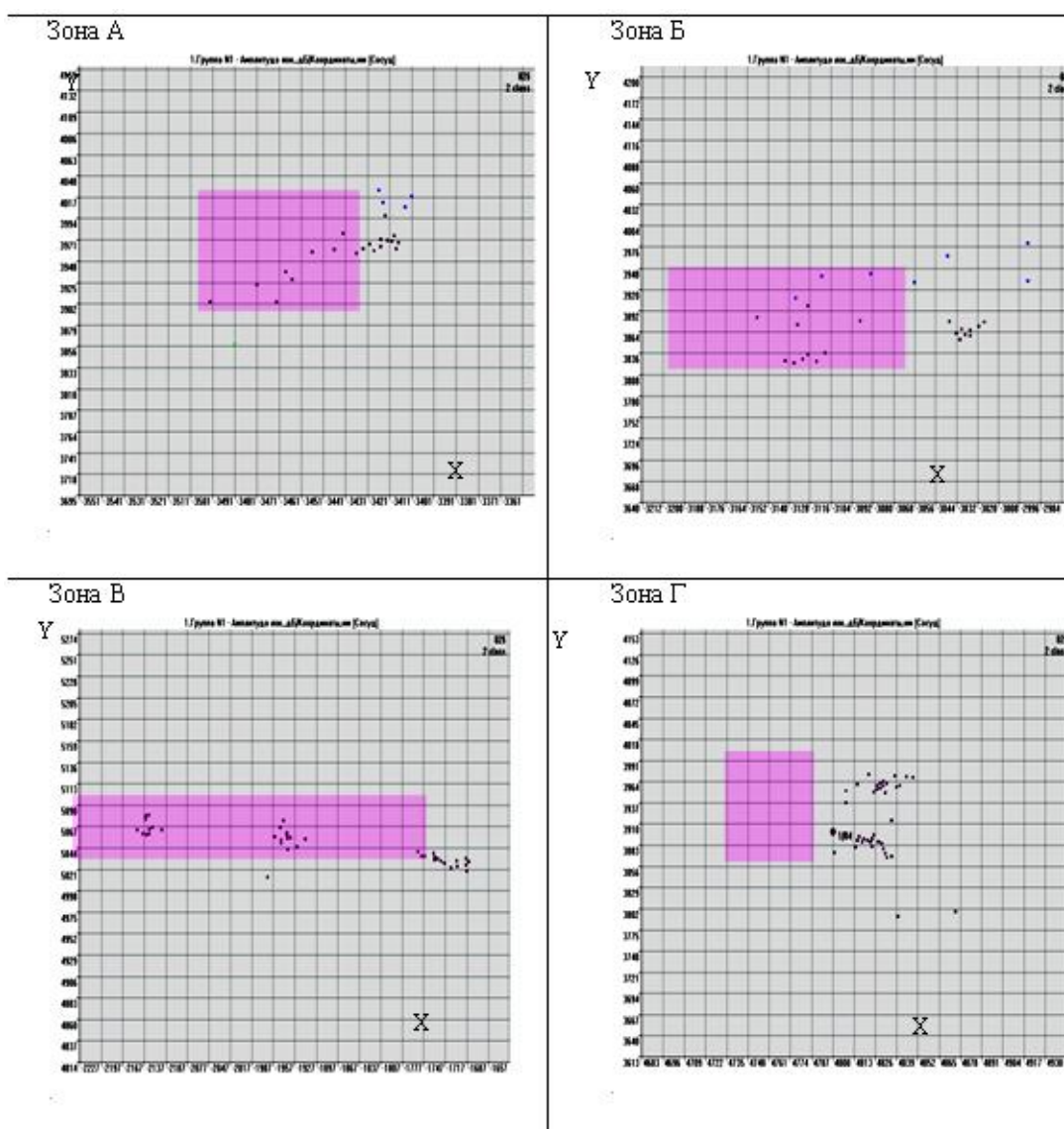


Рис. 5. Акустическая структура зон повышенной акустической активности (зоны А, Б, В и Г) в соответствии с рис. 4.

На рис. 1 скопления локационных импульсов обозначены розовым цветом. Ось X соответствует сварному шву приварки обечайки к нижнему днищу. Ось Y соответствует линии пересечения цилиндрической поверхности реактора и общей плоскости симметрии, проходящей через верхний и нижний отводы и штуцер № 1.

Таблица

Значения толщины стенки реактора в зонах высокой акустической активности и областях, близких к ним

Наименование зон высокой АЭ активности	А	Б	В	Г
Координаты зоны высокой активности	X {-3470; -3410}; Y{3900; 4030}	X {-3140; -3000}; Y{3810; 3950}	X {-2150; -1680}; Y{5020; 5080}	X {4800; 4850}; Y{3860; 3980}
Площадь зоны высокой активности	60x130 мм ²	140x140 мм ²	470x60 мм ²	50x120 мм ²
Толщина стенки в активной зоне, мм	102,0	102,0	100,7	101,4
Толщина стенки вне активной зоны, мм	103,1	103,0	102,4	102,5
Разность значений толщин, мм	1,1	1,0	1,7	1,1

Через два года реактор Р-201 снова был испытан пробным давлением в ходе пневмоиспытания с АЭ контролем.

От доказанной теоретической возможности эксплуатации реактора при более высокой температуре и давлении ввиду обнаруженных дефектов плакировки отказались. На этот раз давление было поднято до уровня, строго соответствующего паспортному испытательному давлению 59,8 кг/см². АЭ локационная картина повторилась. Амплитудный критерий соответствовал 4 классу, а локально-динамический – первому, локации выстроились в горизонтальные ряды. В качестве подтверждающей информации об отсутствии серьезной опасности для дальнейшей эксплуатации реактора был использован статистический критерий АЭ, связывающий относительную энтропию статистического распределения АЭ импульсов по амплитудам [5] (рис. 6).

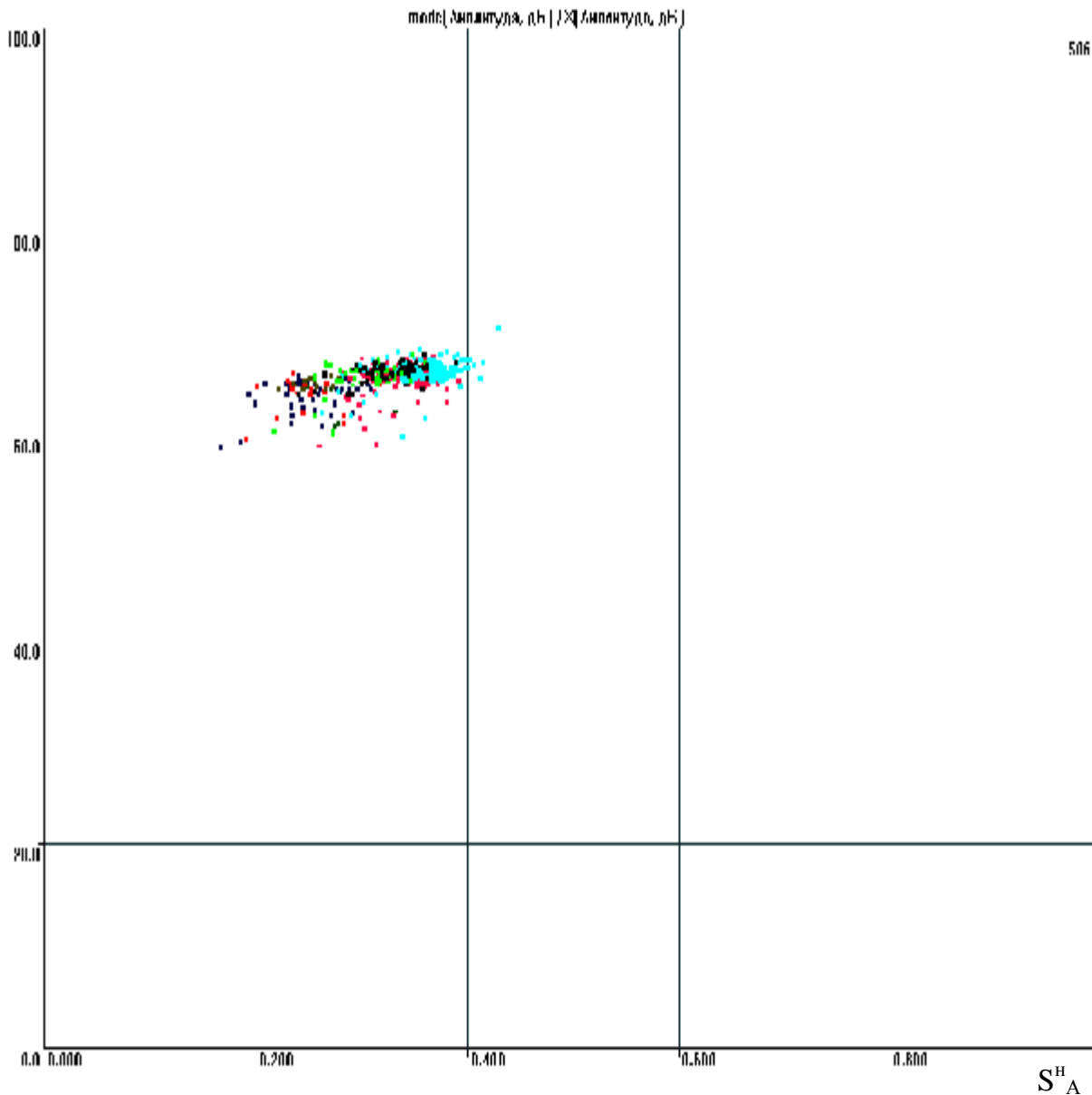


Рис. 6. Статистический критерий АЭ испытания, A_{mod} – наиболее вероятное значение амплитуды в выборке, S_A^H – относительная энтропия распределения амплитуд в выборке

В приведенной зависимости энтропия в ходе испытания находилась в интервале 0,2 – 0,4, что характеризует шумовое происхождение источников АЭ, которые, в то же время, обладали довольно высокой амплитудой.

Выводы. В результате проведения АЭ контроля в ходе испытаний пробным давлением реактора Р-201 сделаны следующие выводы:

- обнаружены множественные расслоения многослойного плакирующего покрытия, показано, что расслоения захватывают 1 – 3 слоя девятислойной

плакировки и поэтому их наличие не снижает антикоррозионной защиты основного металла конструкции реактора и не оказывает влияние на его несущую способность;

- многократные испытания реактора с использованием двух типов АЭ аппаратуры и получением идентичных результатов в обнаружении дефектов плакировки дают дополнительное обоснование действенности метода АЭ даже в том случае, когда с помощью методов неразрушающего контроля первоначально дефекты не были обнаружены;

- точность обнаружения зон повышенной акустической активности при высоте корпуса 8,1 м и длине развертки – 11,3 м была не хуже 10 – 20 мм, что подтверждено методом ультразвуковой толщинометрии;

- обнаруженные с помощью АЭ контроля дефекты плакировки стали основанием для недопущения реализации теоретического плана по увеличению рабочих температуры и давления, что, возможно, увеличит ресурс реактора при дальнейшей эксплуатации;

- показано, что нормативные документы, регламентирующие использование метода АЭ в Украине, имеют определенные недостатки, что вынуждает специалистов по АЭ контролю при формировании выводов использовать подходы, регламентированные нормативными документами других стран.

Список литературы: 1. Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги; ДСТУ 4046-2001. – [Чинний від 27.07.2001]. – К.: Держстандарт України, 2001. – 24 с. 2. *Долинский В.М.* Эффективность использования метода акустической эмиссии для оценки технического состояния оборудования нефтехимического производства / *В.М. Долинский, В.А. Кобзев, Д.Г. Рязов, В.Н. Стогний* // *Техн. диагностика и неразруш. контроль.* – 2007. – № 4. – С. 32 – 36. 3. Правила будови і безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском; НПАОП 0.00-1.07-94. – [Затверджено 18.10.94]. – К.: – Держнаглядохоронпраці, 1998. – 373 с. 4. Настанови щодо проведення акустико-емісійного діагностування об'єктів підвищеної небезпеки; ДСТУ 4227-2003. – 25 с. 5. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов; ПБ 03-593-03. – Серия 03. – Выпуск 38 / Колл. авт. – М.: Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2003. – 56 с. 6. *Грешников В.А.* Акустическая эмиссия. Применение для испытания материалов и изделий / *В.А. Грешников, Ю.В. Дробот.* – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 272 с. 7. *Елизаров С.В.* Новинки программного обеспечения АЭ систем семейства А-Line / *С.В. Елизаров, А.В. Букатин, М.Ю. Ростовцев, Д.А. Терентьев* // *В мире НК.* – 2008. – № 3(41).

Поступила в редколлегию 25.03.10

В.М. ДОЛИНСКИЙ, канд. техн. наук, **В.Г. ИВАНОВ**,
ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина
Л.Д. МИЩЕНКО, канд. техн. наук,
ОАО «Турбинный завод», г. Харьков, Украина
Е.Я. ВЕКслЕР, канд. техн. наук, **Н.К. ЗАПЛОТИНСКИЙ**,
«Энергоналадка Киевэнерго», г. Киев, Украина

ПРОДЛЕНИЕ РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДА ПРИРОДНОГО ГАЗА В ОДЕССКОМ ПРИПОРТОВОМ ЗАВОДЕ

Трубопровод Одесского припортового завода відпрацював $2,5 \times 10^5$ годин. Трубопровод виготовлений із вуглецевої сталі імпортного виробництва та піддавався експлуатації при температурі 490 °С. Експлуатація вуглецевих сталей при указаній температурі вітчизняними нормами не передбачена. Проведені різносторонні дослідження, що дозволили прогнозувати подальшу безаварійну роботу трубопроводу.

Трубопровод Одесского припортового завода отработал $2,5 \times 10^5$ часов. Трубопровод изготовлен из углеродистой стали импортного производства и подвергался эксплуатации при температуре 490 °С. Эксплуатация углеродистых сталей при указанной температуре отечественными нормами не предусмотрена. Проведенные разносторонние исследования, которые позволили прогнозировать дальнейшую безаварийную работу трубопровода.

The pipeline Odessa port plant, worked for 2.5×10^5 hours. The pipeline is made of carbon steel imported and exploited at a temperature of 490 °С. Operation of carbon steels at this temperature by national standards is not provided. Past Comprehensive studies, which allowed to predict the further trouble-free operation of the pipeline.

Трубопровод транспортирует природный газ после предварительного подогрева в печь риформинга. Схема трубопровода приведена на рис. 1.

Трубопровод изготовлен из стали SA 106 GrV импортного производства.

Трубопровод эксплуатируется под давлением $p = 3,84$ МПа при температуре 490 °С.

Сопоставление химического состава металла трубопровода (таблица) с составом возможных отечественных аналогов показала, что рассматриваемый металл относится к классу углеродистых сталей, эксплуатация которых при указанной температуре не предусмотрена [1].

Поскольку к моменту обследования трубопровод выработал ресурс око-

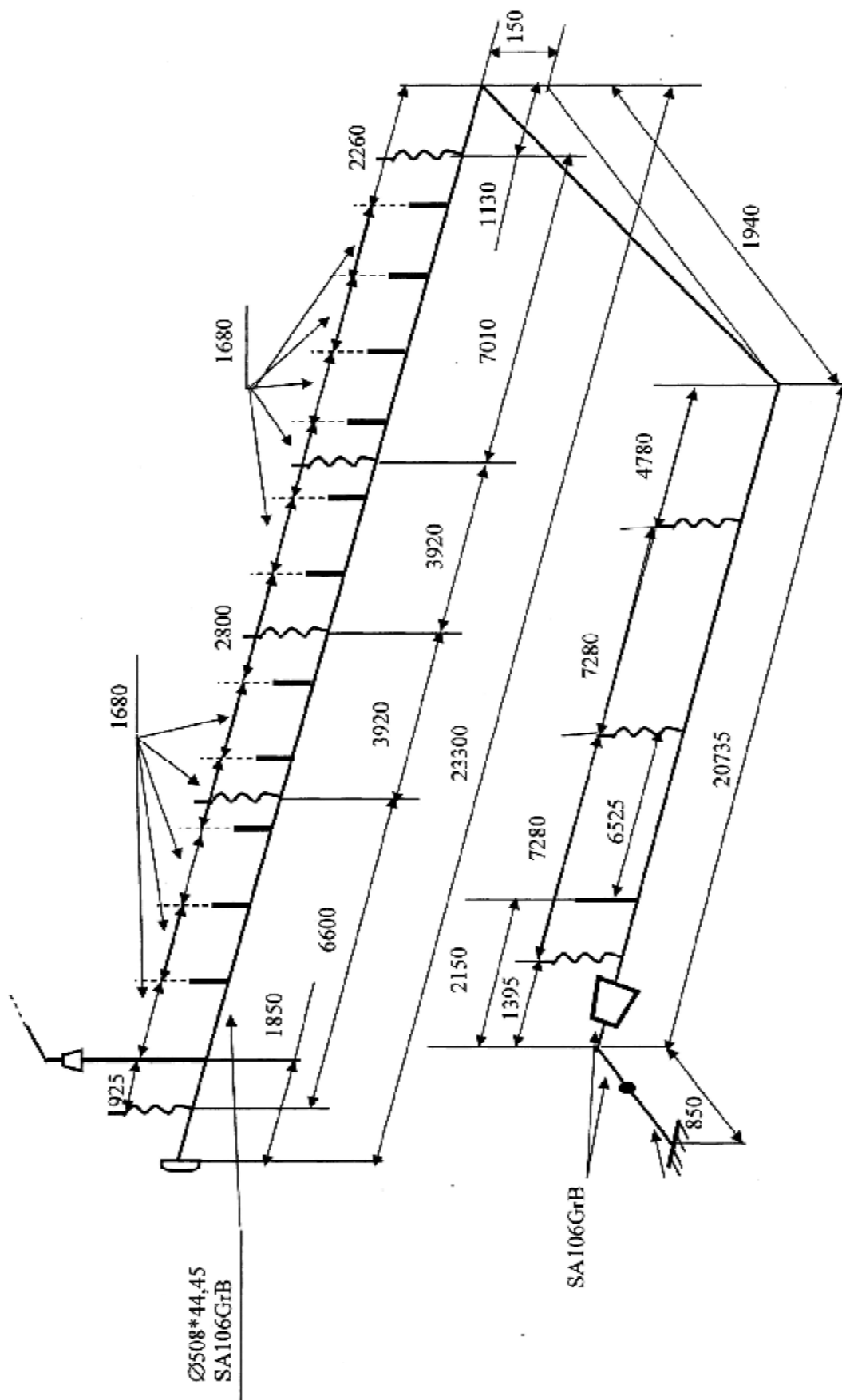


Рис. 1. Трубопровод природного газа

ло $2,5 \times 10^5$ часов, возникла необходимость исследования металла трубопровода, которая бы позволила оценить и прогнозировать работоспособность трубопровода.

В соответствии с РТМ [2] были выполнены расчеты на прочность, которые показали, что максимальные напряжения не превосходят $\sigma = 22,8$ МПа.

Таблица

Химический состав

	Содержание химических элементов, %							
	C	S	P	Si	Mn	V	Al	As
Исслед. металл	0,20	0,029	0,006	0,23	0,78	0,002	0,03	0,02
SA106GrB	$\leq 0,3$	0,058	0,048	$\leq 0,1$	1,06	-	-	-
Вст3Гпс	0,14 0,22	$\leq 0,05$	$\leq 0,04$	$\leq 0,15$	0,8 1,4	-	-	-
Сталь 20	0,17 0,24	$\leq 0,04$	$\leq 0,035$	0,17 0,37	0,35 0,65	-	-	$\leq 0,08$
	Содержание химических элементов, %							
	W	Ti	Nb	Cr	Ni	Cu	Mo	
Исслед. металл	0,01	0,002	0,002	0,1	0,08	0,14	0,02	
SA106GrB	-	-	-	-	-	-	-	
Вст3Гпс	-	-	-	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	-	
Сталь 20	-	-	-	$\leq 0,25$	$\leq 0,3$	$\leq 0,3$	-	

Были выполнены металлографические исследования на образцах трубопровода не подвергавшегося эксплуатации и эксплуатирующегося 18 и 25 лет. Сопоставление результатов металлографических исследований показало, что через 25 лет эксплуатации обнаруживается начальная стадия выделения карбидов на границах зерен. При этом уровень сфероидизации не превышает 2 – 3 балла [3], что является удовлетворительным. Были выполнены также испытания на длительную твердость (рис. 2), которые показали, что длительная твердость при эксплуатации за 25 лет снизилась незначительно, на 12 %. Окончательная оценка работоспособности трубопровода была получена при испытании на длительную прочность и пластичность образцов, вырезанных из трубы, проработавшей 25 лет (рис. 3 – 5).

Предел длительной прочности на последующие 10^5 часов составил $R_{mt}^T = 56,7$ МПа. При этом обеспечиваются достаточно высокие пластические свойства – относительное сужение и относительное удлинение – порядка 20 %.

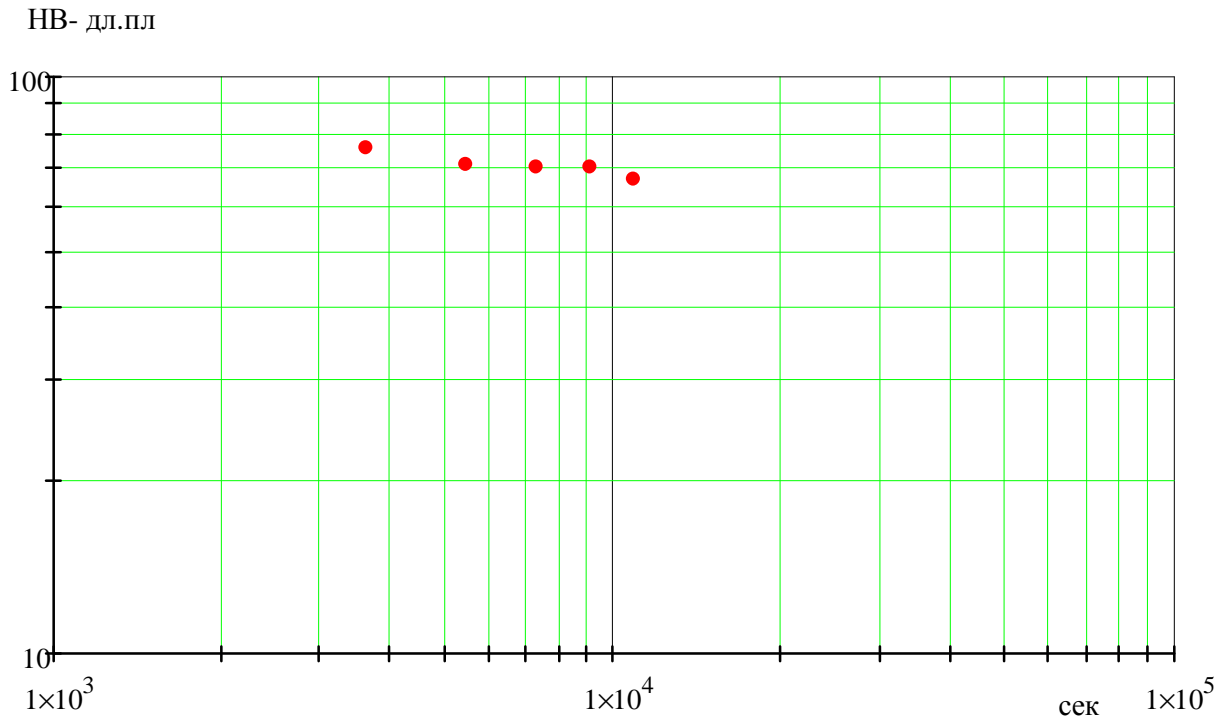


Рис. 2. Длительная твердость

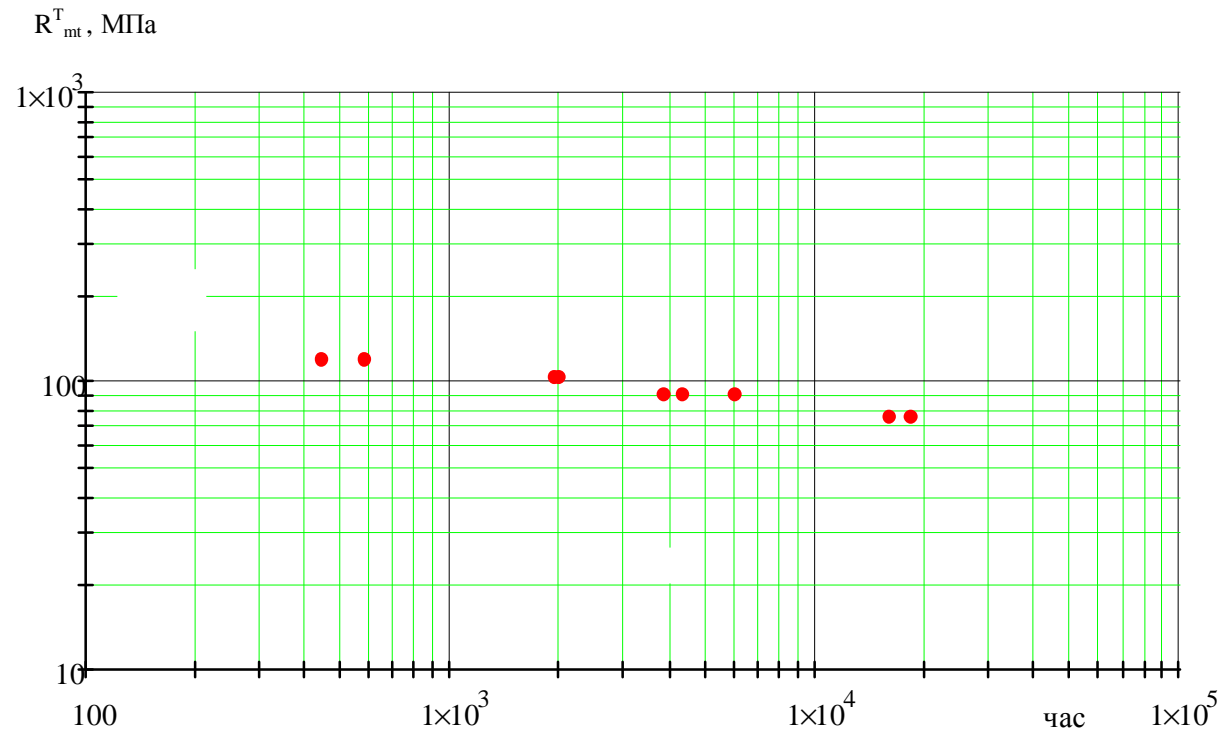


Рис. 3. Длительная прочность стали SA106GrB

Таким образом, удалось обосновать дальнейшую эксплуатацию трубы из

углеродистой стали при температуре 490 °С при достаточно большом запасе прочности $\sigma < R_{mt}^T$, 22,8 МПа < 56,7 МПа.

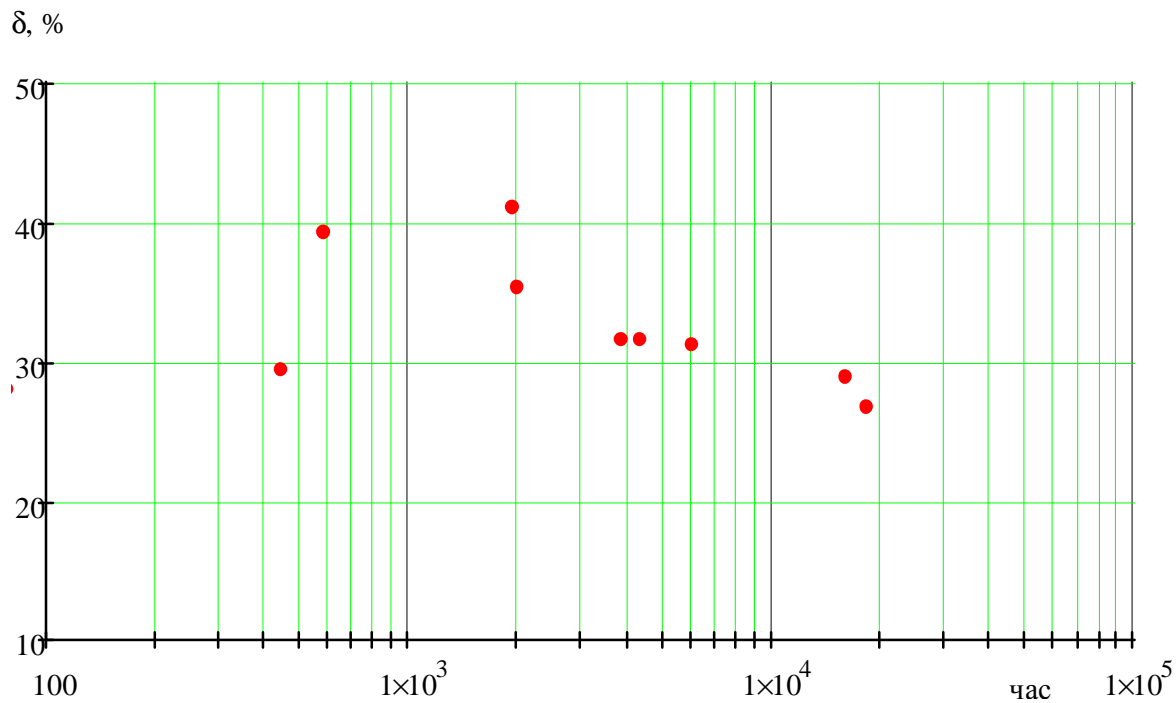


Рис. 4. Относительное удлинение стали SA106GrB

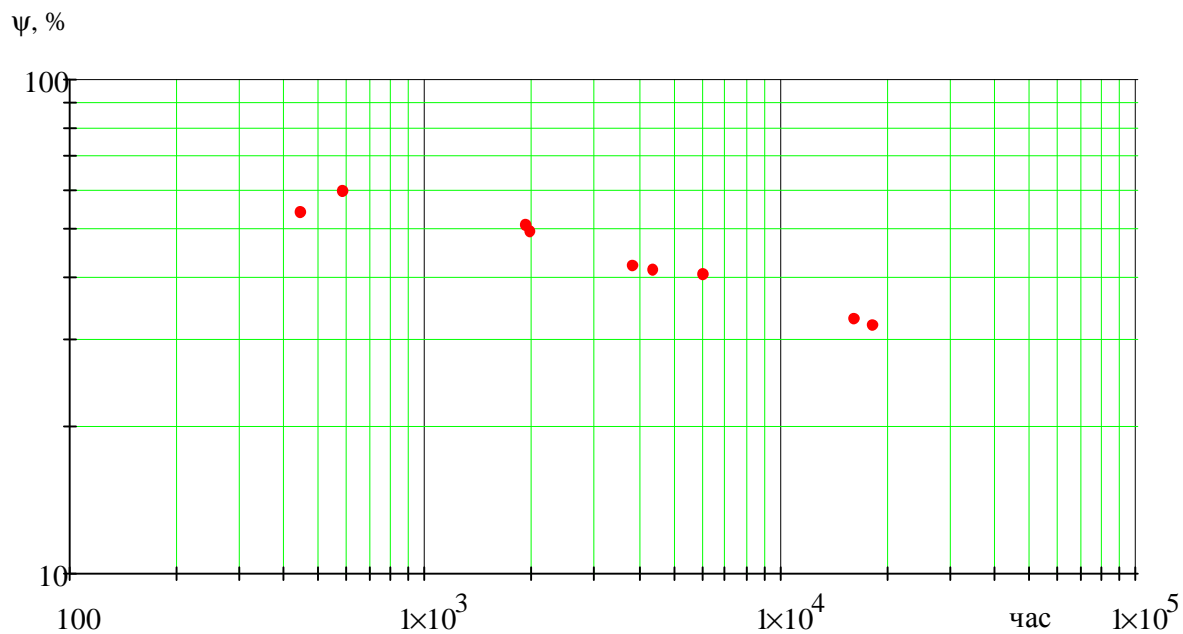


Рис. 5. Относительное сужение стали SA106GrB

Трубопровод допущен к длительной эксплуатации с регулярным контролем структуры металла методами полевой металлографии.

Список литературы: 1. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность; ГОСТ 14249-89. – [Дата введения 01.01.90]. – Издательство стандартов, 1989. – 79 с. 2. Указания по расчету на прочность и вибрацию технологических стальных трубопроводов; РТМ 38.001-94. – [Дата введения 26.12.94]. – 97 с. 3. Металл паросилового оборудования. Методы металлографического анализа в условиях эксплуатации; ОСТ 34-70-690-96. – Стандарт отрасли. [Дата введения 1997-07-01]. – 44 с.

Поступила в редколлегию 25.03.10

УДК 620.16.001.24

П.С. МАРЧЕНКО, канд. техн. наук, ОАО «УкрНИИхиммаш»,
г. Харьков, Украина

РАСЧЕТ УГЛА ПОВОРОТА ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ФЛАНЦА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗКИ БОЛТА

Виведено диференціальну залежність, яка описує кут повороту поперечного перетину фланця під дією одного болта. Показано як можна використати цю залежність при розрахунках герметичності фланцевих з'єднань, які мають малу кількість болтів.

Получено дифференциальное уравнение, которое описывает угол поворота поперечного сечения фланца под действием нагрузки одного болта. Показано как можно использовать эту зависимость при расчетах герметичности фланцевых соединений, имеющих малое число болтов.

Differential equation that describes cross-section rotation angle of the shale under the influence of the one bolt was received. This equation can be used for impermeability calculation of the shale combinations with small number of bolts.

При оценке герметичности фланцевого соединения используется угол поворота поперечного сечения фланца, который вычисляется по формуле [1]:

$$\theta = \frac{12M_{\phi}R}{Eh^3 \ln(D_n/D)}, \quad (1)$$

где M_{ϕ} – изгибающий момент, равномерно распределенный вдоль окружности центров тяжести поперечного сечения фланцевого кольца; R – радиус окружности центров тяжести поперечного сечения кольца $R = (D_n + D) / 4$; D_n , D – наружный и внутренний диаметры фланца; h – высота фланцевого кольца; E – модуль продольной упругости материала фланца.

Изгибающий момент M_{ϕ} создается болтами или шпильками, которые установлены на некотором расстоянии друг от друга. Более равномерное распределение изгибающего момента достигается тогда, когда имеется большое число болтов расположенных сравнительно близко друг от друга. Если же установлено мало болтов, и они расположены сравнительно далеко друг от друга, то изгибающий момент, возникающий в зоне установки болтов, может быть больше, чем между болтами. Это, в свою очередь, может оказать влияние на величину угла поворота поперечного сечения фланца.

Чтобы оценить это явление, рассмотрим деформации фланцевого кольца под действием нагрузки P_{ϕ} , которую создает один болт (рисунок).

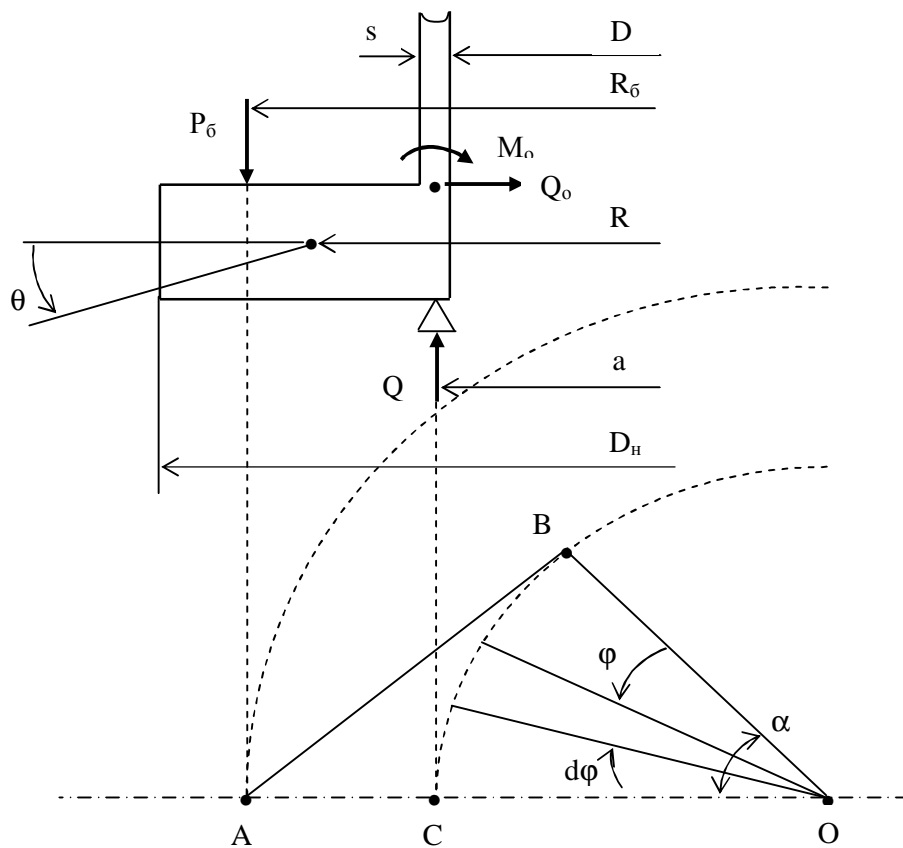


Рисунок – Схема нагружения фланца в зоне установки болта

Если фланец удерживает присоединенная к нему цилиндрическая оболочка, то в этом месте действует реактивная нагрузка Q , которая распространяется только вдоль дуги BC .

Угол α , характеризующий эту дугу, можно определить из следующих геометрических соотношений:

$$AB^2 = OA^2 - OB^2 = R_6^2 - a^2, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{AB}{OB} = \frac{\sqrt{R_6^2 - a^2}}{a},$$

где R_6 – радиус болтовой окружности; a – средний радиус присоединенной цилиндрической оболочки $a = (D + s)/2$; s – толщина присоединенной цилиндрической оболочки.

После преобразования получаем:

$$\alpha = \operatorname{arg} \operatorname{tg} \sqrt{\gamma^2 - 1},$$

где γ – безразмерный коэффициент $\gamma = R_6 / a$.

Будем полагать, что реакция опоры Q распределена вдоль указанной дуги по закону синуса:

$$Q = Q_{\max} \sin \xi, \quad (2)$$

где ξ – приведенная координата сечения $\xi = \pi \varphi / 2 \alpha$; φ – угловая координата сечения, которую будем отсчитывать от точки B ; Q_{\max} – максимальное значение нагрузки Q , которое возникает при $\varphi = \alpha$ (в том сечении, где установлен болт).

Воспользовавшись условием равновесия фланца $P_6 = 2 \int_0^{\alpha} Q a d\varphi$, можно получить максимальное значение:

$$Q_{\max} = \pi P_6 / 4 \alpha a. \quad (3)$$

Возникающие, при этом, нагрузки M_0 и Q_0 прямо пропорциональны углу поворота θ и вычисляются по формулам [1]:

$$M_0 = 2 \beta D_{\text{ц}} \theta, \quad Q_0 = 2 \beta^2 D_{\text{ц}} \theta, \quad (4)$$

где β – характеристика присоединенной оболочки $\beta = \sqrt{\frac{\sqrt{3(1-\mu^2)}}{as}}$; $D_{\text{ц}}$ – ци-

линдрическая жесткость оболочки $D_{\text{ц}} = \frac{Es^3}{12(1-\mu^2)}$; μ – коэффициент Пуассона.

Рассмотрим теперь нагрузки участка фланца длиной $dL = R d\varphi$. Если в начале участка в его поперечном сечении возникает крутящий момент M , то приращение этого крутящего момента можно вычислить по формуле:

$$dM = Qad\varphi(R - a) - M_0ad\varphi - Q_0ad\varphi\frac{h}{2}.$$

Для определения крутящего момента, возникающего на расстоянии φ от начала координат, необходимо вычислить интеграл:

$$M = \int_0^{\varphi} [Q(R - a) - M_0 - Q_0\frac{h}{2}]ad\varphi.$$

Подставляя (2 ÷ 4) в это уравнение, после интегрирования, можно получить:

$$M = \frac{P\bar{b}}{2}(R - a)(1 - \cos\xi) - K \int_0^{\varphi} \theta d\varphi,$$

где K – коэффициент противодействия оболочки изгибу фланца:

$$K = 2\beta a D_{\text{ц}} \left(1 + \frac{\beta h}{2} \right).$$

Приращение угла закручивания поперечного сечения фланца на элементарном участке длиной dL можно вычислить по формуле:

$$d\theta = \frac{MRd\varphi}{GJ_K},$$

где G – модуль упругости при сдвиге, $G = E / 2 (1 + \mu)$; J_K – момент инерции на кручение поперечного сечения фланца $J_K = k b h^3$; k – коэффициент, $k \approx \min\{0,333; [1 - e^{-(0,235+0,065\ln(b/h))}]\}$; e – основание натуральных логарифмов; b – ширина фланца $b = (D_H - D) / 2$.

Для определения угла закручивания поперечного сечения фланца, возникающего на расстоянии φ от начала координат, необходимо вычислить интеграл:

$$\theta = \int_0^{\varphi} d\theta = C(\xi - \sin \xi) - q^2 \int_0^{\xi} \left(\int_0^{\xi} \theta d\xi \right) d\xi, \quad (5)$$

где C, q – безразмерные коэффициенты:

$$C = \frac{\alpha P_6 R (R - a)}{\pi G J_K}, \quad q^2 = \frac{K R}{G J_K} \left(\frac{2\alpha}{\pi} \right)^2.$$

Если пренебрегать влиянием оболочки, присоединенной к фланцу, или рассматривать кольцо свободное не имеющее присоединенной оболочки, то в уравнении (5) надо принять $q = 0$. При этом угол закручивания свободного кольца под действием единичной болтовой нагрузки вычисляется по формуле:

$$\theta = C(\xi - \sin \xi). \quad (6)$$

Если возникает необходимость учитывать влияние присоединенной оболочки, то продифференцируем дважды уравнение (5) по ξ и получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2\theta}{d\xi^2} + q^2\theta = C \sin \xi.$$

Решением данного уравнения будет зависимость:

$$\theta = C_1 \sin q\xi + C_2 \cos q\xi + \frac{C}{q^2 - 1} \sin \xi,$$

в которой постоянные интегрирования C_1, C_2 можно вычислить из условий:

$$\theta(0) = 0, \quad \frac{d\theta}{d\xi} \left(\frac{\pi}{2} \right) = 0.$$

Поскольку, при этом $C_1 = C_2 = 0$, то с учетом влияния присоединенной оболочки угол закручивания фланца вычисляется по формуле:

$$\theta = \frac{C}{q^2 - 1} \sin \xi. \quad (7)$$

Если отсчет угловой координаты φ производить из точки установки болта (из точки А на рис. 1), то надо принять:

$$\xi = \pi / 2 - \zeta,$$

где ζ – безразмерная координата, отсчет которой ведется от места установки болта $\zeta = \pi \varphi / 2 \alpha$, а угловая координата φ отсчитываемая от точки установки болта.

В таком случае, зависимости (6) или (7) преобразуются к виду:

$$\theta = C\left(\frac{\pi}{2} - \zeta - \cos \zeta\right), \quad \theta = \frac{C}{q^2 - 1} \cos \zeta. \quad (8)$$

Поскольку на фланце установлено не один болт, для определения угла закручивания в зоне болта θ_b и между болтами θ_m необходимо суммировать составляющие, полученные по формулам (8) для всех болтов, которые находятся в интервале $\pm\alpha$ от рассматриваемого сечения.

Выводы.

При расчетах фланцевых соединений, имеющих малое число болтов, вместо зависимости (1) рекомендуется использовать зависимость:

$$\theta = \frac{\kappa_{бм} 12M_{\phi} R}{Eh^3 \ln(D_H / D)},$$

где $\kappa_{бм}$ – коэффициент влияния шага болтов на угол закручивания фланца, который вычисляется по формуле:

$$\kappa_{бм} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\theta_b}{\theta_m} \right).$$

Список литературы: 1. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов / С.П. Тимошенко. – М.: Изд. “Наука”, 1965. – Том II. – 480 с.

Поступила в редколлегию 25.03.04

В.М. ДОЛИНСКИЙ, канд. техн. наук, ОАО «УкрНИИхиммаш»,
г. Харьков

ОСОБЕННОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СОСУДОВ

Прогнозування залишкового ресурсу потребує використання існуючої нормативної бази, з уточненням на можливість деградації властивостей металу та конструкції посудин. В статті наведені існуючі розробки в указаному напрямі та позначені шляхи подальшого розвитку методів індивідуального прогнозування.

Прогнозирование остаточного ресурса требует использования существующей нормативной базы с уточнением на возможность деградации свойств металла и конструкции сосуда. В статье приведены существующие разработки в указанном направлении и намечены пути дальнейшего развития методов индивидуального прогнозирования.

Forecasting of a residual resource demands use of available normative base with specification on an opportunity of degradation of properties of metal and a design of vessels. Available development in the specified direction are named and ways of the further development of methods of individual forecasting are planned.

Гарантированный ресурс сосуда определяется условиями прочности.
В соответствии с [1] выбирается толщина стенки сосуда:

$$S_0 = S_p + V \cdot \tau + \Delta_1 + \Delta_2 \quad (1)$$

здесь S_0 – номинальная толщина стенки обечайки; S_p – расчетная толщина; V – скорость коррозии; τ – гарантированный ресурс; Δ_1 – прибавка на отрицательный допуск проката; Δ_2 – прибавка округления к стандартному значению толщины листа.

В простейшем случае (относительно низких температур ползучесть отсутствует), когда сосуд подвергается только действию внутреннего давления и условия укрепления отверстий соблюдаются, расчетная толщина стенки обечайки определяется по формуле:

$$S_p = D \cdot P_p / (2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]), \quad (2)$$

где $[\sigma] = \min\{R_{np}/[n_{np}]\}$; $R_{np} = \{R_m, R_e\}$; $[n_{np}] = \{[n_m], [n_e]\}$; D – диаметр обечайки; P_p – расчетное давление; φ – коэффициент прочности сварного шва; $[\sigma]$ – допускаемые напряжения; $[R_{np}]$ – предельные характеристики; R_m – предел прочности; R_e – предел текучести; $[n_{np}, n_m, n_e]$ – допускаемые запасы прочности.

Поверхностный анализ описанного подхода говорит о том, что гарантированный ресурс является и окончательным сроком эксплуатации, а продление ресурса возможно в пределах прибавки округления – нескольких лет. Однако, мировой опыт показал, что ресурс оборудования может быть продлен на 20 – 30 лет, даже при работе в особо тяжелых условиях со взрывопожароопасными и токсичными средами.

Проанализируем детально имеющиеся резервы работоспособности конструкции. Конечно, и прибавка на толщину проката может оказаться положительной, но более ощутимые результаты можно получить, если предприятие принимает меры к снижению агрессивности среды, уменьшению скорости коррозии. Коэффициент прочности сварного шва может быть увеличен за счет контроля качества сварных швов и проведения ремонта дефектных участков.

Значительный резерв прочности может быть обнаружен при экспериментальном построении характеристики сосуда «деформация стенки – давление» (рис. 1) – в соответствии с [2, 3]. Остаточный ресурс (τ_0) при этом может быть определен по формуле:

$$\tau_0 = (S/V) \cdot \{1 - [n_r] \cdot (P_p/P_e) \cdot ([\sigma_{20}]/[\sigma_t])\} \quad (3)$$

здесь S – минимальная толщина стенки; V – максимальная скорость коррозии, определенная в соответствии с [4]; P_e – давление текучести; $[\sigma_{20}]$, $[\sigma_t]$ – допускаемые напряжения при 20 °С и при расчетной температуре; $[n_r]$ – запас прочности при пробных испытаниях [1].

Как следует из изложенного, проблема продления ресурса оборудования имеет положительные перспективы. Однако, при этом надо учесть ряд обстоятельств, требующих дополнительного анализа.

В результате эксплуатации происходит деградация конструкции и изменение механических свойств металла.

Металл охрупчивается.

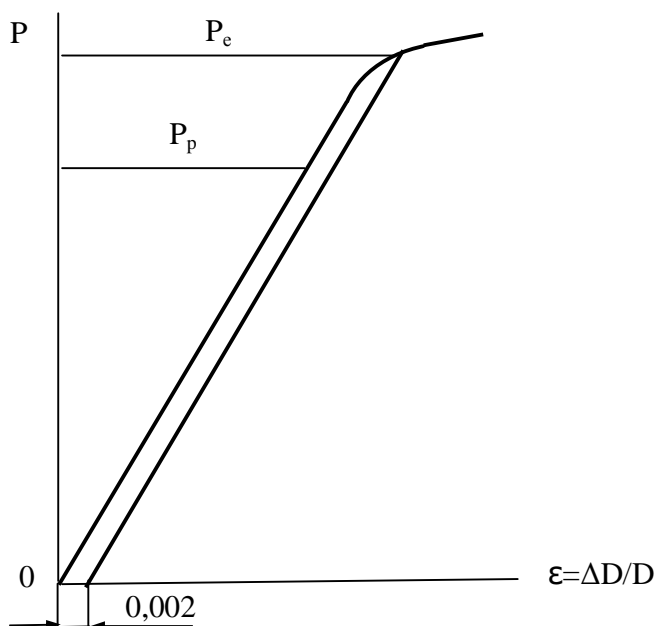


Рис. 1. Характеристика стенки сосуда « деформация стенки (ϵ) – давление (P)»

Например, температура хрупкости стали 09Г2С, из которой был изготовлен корпус колонны К-2 на АО «Укртатнафта», за 29 лет эксплуатации повысилась от $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+16\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В таком случае предельное состояние конструкции определяется по двухпараметрической кривой (рис. 2).

При этом предельными характеристиками металла являются предел текучести и вязкость разрушения [5, 6, 7].

Дальнейшее совершенствование оценки работоспособности конструкций сдерживает крайне скудная информация о значениях вязкости разрушения в агрессивных средах.

Происходит также избирательное коррозионно-эрозионное разрушение стенки конструкций. Оценка работоспособности оборудования при этом производится по [8].

На стенках сосудов и трубопроводов появляются вздутия, вызванные расслоением металла в результате водородной и сероводородной коррозии. Возникающие дефекты также могут быть оценены по [8].

Опасность коррозионного растрескивания (КР) под напряжением снижается при проведении термо или гидрообработки [9].

Возможность развития трещин и трещиноподобных дефектов оценивается по [10].

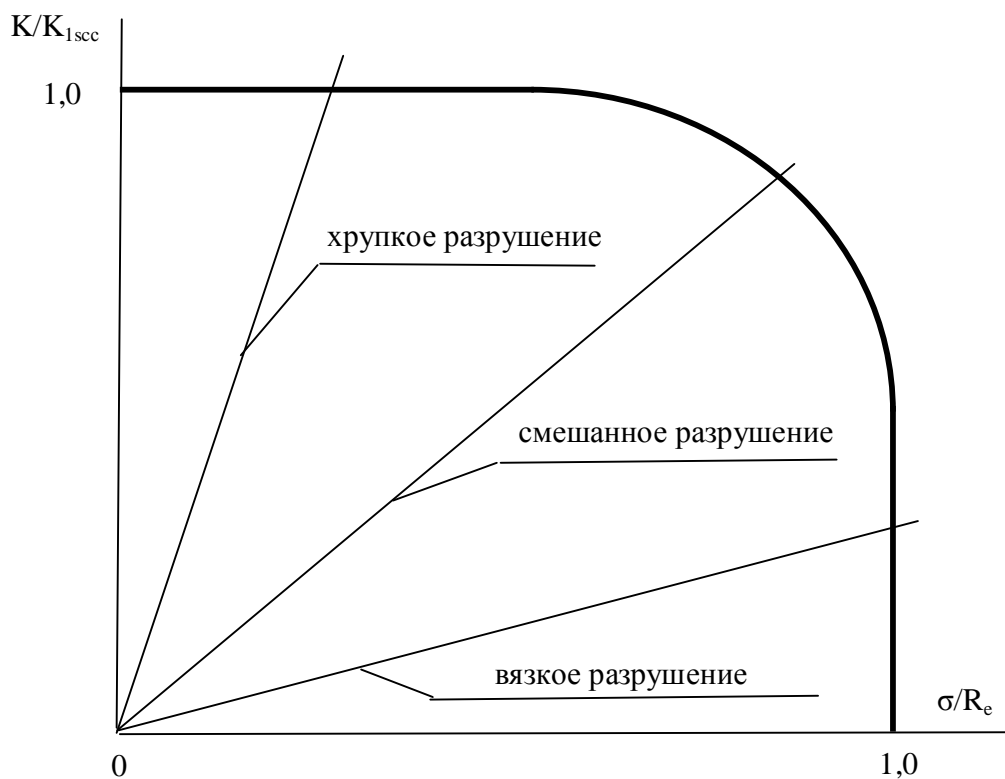


Рис. 2. Двухпараметрическая кривая
 K , K_{1scc} – коэффициент интенсивности напряжений и вязкость разрушения
 в агрессивной среде; σ , R_e – эквивалентные мембранные напряжения
 и предел текучести

Отклонение конструкции от формы идеальных оболочек приводит к значительному повышению напряжений в сосуде.

Поэтому необходимо выполнять расчеты с учетом имеющихся дефектов формы [11].

Выводы.

С учетом изложенного УкрНИИхиммаш продлил ресурс более, чем трем тысячам сосудов и трубопроводов.

Список литературы: **1.** Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность; ГОСТ 14249-89. – [Дата введения 01.01.90]. – Издательство стандартов, 1989. – 79 с. **2.** Проведение работ по оценке остаточной работоспособности технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств. Методические указания; НПАОП 0.00-7.02-93. – [Утвержден 19.05.1993]. – К.: Госнадзорхрантруда. – 1993. – 56 с. **3.** Сосуды. Аппараты. Трубопроводы. Гидрообработка; СОУ ОАО “УкрНИИхиммаш” 004:2009. – [Дата введения 10.08.2009]. – Харьков: Стандарт предприятия, 2009. – 12 с. **4.** Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні

вимоги; ДСТУ 4046-2001. – [Чинний від 27.07.2001]. – К.:Держстандарт України, 2001. – 24 с. **5.** Расчет на прочность действующих магистральных трубопроводов с дефектами; ВБН В.2.3.-00018201.04-2000. – [Введен в действие с 2000-01-05]. – К.: Госнефтегазпром, 2000. – 56 с. **6.** *Красовский А.Я.* Применения критериальных диаграмм разрушения для оценки несущей способности конструктивных элементов с трещиной / *А.Я. Красовский* // Заводская лаборатория. – 1989. – № 4. – С. 89 – 92. **7.** *Морозов Е.М.* Двухкритериальные подходы в механике разрушения / *Е.М. Морозов* // Пробл. прочности. – 1985. – № 10. – С. 103 – 108. **8.** Сосуды. Аппараты. Трубопроводы. Нормы и методы расчета на прочность. Определение допускаемых параметров повреждения стенок сосудов и трубопроводов; СОУ “УкрНИИхиммаш” 001:2009. – [Чинний від 2009-02-02]. – Харьков: Стандарт предприятия, 2009. – 10 с. **9.** Посудини та апарати сталеві зварні. Загальні технічні умови; СОУ МПП 71.120-217:2009. – [Чинний від 2009-07-07]. – К.: Мінпромполітики України, 2009. – 339 с. **10.** Посудини та апарати, що працюють під тиском. Методика ультразвукового контролю зварних з’єднань; ГСТУ 3-037-2003. – [Чинний від 2004 -01-01]. – К.: Мінпромполітики України, 2003. – 104 с. **11.** Методика оценки работоспособности сосудов с вмятинами и овальностью. – ОАО «УКРНИИХИММАШ», 2005.

Поступила в редколлегию 25.03.10

УДК 620.16.001.24

Б.Я. КАНТОР, докт. техн. наук, ИПМаш НАН України, г. Харьков,
В.М. ДОЛИНСКИЙ, канд. техн. наук,
Р.Л. ОНАЦКИЙ, ОАО "УкрНИИхиммаш", г. Харьков, Украина

ВЛИЯНИЕ ВМЯТИН НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СОСУДОВ

В роботі порівнюється тримкість посудин без ум'ятин та при наявності вм'ятин на стінці корпусу посудини. На основі методу скінченних елементів проаналізовано напружено-деформований стан посудини на різних стадіях навантаження: утворення ум'ятини індентором, розвантаження, подальше навантаження внутрішнім тиском із частковою рихтовкою ум'ятини.

В работе сопоставлена несущая способность сосудов без вмятин и при наличии вмятин на стенке корпуса сосуда. На основе метода конечных элементов был проведен анализ напряженно-деформированного состояния сосуда на различных стадиях нагружения: формирования вмятины индентором, разгрузка, последующее нагружение внутренним давлением с частичной рихтовкой вмятины.

The carrier ability vessel was matched in work without dents and at presence of the dent. On base of the finite element method is analyzed stress-deformed condition of the vessel on different stages of the external load: forming the dent by means of stamp, unload and the following loading internal pressure with partial straightening of the dent.

Типовая конструкция сосуда представляет собой обечайку (тонкостенную, круговую цилиндрическую оболочку) с эллиптическими днищами. Сосуд устанавливается на опорах, горизонтальных или вертикальных.

На сосуде имеется несколько штуцеров, соединяющихся с трубопроводами (рисунок).

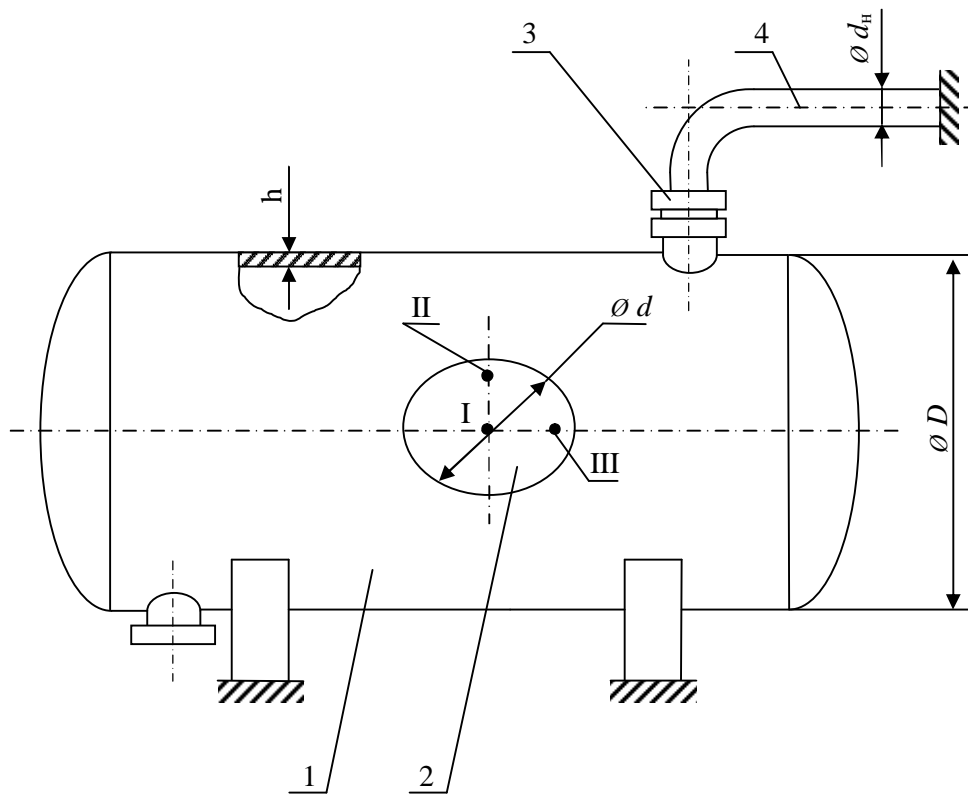


Рисунок – Схема установки:

1 – сосуд под давлением; 2 – вмятина; 3 – фланцевое соединение; 4 – трубопровод.

Если эллиптические днища – стандартные (высота составляет $\frac{1}{4}$ диаметра сосуда), то они являются равнопрочными с обечайкой.

Основной нагрузкой действующей на сосуд является давление среды P .

В безмоментной зоне конструкции действуют главные напряжения: ок-

ружные $s_j = Pg$, $g = \frac{D}{2h}$ и осевые $s_z = 0.5s_j$.

Обычно 3^{-им} напряжением s_r пренебрегают, поскольку $P \ll s_j$.

Так как g величина порядка $100 \div 200$.

Интенсивность напряжений $s_i = \frac{\sqrt{3}}{2} s_j$.

Условие прочности сосуда в безмоментной зоне выполняется если:

$$s_i \leq [s] = \frac{R_e}{[n_e]},$$

где $[s]$ – допускаемые напряжения, R_e – предел текучести, $[n_e]$ – допускаемый запас прочности по ГОСТу [1].

Тогда, допускаемое давление: $[P] = [s] \frac{4h}{\sqrt{3}D}$, а предельное $P_e = R_e \frac{4h}{\sqrt{3}D}$.

Если места действия локальных нагрузок (у штуцеров и опорных устройств) конструктивно укреплены, тогда несущая способность сосуда определяется предельным давлением P_e .

В процессе изготовления и монтажа сосуда возможны повреждения стенки в виде вмятин.

Очевидно, что в области вмятин напряженное состояние значительно отличается от состояния сосуда в неповрежденных местах.

Существует мнение, что вмятины снижают несущую способность сосуда.

Есть методика [2], которая позволяет получить величину снижения несущей способности.

В тоже время, в методике УкрНИИХиммаш была рассмотрена бесконечная обечайка с бесконечной вмятиной.

На основе нелинейной теории предельного равновесия показано, что несущая способность обечайки с вмятиной не снижается по сравнению неповрежденной конструкцией[3].

Целью настоящей работы является, определить напряженно-деформированное состояние и несущую способность типового сосуда с типичной вмятиной.

Анализ данных по обследованию оборудования УкрНИИХиммашем показал, что вмятины, хотя и отличаются от круглых в плане, вписываются в окружности, диаметры, которых находятся в пределах $150 \div 500$ мм.

Глубина вмятины составляет $a = (0.5 \div 2.5)h$.

Рассмотрим два одинаковых сосуда, один из которых не имеет, а другой содержит вмятину. Схема сосуда приведена на рисунке.

Сосуд без вмятины.

Размеры сосуда: диаметр сосуда $D = 3\text{ м}$, длина гладкой обечайки $l = 7.5\text{ м}$, толщина стенки $h = 15\text{ мм}$, материал – сталь Ст3, модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5\text{ МПа}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$, модуль упрочнения $E_T = 2 \cdot 10^3\text{ МПа}$ (использовалась схематизация диаграммы растяжения диаграммой с линейным упрочнением), предел текучести $R_e = 250\text{ МПа}$, допускаемые напряжение $[\sigma] = 166.6\text{ МПа}$.

Трубопровод изготовлен из стали Ст20, $R_e = 220\text{ МПа}$, допускаемые напряжение $[\sigma] = 146.6\text{ МПа}$, длина трубопровода до жесткой опоры $L = 1\text{ м}$, наружный диаметр $d_H = 219\text{ мм}$, толщина стенки $S = 10\text{ мм}$.

Допускаемое давление для сосуда: $[P] = 1.92\text{ МПа}$.

Предельное давление: $P_e = 2.88\text{ МПа}$.

Для оценки работоспособности конструкции рассмотрим три режима нагрузки давлением: допускаемым, предельным и перегрузочным. В последнем случае давление перегрузки $P_{II} = 1.1P_e = 3.16\text{ МПа}$.

Первый режим является стандартным расчетным режимом. Второй режим используется при диагностике сосудов[4]. Третий режим используют при технологической обработке[5,6]

При первых двух режимах нагружения напряжения в обечайке сосуда упругие. Причем, максимумы интенсивности напряжений равны, соответственно, $[\sigma]$ и R_e .

Нетрудно убедиться в том, что напряжения в трубе, присоединенной к сосуду, также являются упругими.

В случае перегрузки напряжением в сосуде $\sigma_i = 1.1R_e$.

Это вызовет значительные радиальные перемещения.

Для их определения воспользуемся условием несжимаемости:

$$e_j + e_z + e_r = 0$$

Осевые деформации: $e_z = \text{const} = 0$, следовательно $e_j = -e_r$.

Зависимость интенсивности деформаций от главных линейных:

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_j - e_r)^2 + (e_r - e_z)^2 + (e_z - e_j)^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} e_j$$

Интенсивность деформаций:

$$e_i = \frac{R_e}{E} + \frac{s_i - R_e}{E_T} = R_e \left(\frac{1}{E} - \frac{0.1}{E_T} \right)$$

Таким образом, радиальные перемещения сосуда:

$$V = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{D}{2} \left(R_e \left(\frac{1}{E} - \frac{0.1}{E_T} \right) \right) = 17.86 \text{ мм}$$

Расчет показывает, что в этом случае в трубе возникнут пластические деформации $e = 3.415\%$ и угол поворота фланца трубопровода составит $q = 0.040$ (рад), который превышает допускаемое нормативное значение $[q] = 0.013$ (рад) [7].

В результате этого произойдет разуплотнение фланцевого соединения и, таким образом, технологическая схема окажется неработоспособной. Следовательно, технологическую обработку необходимо выполнять на специально приспособленных для этого установках.

Сосуд с вмятиной.

Пользуясь методом конечных элементов, был произведен расчет той же цилиндрической оболочки, но с вмятиной глубиной $a = 30$ мм, диаметром $d = 450$ мм.

Рассматривались следующие этапы нагружения:

1 – образование вмятины под воздействием сферического индентора, диаметром 300 мм,

2 – разгрузка: сосуд с вмятиной индентор отсутствует,

3 и 4 – нагрузка и разгрузка под внутренним давлением $[P] = 1.92$ МПа,

5 и 6 – нагрузка и разгрузка предельным давлением $P_e = 2.88$ МПа,

7 и 8 – нагрузка, разгрузка перегрузочное давление $P_{II} = 1.01P_e = 2.9$ МПа,

9 и 10 – нагрузка разгрузка $P_{II} = 1.1P_e = 3.16$ МПа.

Поставленная задача была решена с учетом геометрической и физической нелинейности.

Обечайка моделировалась объемными элементами с двадцатью узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле.

Также была произведена серия уточняющих расчетов с различной плотностью сетки, полученные результаты с достаточной точностью согласуются между собой, из чего следует, приемлемость выбора размеров конечного элемента.

Результаты расчетов для 3^{-x} точек с максимальными напряжениями (I, II, III на рисунке) для вмятины представлены в таблице.

Как и следовало ожидать напряжения и деформации во вмятине значительно отличаются от напряжений в безмоментной зоне.

Имеются внутренние напряжения, которые суммируются с напряжениями от давления среды.

Таблица

Результаты расчета обечайки с вмятиной

Этапы нагружения	Номер точки	Положение точки	σ_φ , МПа	σ_z , МПа	σ_i^{\max} , МПа	ε_i^{\max} , %	a , мм	
1	2	3	4	5	6	7	8	
Образование вмятины	Вдавливание индентора	I	нар. пов-ть	-128,9	-77,9	185,5	9,695	-57,0
			внутр. пов-ть	5,3	117,1			
		II	нар. пов-ть	-80,6	-281,4	260,0	0,690	-36,5
			внутр. пов-ть	117,5	290,2			
		III	нар. пов-ть	-269,1	-14,9	263,6	0,832	-33,6
			внутр. пов-ть	280,3	98,2			
	Разгрузка	I	нар. пов-ть	-192,2	-213,9	119,6	9,288	-30,5
			внутр. пов-ть	-137,6	-121,9			
		II	нар. пов-ть	275,5	223,0	257,1	0,668	-12,7
			внутр. пов-ть	-295,1	-106,8			
		III	нар. пов-ть	274,4	107,9	237,0	0,799	-10,8
			внутр. пов-ть	-12,8	-133,9			
Допускаемое давление	Нагружение $P = [P]$	I	нар. пов-ть	106,8	21,3	153,1	7,358	-12,9
			внутр. пов-ть	-130,6	-99,2			
		II	нар. пов-ть	184,6	286,4	247,8	0,596	-1,3
			внутр. пов-ть	-4,8	-146,4			
		III	нар. пов-ть	278,7	76,4	249,0	0,367	0,12
			внутр. пов-ть	110,4	-34,7			
	Разгрузка $P = 0$	I	нар. пов-ть	-358,4	-255,7	253,6	7,379	-17,8
			внутр. пов-ть	153,0	179,8			
		II	нар. пов-ть	-18,7	56,0	178,1	0,568	-4,7
			внутр. пов-ть	-151,6	-195,2			
		III	нар. пов-ть	-49,4	3,2	150,2	0,269	-3,2
			внутр. пов-ть	13,6	-144,6			

Продолжение таблицы

1		2	3	4	5	6	7	8
Предельное давление	Напряжение $P = P_e$	I	нар. пов-ть	181.9	81.1	208.5	6.201	-3,7
			внутр. пов-ть	-51.2	-109.6			
		II	нар. пов-ть	187.6	287.3	248.9	0.584	2,6
			внутр. пов-ть	267.9	60.3			
		III	нар. пов-ть	297.1	92.8	262.8	0.808	4,3
			внутр. пов-ть	295.2	138.6			
	Разгрузка $P = 0$	I	нар. пов-ть	-342,6	-263,9	250,5	6,183	-6,4
			внутр. пов-ть	-65,1	29,9			
		II	нар. пов-ть	-63,1	103,7	146,1	0,532	0,72
			внутр. пов-ть	-72,3	-64,6			
		III	нар. пов-ть	26,0	8,3	52,4	0,687	2,6
			внутр. пов-ть	16,5	-42,5			
Перегрузка	Напряжение $P = 1,01P_e$	I	нар. пов-ть	187,5	94,7	213,9	6,105	-2,3
			внутр. пов-ть	-19,9	-114,0			
		II	нар. пов-ть	217,6	279,4	250,6	0,585	3,6
			внутр. пов-ть	280,3	102,3			
		III	нар. пов-ть	297,7	88,1	264,3	0,807	5,3
			внутр. пов-ть	297,1	159,9			
	Разгрузка $P = 0$	I	нар. пов-ть	-322,4	-245	241,9	6,084	-4,8
			внутр. пов-ть	-72,1	-0,9			
		II	нар. пов-ть	-43,5	96,5	124,3	0,522	1,6
			внутр. пов-ть	-59,6	-25,8			
		III	нар. пов-ть	30,2	-3,0	32,0	0,764	3,5
			внутр. пов-ть	6,9	-23,2			
	Напряжение $P = 1,1P_e$	I	нар. пов-ть	252,6	168,8	266,2	5,581	19,5
			внутр. пов-ть	219,8	-41,9			
		II	нар. пов-ть	326,5	178,2	281,4	1,170	22,3
			внутр. пов-ть	322,3	158,2			
		III	нар. пов-ть	325,6	148,1	284,2	1,833	22,5
			внутр. пов-ть	326,1	174,1			
	Разгрузка $P = 0$	I	нар. пов-ть	-155,4	-88,7	133,4	5,530	17,6
			внутр. пов-ть	-32,5	-105,8			
		II	нар. пов-ть	5,8	3,3	14,9	1,574	20,2
			внутр. пов-ть	-12,1	4,1			
		III	нар. пов-ть	11,0	-8,3	16,8	1,70	20,6
			внутр. пов-ть	-2,5	5,9			

Суммарные напряжения значительно выше мембранных составляющих.

Мембранные напряжения во вмятине в рабочем режиме $s = 191 \text{ МПа}$ незначительно отличаются от мембранных напряжений в безмоментной области $s_j = 192 \text{ МПа}$.

Внутреннее давление рихтует вмятину и понижает уровень внутренних напряжений.

Наиболее значительные результаты получены при повышенных значениях давления.

Поскольку в области вмятины имеются пластические деформации условие прочности проверяется, по соответствующему нормативному документу [8], регламентирующему допускаемый уровень пластических деформаций:

$$e_i < [e]$$

Условие прочности $9.695\% < 53.23\%$ выполнено

Выводы.

Таким образом, вмятина не снижает несущую способность сосуда.

Однако значительный уровень внутренних напряжений может понизить циклическую прочность конструкции.

Опасность снижения циклической прочности возникает при неблагоприятной форме штампа, который может значительно повысить внутренние напряжения и деформации.

Обработка сосуда с вмятиной повышенным давлением в соответствии с имеющимися нормативными документами [6, 8] рихтует вмятину и значительно (в 2 раза) снижает внутренние напряжения

Следует также иметь в виду, что высокий уровень напряжений может неблагоприятно сказаться на стойкости конструкции при коррозионном растрескивании под напряжением.

Список литературы: 1. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность; ГОСТ 14249-89. – [Дата введения 01.01.90]. – Издательство стандартов, 1989. – 79 с. 2. Методические указания по проведению поверочных расчетов котлов и их элементов на прочность. – АОЗТ "ДИЭКС", 1996. 3. Методика оценки работоспособности сосудов с вмятинами и овальностью. – ОАО "УКРНИИХИММАШ", 2005. 4. Проведение работ по оценке остаточной работоспособности технологического оборудования нефтеперерабатывающих, нефтехимических и химических производств. Методические указания; НПАОП 0.00-7.02-93. – [19.05.1993]. – К.: Госнадзор-охрантруда, 1993. – 56 с. 5. Посудини та апарати сталеві зварні. Загальні технічні умови; СОУ МПП 71.120-217:2009. – [Чинний від 2009-07-07]. – К.: Мінпромполітики України, 2009. – 339 с. 6. Сосуды. Аппараты. Трубопроводы. Гидрообработка; СОУ ОАО "УКРНИИХИММАШ" 004:2009. – [Дата введения 10.08.2009]. – Харьков.: Стандарт предприятия, 2009. – 12 с. 7. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность герметичность фланцевых соединений: РД 26-15-88. – [Дата введения 01.07.89]. – М.: НИИхиммаш, 1990. – 63 с. 8. Посудини та апарати. Вибір зміцнювального оброблення; ДСТУ 4003-2000. – [Чинний від 29.12.2000]. – К.: Держстандарт України, 2001. – 15 с.

В.А. КАЧАНОВ, канд. хим. наук, **Ю.Б. ДАНИЛОВ**, докт. техн. наук,
Е.К. ГВОЗДИКОВА, **Т.Э. ШЕПТЛЬ**,
В.Ю. КОЗИН, ОАО «УкрНИИхиммаш»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ КОЖУХОТРУБЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ИЗ СТАЛИ 08Х13

В статті наведені результати дослідження причин руйнування трубного пучка теплообмінника, виготовленого із сталі 08Х13, наведені причини його виходу зі стою та рекомендації по його подальшій експлуатації.

В статье приведены результаты исследования причин разрушения трубного пучка теплообменника, изготовленного из стали 08Х13, указаны причины его выхода из стою и рекомендации по его дальнейшей эксплуатации.

The article presents the results of the causes of the destruction of the pipe bundle heat exchanger, made of steel 08Н13, the reasons for his departure from the stand and recommendations for its further exploitation.

Решаемые проблемы:

Для установления причин выхода из строя трубного пучка кожухотрубчатого теплообменника из стали 08Х13 установки ЭЛОУ АВТ нефтеперерабатывающего предприятия, эксплуатирующегося на подогреве вырой нефти керосиновой фракцией

Теплообменный аппарат находился в эксплуатации более 20 лет при гарантийном сроке службы трубного пучка 10 лет, после вывода из эксплуатации хранился 1,5 года под азотной подушкой. Перед повторным вводом в эксплуатацию аппарат был разгерметизирован, спустя 2 месяца прошел гидротестирования и был введен в повторную эксплуатацию. При этом трубный пучок подвергался стояночной (атмосферной) коррозии, при которой на поверхности металла конденсируется влага и процесс коррозии идет в тонком слое конденсата, локализуясь на нижней поверхности труб (рис. 1).

Как видно из рисунка, наиболее интенсивное разрушение наблюдается на трубе со стороны межтрубного пространства, которое локализуется на одной части трубы (рис. 1а и в).

Имеет место язвенное разрушение глубиной от 0,02 до 1,8 мм (сквозное разрушение), что свидетельствует о конденсации влаги на нижней образую-

щей, приводящей к локализации коррозионного процесса в виде язвенных поражений.

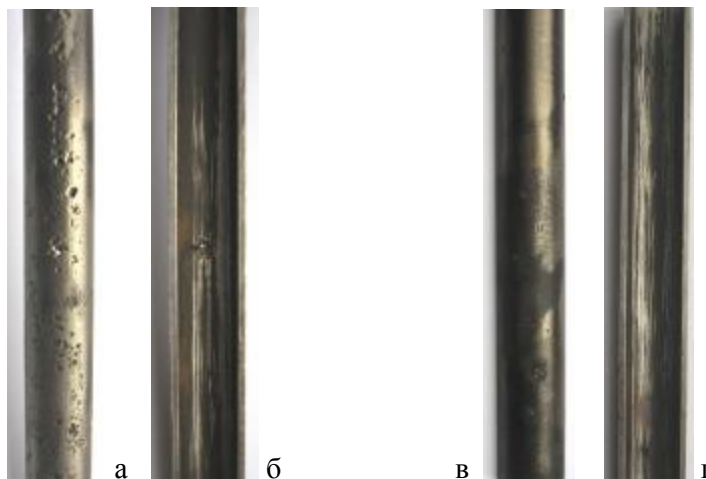


Рис. 1. Внешний вид разрушившейся трубы:
- интенсивно разрушенная сторона: а – снаружи, б – изнутри;
- мало разрушенная сторона: в – снаружи, г – изнутри.

С внутренней стороны также наблюдаются отдельные участки язвенного разрушения глубиной до 1,15 мм (рис. 1 б и г).

Трубный пучок был изготовлен из труб 20 × 2,5 мм.

Толщина представленного для испытаний образца трубы составила от 1,65 до 1,8 мм.

То есть, скорость общей коррозии составила около 0,05 – 0,07 мм/год и язвенной 0,1 – 0,12мм/год.

Постановка задачи:

Для выяснения причины разрушения трубного пучка были проведены металлографические и коррозионно-электрохимические исследования металла, вырезанного из теплообменника.

Проведенный химический анализ показал, что по химическому составу металл трубы соответствует стали 08X13 по ГОСТ 5632.

Для исследования характера разрушения были проведены металлографические исследования.

Структура металла ферритная, соответствующая стали 08X13 (рис. 2).

Характер разрушения со стороны межтрубного пространства – язвенный (рис. 3), со стороны трубного пространства – также точечно-язвенный (рис. 4).

Растрескивания металла не наблюдается.

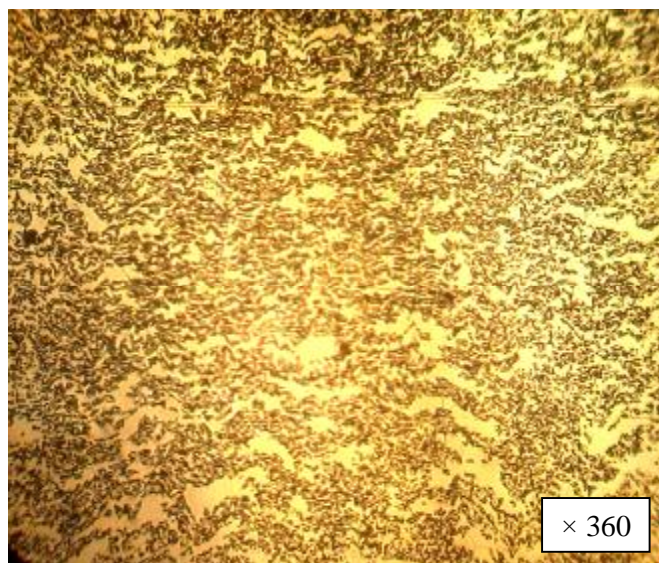


Рис. 2. Микроструктура разрушившейся трубы из стали 08X13



Рис. 3. Интенсивное язвенное разрушение наружной стенки трубы.

На рис. 5 представлено распределение микротвёрдости по сечению стенки трубы.

Как видно из рисунка, значения микротвёрдости увеличиваются к внешнему краю, что связано с деформационными напряжениями, возникшими в процессе обжатия трубы при её изготовлении (наклёп).

На сильноразрушившейся части трубы наблюдается понижение микротвёрдости вблизи наружной стенки, что связано с перераспределением напряжений вблизи язвенных разрушений.

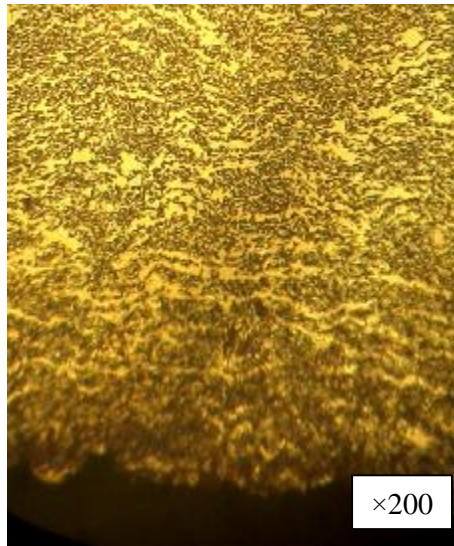


Рис. 4. Точечно-язвенное разрушение внутренней стенки трубы

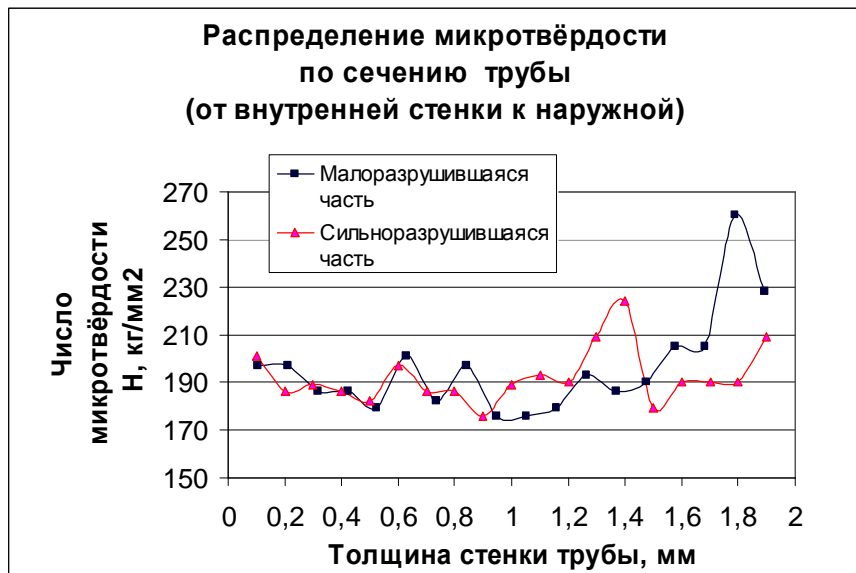


Рис. 5. Распределение микротвёрдости по сечению стенки трубы

Наиболее агрессивной рабочей средой является сырая нефть, подающаяся в трубное пространство, в которой присутствуют хлориды, сероводород и вода.

Керосиновая фракция, подающаяся в межтрубное пространство, гораздо менее агрессивна, чем рабочая среда в трубном пространстве.

Однако, при сквозном язвенном поражении трубок со стороны трубного пространства возможно попадание нефти, содержащей хлориды и сероводород, в керосиновую фракцию, что могло стать причиной возникновения яз-

венной коррозии [1]. В процессе стояночной коррозии после вывода теплообменника из эксплуатации язвенное разрушение усугубилось.

Для оценки агрессивности рабочих сред проведены электрохимические исследования образцов стали 08X13, вырезанных из трубы, подвергшейся разрушению, а также образцов из проката сталей 08X13 и 12X18H10T в условиях конденсата, содержащего 29 г/л NaCl и 100 мг/л сульфид натрия при $\text{pH} = 7,5$ и в растворе, содержащем только сульфид натрия до 10 г/л при $\text{pH} = 8$, и температуре вблизи температуры кипения.

Состав конденсата рассчитан по содержанию хлоридов, сероводорода и воды в нефти.

В растворе, содержащем хлорид натрия, сталь 08X13 не пассивируется и подвергается точечно-язвенной коррозии вблизи потенциала коррозии и возникшие язвы не пассивируются даже отрицательнее потенциала коррозии (рис. 6 а), что согласуется с результатами опыта эксплуатации трубного пучка теплообменника.

Исследование стали 08X13 в отсутствие ионов хлора показало, что даже при наличии сульфида натрия в количестве 10 г/л язвенного разрушения стали не наблюдается (рис. 6 б).

Таким образом, применение стали 08X13 для трубного пучка при $\text{pH} 7,5$ и ниже (слабокислая среда) не желательно в связи со склонностью стали к язвенному разрушению вблизи потенциала коррозии.

Сравнительное исследование стали 12X18H10T (рис. 7а,б) в указанных условиях показало ее преимущество перед сталью 08X13 с точки зрения подверженности точечно-язвенной коррозии.

Сталь корродирует из устойчивого пассивного состояния и может быть рекомендована для изготовления трубного пучка при pH не менее 7,5.

Следовательно, основной причиной интенсивной язвенной коррозии участка трубы со стороны межтрубного пространства является попадание ионов хлора в керосиновую фракцию.

Язвенное поражение усугубляется стояночной (атмосферной) коррозией, которая, по-видимому, явилась следствием конденсации на поверхности металла влаги во время вывода теплообменника из эксплуатации (хранения, после разгерметизации и гидроиспытаний) [2].

Со стороны трубного пространства наблюдающаяся точечно-язвенная коррозия глубиной более 1мм вызвана присутствием в рабочей среде ионов хлора и сероводорода.

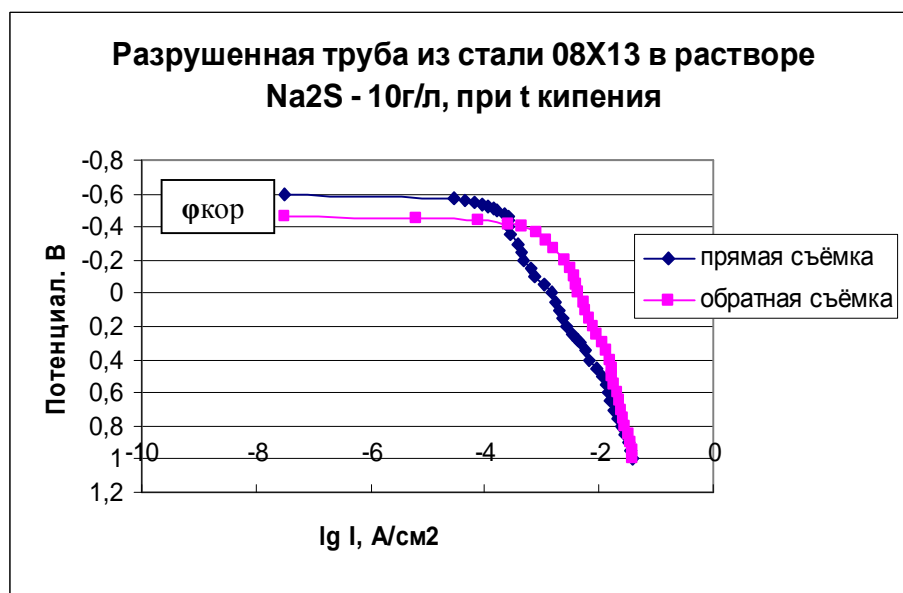
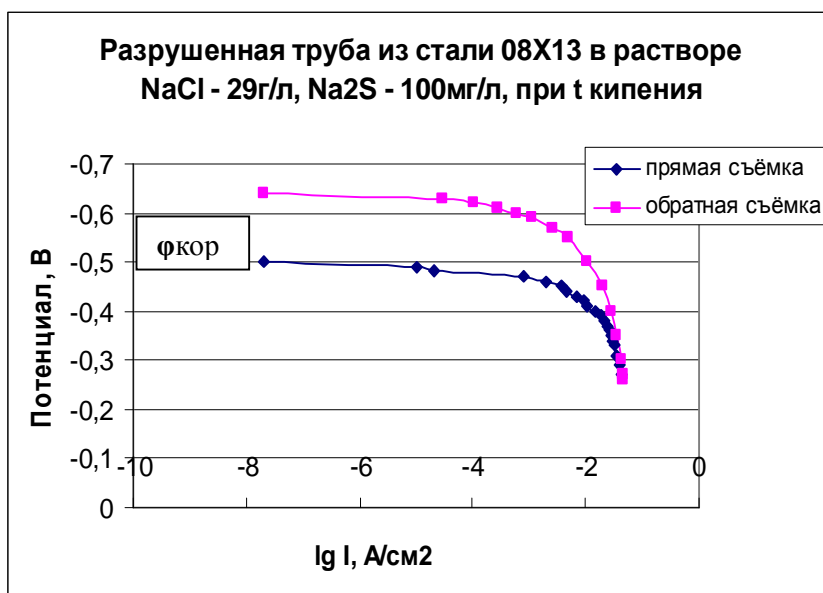


Рис. 6. Исследование коррозии стали 08X13

Для предотвращения точечно-язвенной коррозии рекомендуем проводить защелачивание исходного сырья до рН 8 – 9 перед подачей его в теплообменник.

Для сравнения были проведены электрохимические исследования Ст. 20 в растворе, содержащем ионы Cl⁻.

Как видно из рис. 8, сталь 20 корродирует из активного состояния.

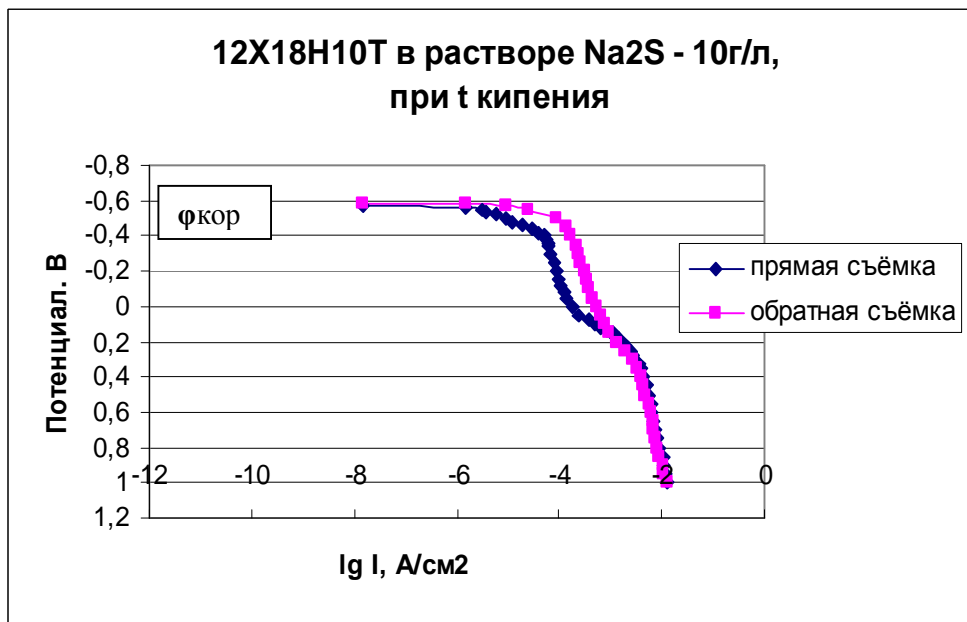
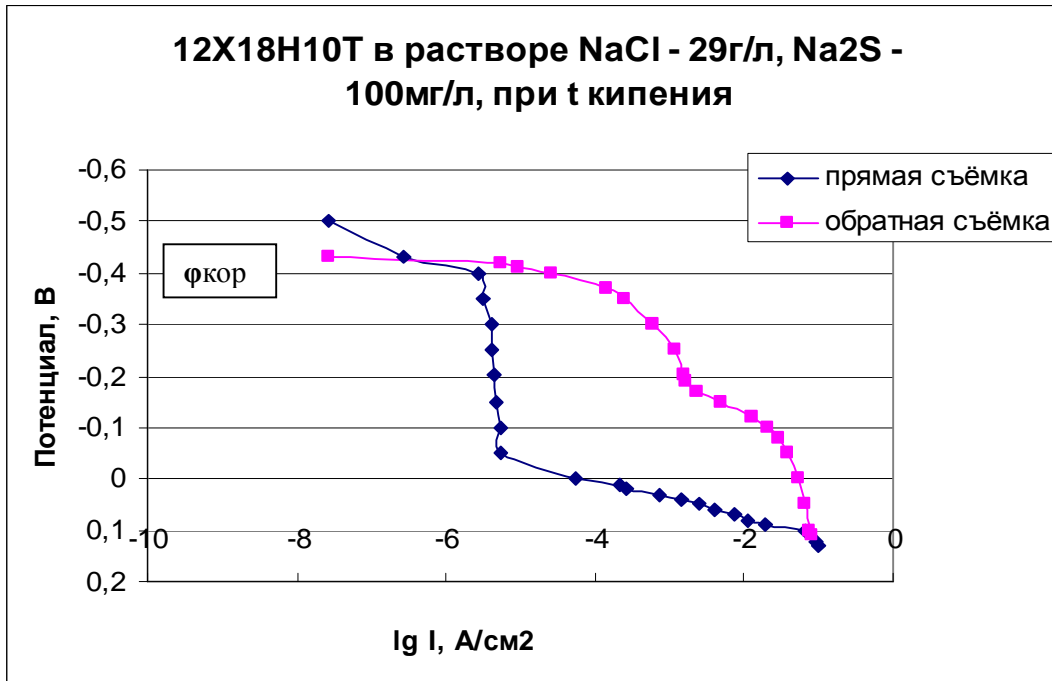
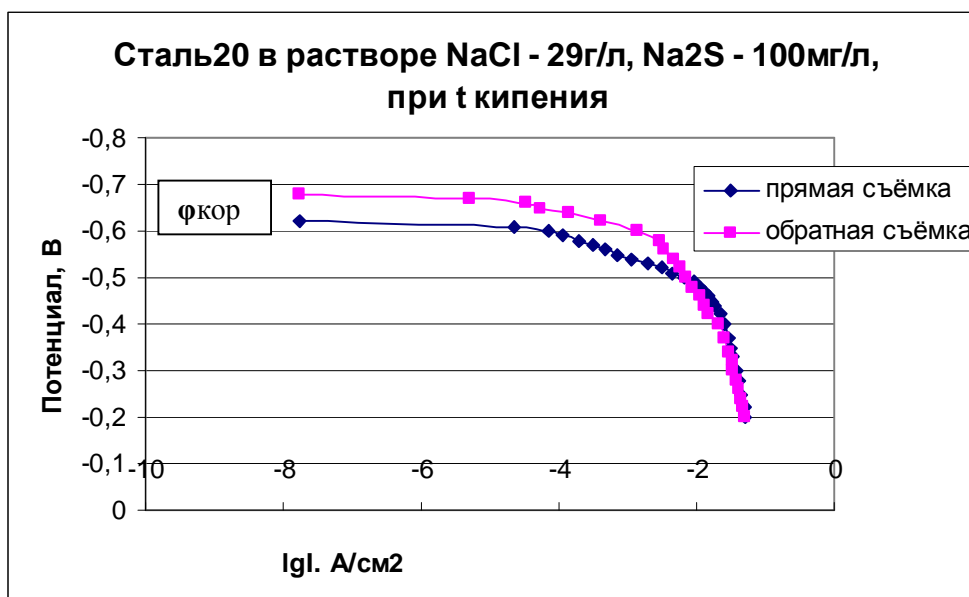


Рис. 7. Исследование коррозии стали 08X13 для трубного пучка при рН 7,5 и ниже

Скорость коррозии достигает 0,3 – 0,5мм/год.

Однако, сталь 20 менее подвержена язвенному разрушению, чем нержавеющие стали.



Выводы:

1. Основной причиной разрушения теплообменника явилось значительное содержание ионов хлора в перерабатываемом сырье при отсутствии подщелачивания нефти перед подачей в теплообменник, а также стояночная коррозия при выводе теплообменника из эксплуатации.

2. На основании проведенных исследований сталь 08X13 может быть рекомендована в качестве конструкционного материала для трубного пучка теплообменника Т-3/3 со сроком службы 10 лет при жёстком соблюдении условий эксплуатации и защелачивании исходной нефти перед подачей в теплообменник до рН не менее 8 – 9. При выводе теплообменника из эксплуатации он должен быть пропарен, высушен и законсервирован азотом. При расконсервации теплообменника время до ввода в эксплуатацию должно быть минимальным (2 – 3 суток).

3. Сталь 20 может быть рекомендована в качестве конструкционного материала для изготовления трубного пучка теплообменника с ограниченным сроком службы (согласно РТМ 26-02-39-77 – до 5 лет). Скорость коррозии более 0,5 мм/год, сталь менее подвержена язвенной коррозии по сравнению с нержавеющими сталями.

Список литературы: 1. Нефтеперерабатывающая промышленность: справочное руководство / под. ред. А.М. Сухотина. – Л.: «Химия», 1990. – 396 с. 2. В.А. Качанов. Точечно-язвенная и щелевая коррозия аустенитных сталей в оборотных водах / В.А. Качанов, Л.А. Ключникова, Т.А. Балак / Вестник Харьковского ГПУ «ХПИ». – 2000. – Вып. 115. – С. 61.

Т.Э. ШЕПИЛЬ, В.А. КАЧАНОВ, канд. хим. наук,
Ю.Б. ДАНИЛОВ, докт. техн. наук, **В.Ю. КОЗИН**,
В.М. ДОЛИНСКИЙ, канд. техн. наук,
В.Г. ИВАНОВ, ОАО «УкрНИИхиммаш»

МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТРЕЗКОВ ТРУБ, ВЫРЕЗАННЫХ ИЗ ПЕЧИ РИФОРМИНГА НА ОДЕССКОМ ПРИПОРТОВОМ ЗАВОДЕ

В статті наведені результати металографічних досліджень руйнування зварних з'єднань труб різнорідних матеріалів легованої теплоотривкої сталі А335GrP11 та жароміцного сплаву Манурит ХМ. Показано, що розвиток МКК по лінії сплавлення виявляється як слідство виділення карбідів по границям зерен. По внутрішній стороні труби утворився знеуглерожений шар.

В статье приведены результаты металлографических исследований разрушения сварных, соединенных труб разнородных материалов легированной теплоустойчивой стали А335GrP11 и жаропрочного сплава Манурит ХМ. Показано, что развитие МКК по линии сплавления проявляется как следствие выделение карбидов по границам зерен. По внутренней стороне трубы образовался обезуглероженный слой.

The results of metallographic investigations of the destruction of welding, pipe joints of dissimilar materials alloyed thermostable steel А335GrP11 and heat-resistant alloy Manaurite ХМ. It is shown that the development of the ICC through the fusion appears as a consequence of the allocation of carbides along grain boundaries. On the inside of the pipe formed carbon-free layer.

Для исследования характера разрушений и оценки остаточной работоспособности труб печи риформинга были представлены фрагменты сварных соединений труб из разнородных сталей – легированной теплоустойчивой А335GrP11 и Манурит ХМ.

В таблице представлен химический состав сталей труб печи риформинга.

Таблица

Химический состав сталей труб печи риформинга

Марка стали	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Nb
А335Gr11	0,15	1,0	0,6	0,03	0,03	-	1,5	0,65	-	-
Манурит ХМ	0,4-0,45	2,0	1,5	0,03	0,03	32,0-35,0	23,0-27,0	0,2	0,25	1,0

Химический состав стали А335GrP11 близок отечественной стали 15ХМ.

Из представленных фрагментов были изготовлены шлифы в поперечном сечении к сварному шву.

На рис. 1 представлена макроструктура сварного соединения А335GrP11 (на рисунке слева) и Манурит ХМ (справа).

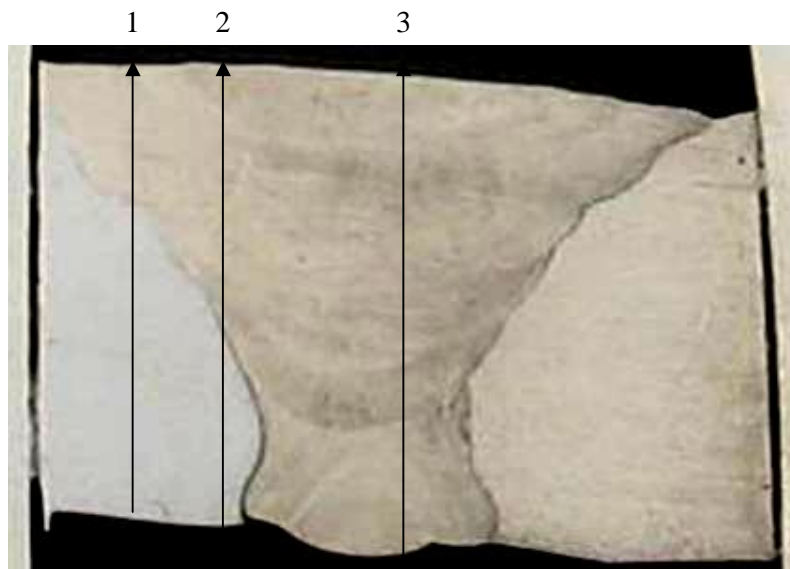


Рис. 1. Макроструктура сварного соединения

С внутренней стороны трубы у линии сплавления со сталью А335GrP11 наблюдается ножевая коррозия, переходящая в трещину по контуру линии сплавления глубиной ~ 9,5мм.

Металлографическими исследованиями сварного соединения трубы после эксплуатации выявлено:

- структура основного металла состоит из ферритных зёрен матрицы и зёрен с мелкодисперсными выделениями карбидов – перлит (рис. 2а);
- размер ферритных зёрен, определённых по ГОСТ 5639-92 соответствует 7- 6 баллу;
- по мере приближения к ЗТВ структура представляет собой феррито-сорбитную смесь (рис. 2б);
- у внутренней стороны трубы наблюдается подслоя светлого слаботравящегося металла в виде полоски, глубиной ~ 0,24 мм.

В нём произошло обезуглероживание поверхностного слоя под влиянием диффузии углерода в газовую среду (рис. 3).



а



×200

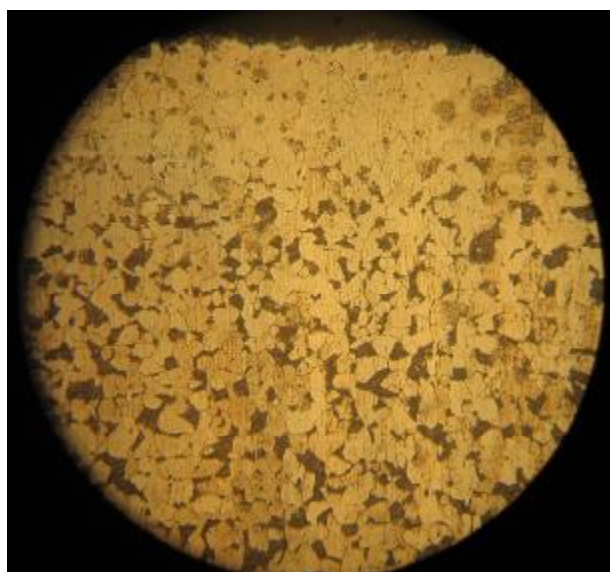
б

Рис. 2. Микроструктура металла отработавшей трубы:
а – основной металл, б – металл у зоны термического влияния (ЗТВ)

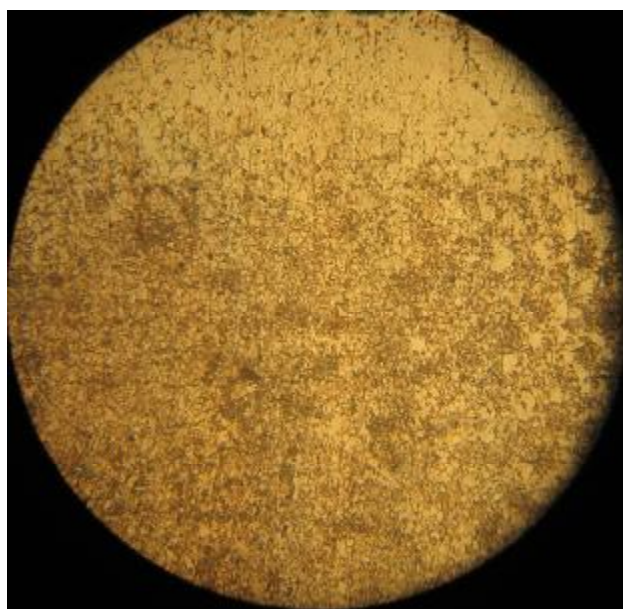
Такого рода деградация структуры (обезуглероживание) приводит к снижению прочности и твёрдости внутреннего слоя металла трубы (рис. 4 а и б).

Металлографическими исследованиями установлено, что границы ферритных зёрен значительно утолщены за счёт дополнительного выделения карбидов, а также наблюдаются глобулярные выделения в пределах ферритных зёрен (рис. 5).

При последующей эксплуатации и температурных воздействиях не исключена возможность дальнейшего превращения карбидной фазы, а следовательно ускоренной коррозии по границам зёрен феррита, обеднённых хромом, а также росту микропор по границам зёрен, а следовательно, снижению предела ползучести металла.



а



×360

б

Рис. 3. Поверхностный обезуглерожженный слой:
а – в основном металле, б – в ЗТВ

Структурные изменения коррелируются с изменениями микротвёрдости по сечению трубы (рис. 4 а и б).

Изучение структуры в сечении трубы выявило её значительную неоднородность на микроуровне.

У внутренней поверхности трубы в области зоны термического влияния выявлена значительная полосчатость (рис. 5).

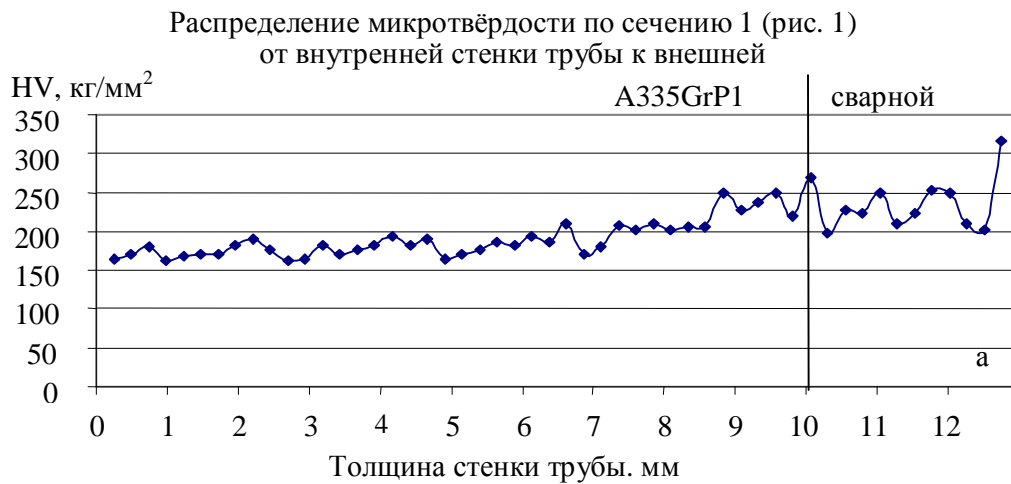


Рис. 4. Изменения микротвёрдости по сечению трубы

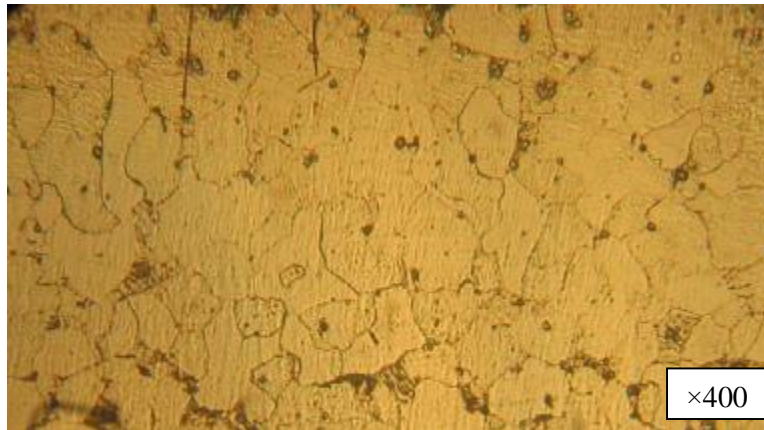


Рис. 5. Карбидообразование по границам зёрен феррита, обеднённых хромом

Наличие такой полосчатости во внутренних слоях сечения трубы связано с ликвацией легирующих элементов, в данном случае хрома, что значительно ухудшает прочность труб при высоких температурах в условиях эксплуатации.

На рис. 6 представлено коррозионное разрушение с локализацией в узкой зоне на границе между аустенитным швом и перлитной сталью (ножевая коррозия).

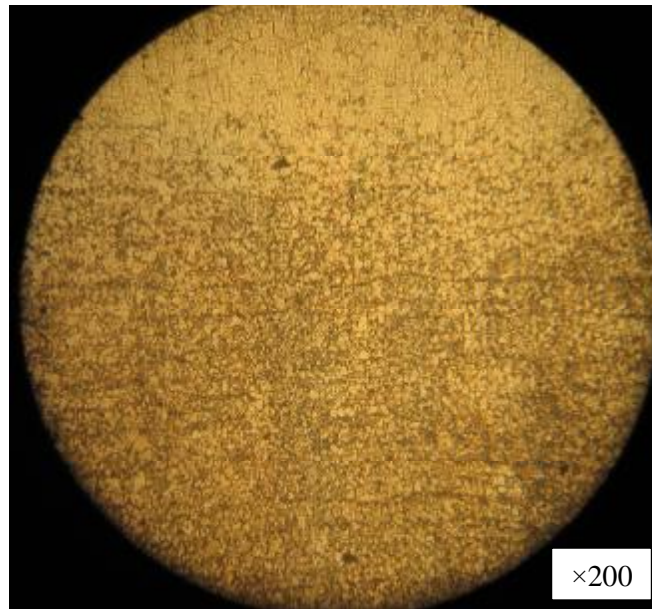
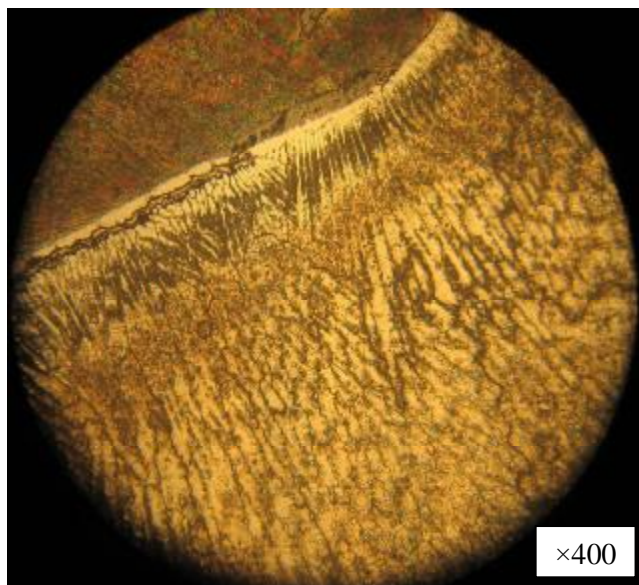


Рис. 6. Полосчатость в перлитной стали

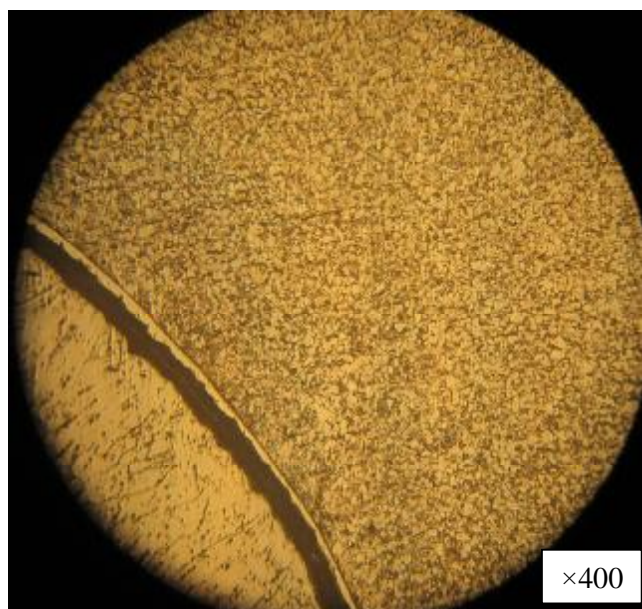
В сварном шве наблюдаются высокотемпературные продукты распада мартенсита с относительно высокой микротвёрдостью $\sim 260 \text{ кг/мм}^2$ (рис. 4 в)

и обезуглероженные прослойки со стороны перлитной стали, где микротвёрдость снижается до ~ 180 кг/мм² (рис. 7 а, б).

Таким образом, по линии сплавления образуются участки одновременного действия структурных и сварочных напряжений, являющимися основными факторами возникновения и развития коррозионного растрескивания.



а



б

Рис. 7. Структурные превращения в сварном шве:
а – продукты распада мартенсита,
б – обезуглероженный слой со стороны перлитной стали

Выводы:

Основными причинами разрушения сварного соединения трубы печи риформинга являются:

– дополнительное выделение карбидов по границам зёрен, обеднённых хромом, вследствие чего идёт ускоренное развитие межкристаллитной коррозии по линии сплавления;

– образование обезуглероженного слоя у внутренней стороны трубы на глубину 0,24 мм;

– наличие полосчатой структуры связано с неравномерностью распределения легирующих элементов и карбидов в металле.

Поступила в редколлегию 25.03.10

УДК 661.791.669.14

К.А. ЮЩЕНКО, академик НАН Украины,
Л.В. ЧЕКОТИЛО, канд. техн. наук,
Ю.Н. КАХОВСКИЙ, канд. техн. наук, **А.В. БУЛАТ**, канд. техн. наук,
Р.И. МОРОЗОВА, канд. техн. наук, **В.В. МУТАС**, **Г.Ф. НАСТЕНКО**,
ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины,
Ю.Б. ДАНИЛОВ, докт. техн. наук, **В.А. КАЧАНОВ**, канд. хим. наук,
В.М. ДОЛИНСКИЙ, канд. техн. наук, **А.И. КАБАШНЫЙ**,
С.М. ИВАНУНА, ОАО «УкрНИИхиммаш»,
В.Н. БЕСПАЛЫЙ, **О.А. СИКОВЕЦ**, **Ю.А. БАГРОВ**,
С.В. КИРИЧКОВ, ПАО «УкрТаТнафта»

ОПЫТ РЕМОНТА КОРПУСОВ КОЛОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ НЕФТИ ИЗ ДВУХСЛОЙНЫХ СТАЛЕЙ

Проведено аналіз корозійно-технічного стану корпусів ряду колон ПАТ «УкрТаТнафта» з переробки нафти з двохшарових сталей СтЗсп + 08Х13 та 16ГС + 08Х13 за період з 2003 по 2009 роки. Розроблено технологію ремонту та нормативну документацію для діагностики корпусів колон з підвищеною твердістю корозостійкого шару 08Х13. Технологія впроваджена у виробництво на ряді об'єктів ПАТ «УкрТаТнафта».

Проведен анализ коррозионно-технического состояния корпусов ряда колонн ПАО «Укртатнафта» с переработки нефти с двухслойных сталей Ст3сп + 08Х13 и 16ГС + 08Х13 за период с 2003 по 2009 годы. Разработана технология ремонта и нормативную документацию для диагностики корпусов колонн с повышенной твердостью коррозионностойкого слоя 08Х13. Технология внедрена в производство на ряде объектов ЗАО «Укртатнафта».

The analysis of corrosion-technical condition of bodies of several columns ZAO Ukrtatnafta processing oil from the two-layer steel St3sp + 08H13 and 08H13 + 16GS for the period from 2003 to 2009. The technology of maintenance and regulatory documentation for the diagnosis corps columns with high hardness corrosion layer 08H13. Technology is introduced into production at a number of objects ZAO Ukrtatnafta.

Решение проблемы: на нефтеперерабатывающих предприятиях Украины и стран СНГ эксплуатируется колонное и теплообменное оборудование из двухслойных сталей Ст3сп, 16ГС, 20К, 09Г2С, 12МХ, 12ХМ с плакирующим слоем из нержавеющей стали 08Х13 (ЭИ496). Сталь 08Х13 имеет хорошую коррозионную стойкость в аппаратах по переработке нефти, удовлетворительно сваривается и сравнительно недорога. Колонное оборудование из указанных сталей крупногабаритное: высота в среднем от 25 до 45 м, диаметр от 2 до 8 м, толщина стенок от 10 до 40 мм (рис. 1).

Оно эксплуатируется при избыточном давлении преимущественно от 0,2 до 2,0 МПа и больше при температурах до 360 – 400 °С.

Есть колонны, которые работают при низком вакууме 20 – 70 мм рт. столба.

Рабочая среда: продукты конверсии нефти средней и низкой агрессивности, поэтому к конструкциям в большинстве случаев не предъявляются требования стойкости против межкристаллитной коррозии (МКК).

Большинство колонн изготовлены из двухслойных сталей Ст3сп + 08Х13 и 16ГС + 08Х13 и эксплуатируются на НПЗ в Украине преимущественно в 60-х годах прошлого столетия.

При изготовлении и монтаже колонн сварка основного слоя, по которому выполняется прочностной расчет аппарата, производилась проволокой Св-08ГС по ГОСТ 2246-70 и электродами марок УОНИИ 13/45 и УОНИИ 13/55 по ГОСТ 9466-75 и ГОСТ 9467-75.

Плакирование сварных швов производилось электродами типа Э-10Х25Н13Г2 (ЗИО-8, ОЗЛ-6) по ГОСТ 10052-75, изредка проволокой Св-07Х21Н9ФБС (ЭИ649). Ремонты выполнялись с использованием электродов указанных марок, а в последние 20 – 25 лет также электродов марки АНЖР-2 типа Э-06Х25Н40М7Г2.

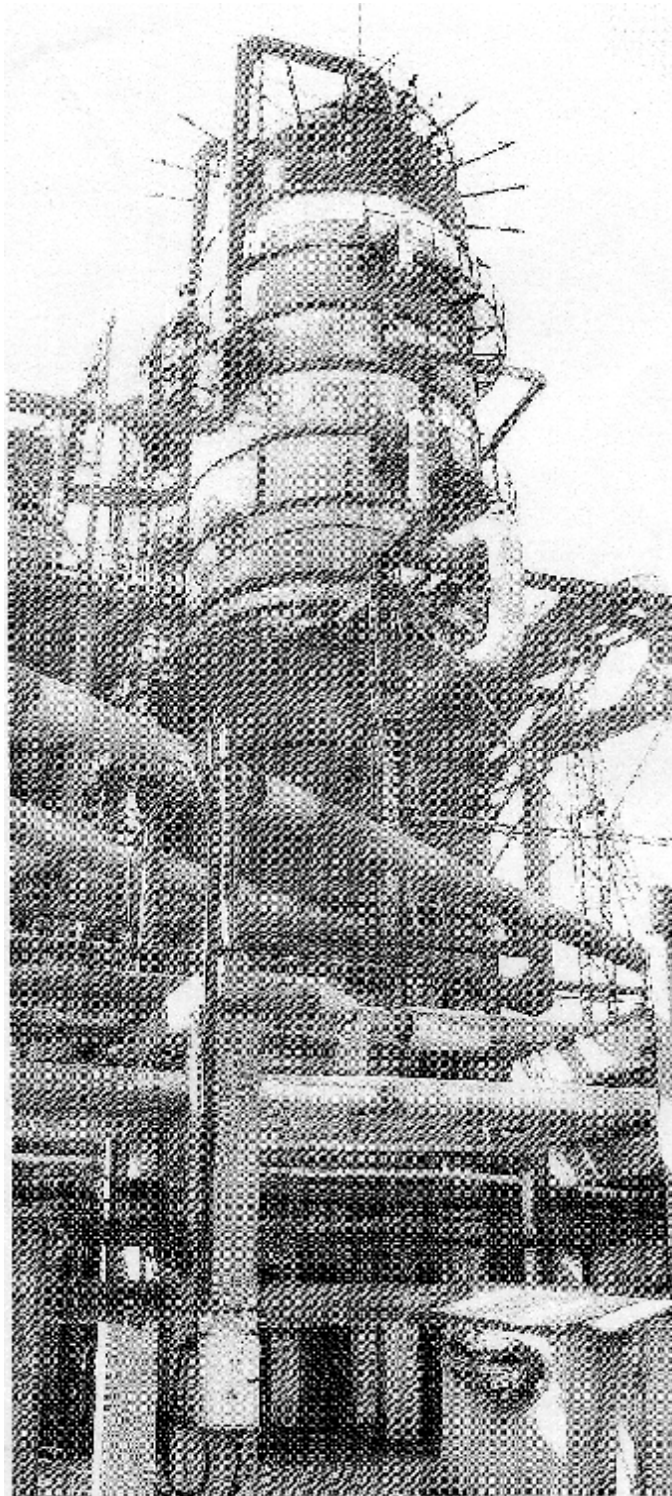


Рис. 1. Общий вид колонны К-5

Сроки эксплуатации большинства колонного оборудования на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) в Украине уже давно превышены, по этому проблема продления срока эксплуатации колонного оборудования выработавшего гарантийный срок стоит очень остро.

Постановка задачи: разработка технологии ремонта и нормативной документации по диагностике корпусов колонн с повышенной твердостью коррозионностойкого слоя 08X13.

Колонное оборудование из двухслойных сталей указанных композиций продолжают изготавливать и в настоящее время. Некоторые из них эксплуатируются на ОАО «ЛУКОЙЛ-Одесский НПЗ», и ПАО «УкрТатНафта».

Нефтеперерабатывающие и нефтехимические установки рассчитаны на выпуск крупнотоннажных партий продукции, поэтому проблемы их диагностики и надежного ремонта являются исключительно важными.

В процессе ознакомления с ремонтной документацией действующих колонн, обследования их коррозионно-технического состояния, исследования качества металла, вырезанного из действующих колонн и снятых с эксплуатации, выявлены типовые для этого вида оборудования дефекты (рис. 2, 3, 4, 5):

- а) подрезы, наплывы, поры, шлаковые включения, несплавления с основным и наплавленным металлом, трещины в швах и околошовной зоне;
- б) коррозионные трещины в сварных швах (рис. 2);

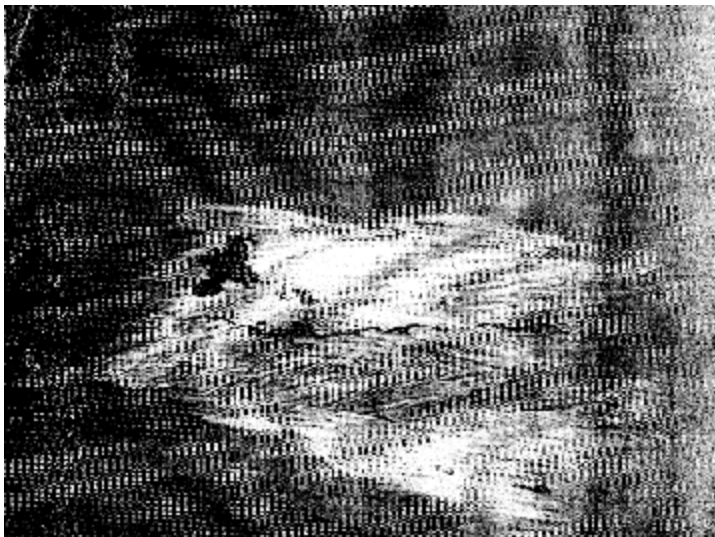


Рис. 2. Коррозионная каверна и трещина в шве, плакированном электродами ОЗЛ-6

- повышение твердости коррозионностойкого слоя 08X13 до 2500 – 3500 МПа (250 – 350 НВ) по Бринеллю, а в отдельных случаях до 4000 – 4500 МПа;

- повышение прочности слоя 08X13 практически в 2 раза до 1050 МПа и снижение пластичности в 1,2 – 2 раза;

- трещины в околошовной зоне сварных швов и ремонтных наплавках в слое 08X13 (рис. 3);

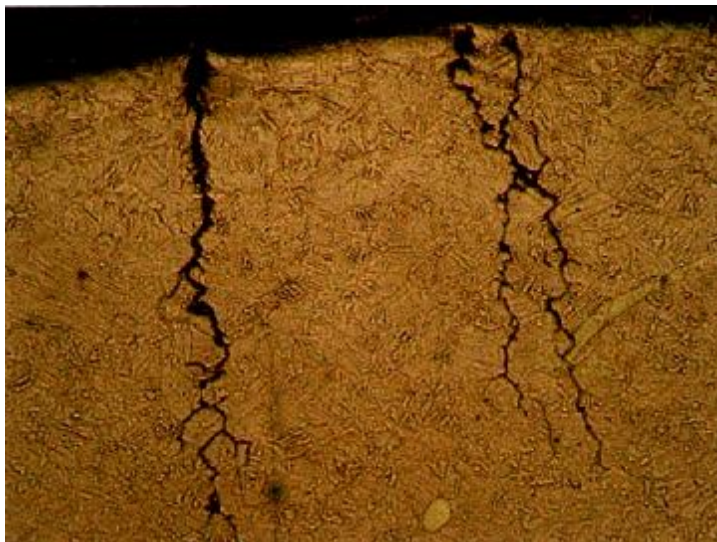


Рис. 3. Трещины в околошовной зоне (ОШЗ) сварного соединения в слое 08X13



Рис. 4. Трещина в зоне питтинговой коррозии в слое 08X13

- питтинговая (точечная) коррозия плакирующего слоя 08X13 и коррозионностойких наплавов типа X25H13, преимущественно небольших размеров (диаметром до 0,5 – 1,0 мм, глубиной до 0,5 – 1,0 мм, а в отдельных случаях и более крупных диаметром до 2 – 7 мм и глубиной до 2 – 3 мм (рис. 4) или в виде бесформенных каверн (рис. 2);

- трещины (не частые) в слое 08X13 в донной части питтингов (рис. 4);

- отслоение (не частое) плакирующего слоя 08X13 преимущественно в

зоне сварных швов и ремонтных наплавок;

- образование на границе между основным слоем биметалла из сталей СтЗсп, 16ГС, 09Г2С и др. и плакирующим слоем из стали 08Х13 малопластичной прослойки диффузионного происхождения с повышенным содержанием углерода по сравнению с его содержанием в слое 08Х13, химический состав разных зон приведен в таблице.

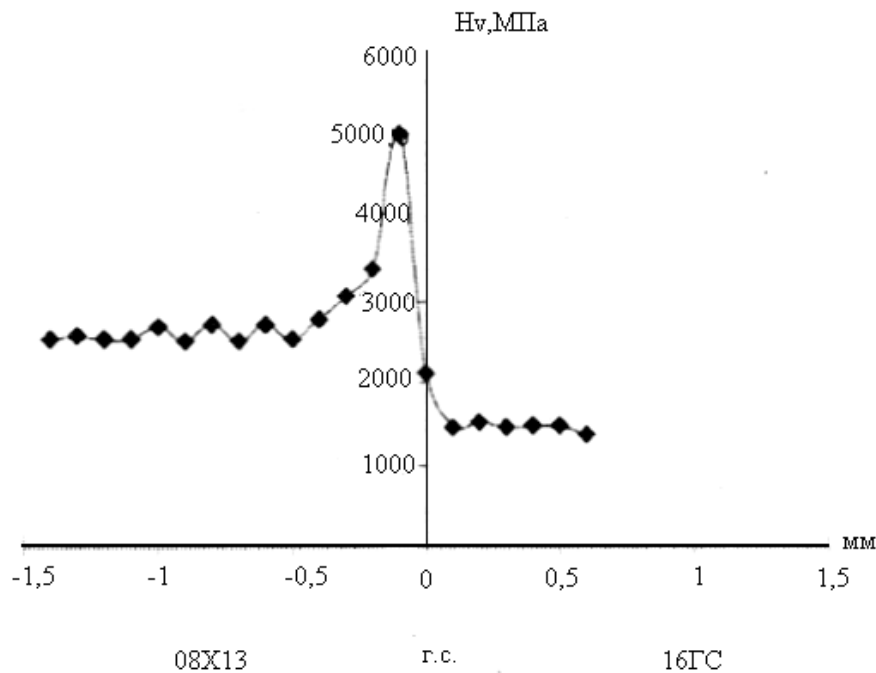


Рис. 5. Распределение микротвердости в плакирующем слое, переходном и основном слое двухслойной коррозионно-стойкой стали 16ГС+08Х13

Таблица

Химический состав металла в зоне соединения слоев двухслойной стали 16ГС+08Х13 после 38-летней эксплуатации колонны по переработке нефти при температурах 360 °С→110 °С

Объект исследований	Химический состав (масс. доли %)				
	Si	Cr	Mn	Fe	C
Обезуглероженная зона в основном слое 16ГС	0,766	0,078	1,146	98,034	0,002
Науглероженная зона в коррозионностойком слое 08Х13	0,485	11,928	0,468	86,364	0,755
Коррозионностойкий слой 08Х13	0,461	12,118	0,421	86,962	0,039

Одной из причин повышения прочности, снижения пластичности и появления трещин в коррозионостойком слое 08X13 является образование в нем в процессе длительной эксплуатации до 40 % мартенситной составляющей. Общая коррозия плакирующего слоя 08X13 и плакирующих наплавов типа X25H13 незначительна – 0,005 – 0,013 мм/год.

Согласно действующим нормативам в нефтеперерабатывающей отрасли твердость основного слоя из углеродистой стали ограничивается 1900 МПа, плакирующего слоя 08X13 – 2200 МПа. В реальных условиях в процессе многолетней эксплуатации происходит деградация стали 08X13.

В частности, при исследовании образцов, вырезанных из колонны К-2 из стали 16ГС+08X13 после 38 лет эксплуатации, установлены случаи повышения прочности слоя 08X13 до 1050 МПа, снижения относительного удлинения до 10 % и проявления нестабильности ударной вязкости КСУ в пределах от 40 до 100 Дж/см².

В исходном состоянии до эксплуатации эти показатели находятся соответственно на уровне: 450 – 500 МПа, более 25 % и более 50 Дж/см² [1, 2].

Твердость металла основного слоя обследованных колонн из сталей СтЗсп + 08X13 и 16ГС + 08X13, по которому производится расчет прочности корпуса колонны, несмотря на большой срок эксплуатации (38 – 43 года) практически во всех исследованных случаях не превышает нормированный уровень 1900 МПа по Бринеллю.

Кратковременные механические свойства металла основного слоя СтЗсп колонны № 5 производства № 3 в 2005 г. после 38 лет эксплуатации (кроме небольшого снижения предела текучести с 240 МПа до 189 – 215 МПа) находились в пределах требований ГОСТ 10885-85 и ГОСТ 380-71 (рис. 6).

Аналогичная тенденция наблюдалась и при исследовании механических свойств образцов из сталей 16ГС + 08X13 толщиной 16 мм и СтЗсп + 08X13 толщиной 10 мм, вырезанных из колонн К-2 и К-5 производства № 1.

Это дало возможность считать, что значительная часть колонн из указанных сталей, несмотря на срок эксплуатации 30 – 45 лет, является ремонтнопригодными.

Работоспособность колонн зависит от многих факторов и в первую очередь от тщательности обследования их коррозионно-технического состояния [3], соблюдения требований технологии ремонта и профессионализма сварщиков.

Для изготовления и ремонта колонн из сталей СтЗсп + 08Х13 и 16ГС + 08Х13, эксплуатирующихся при температурах до 360 – 400 °С, к сварным соединениям которым не предъявляются требования по МКК, ИЭС им. Е.О. Патона и ОАО «УкрНИИхиммаш», разработаны две технологии: ручная дуговая сварка (наплавка) покрытыми электродами основного вида марки АНВ-70Б типа Э-10Х25Н13Г2 по ГОСТ 10052-75 диаметром до 3 мм и проволокой марки Св. 07Х25Н13 по ГОСТ 2246-70 диаметром 1,0 – 1,3 мм в аргоне с добавкой до 3 % кислорода.

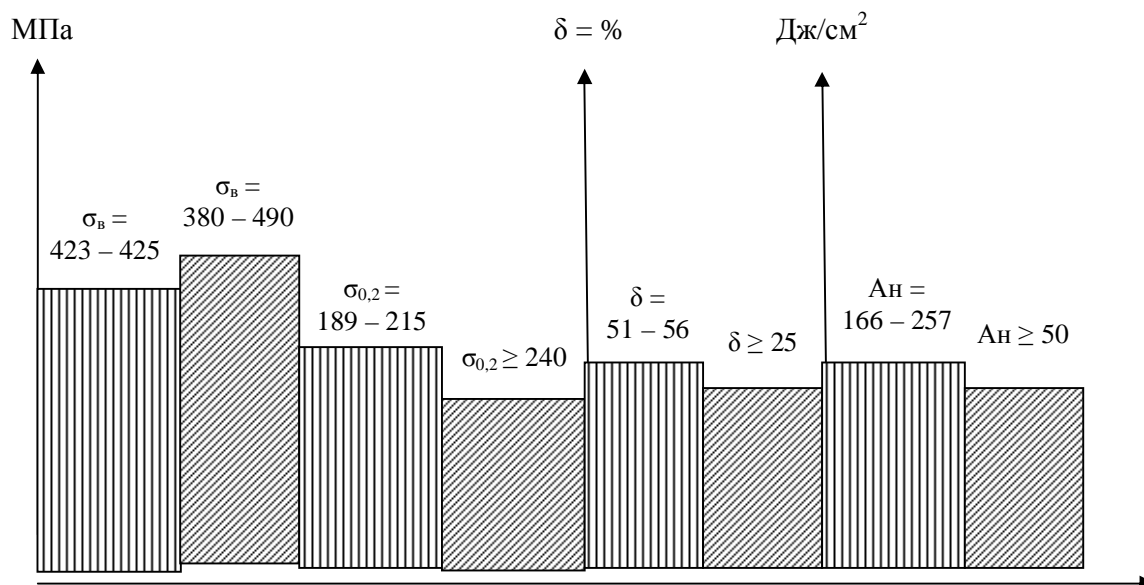


Рис. 6. Кратковременные механические свойства металла основного слоя СтЗсп колонны К-5 из стали СтЗсп + 08Х13 (производство № 3, 2005 г.):

▤ - после 38 лет эксплуатации;
▨ - требования ГОСТ 380-71 к листовой стали СтЗсп.

Электроды АНВ-70Б разработаны в ИЭС им. Е.О. Патона, сертифицированы в системе УкрСЭПРО, изготавливаются на ГП «Опытный завод сварочных материалов им. Е.О. Патона» по ТУ У 28.7-5416923-074:2005. Предложенные технологии тщательно проверялись при сварке образцов, вырезанных из колонн из указанных сталей после 38 лет эксплуатации по переработке нефти, в том числе с повышенным содержанием серы. Была уточнена техника сварки и наплавки, оптимизированы режимы предварительного и сопутствующего подогрева и термической обработки поврежденных сварных соединений и ремонтных зон слоя 08Х13 со сверхнормативной твердостью более 2200 МПа (рис. 7) [1, 2].

По результатам исследований ИЭС им. Е.О. Патона и ОАО «УкрНИИ

химмаш» разработана нормативная документация: «Инструкция по комплексному обследованию состояния колонного оборудования К-2, К-5, К-6, К-12/1,2 и Е-23» и «Колонны К-2, К-5, К-6, К-12/1, К-12/2, емкость Е-23. Технические условия на ремонт».

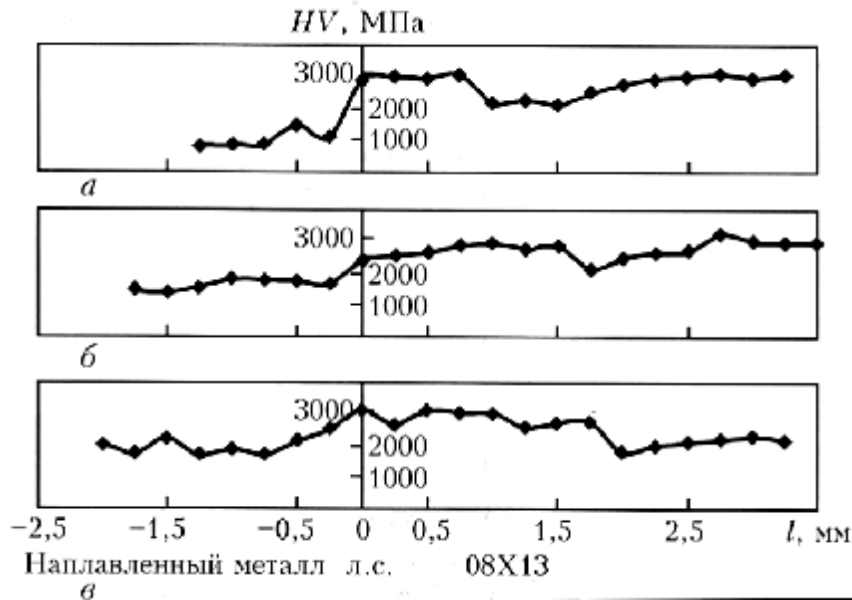


Рис. 7. Распределение микротвердости в ремонтных наплавках, выполненных электродами АНВ-70Б на стали 16ГС+08X13:

- а – после 38-и летней эксплуатации в колонне по пределу нефти;
- б – с предварительным и сопутствующим подогревом ремонтной зоны до 350 °С;
- в) с термообработкой ремонтной зоны до наплавки по режиму: 640 °С – 1ч, воздух.

Перед началом ремонта проводилось комплексное обследование коррозионно-технического состояния корпусов колонн в следующем объеме.

1. Анализ технической и эксплуатационной документации на обследуемое оборудование.
2. Визуально-оптический осмотр внутренней и наружной поверхностей корпуса, опор, люков-лазов и штуцеров.
3. Толщинометрия стенок корпуса, люков-лазов, штуцеров.
4. Определение твердости по Бринеллю коррозионностойкого слоя 08X13, плакирующего на сварных швах и ремонтных наплавках, основного несущего слоя корпуса изнутри и снаружи (если это возможно) и элементов опоры колонны. С использованием данных твердости производится расчет механических свойств основного слоя и элементов опоры колонны.

5. Абразивная зачистка и разделка дефектных мест (трещин, коррозионных повреждений и др.), цветная капиллярная, а в отдельных местах и ультразвуковая дефектоскопия (УЗК) дефектных зон элементов колонны. При необходимости проводятся исследования микроструктуры.

6. Нанесение на планшеты (развертки внутренней поверхности корпуса) мест обнаруженных дефектов, замера твердости элементов конструкции, капиллярной и ультразвуковой дефектоскопии.

7. Подготовка протоколов обследования и актов о возможности ремонта колонны.

По новой технологии с использованием электродов марки АНВ-70Б в 2005 г. на производстве № 3 ПАО «УкрТаТнафта» после 38 лет эксплуатации были отремонтированы колонны К-2, К-5 и К-6 из стали Ст3сп + 08Х13 с повышенной твердостью плакирующего слоя 08Х13 до 2500-3500 МПа.

Часть швов для сравнения по решению ПАО «УкрТаТнафта» было отремонтировано электродами концерна «Bohler» марки FOX CN 23/12-A.

Заварка дефектов в основном слое производилась электродами марки УОНИИ 13/45 типа Э-42А по ГОСТ 9466-75 и ГОСТ 9467-75, техника сварки общепринятая в отрасли, подогрев и термическая обработка ремонтных зон, несмотря на повышенную твердость слоя 08Х13, не производились.

Примеры ремонта плакирующего и основного слоя (рис. 8):

- а – форма разделки дефекта и последовательность наплавки валиков электродами переходного (1 – 5) и коррозионностойкого (6 – 10) слоев;
- б – макроструктура металла сварного соединения и наплавки.

После ремонта произведен стандартный объем испытаний: визуально-оптический контроль отремонтированных и смежных зон, УЗК, гидравлические испытания корпуса в сочетании с акустико-эмиссионным контролем.

Трещины и другие дефекты в отремонтированных зонах, где при ремонте применялись электроды АНВ-70Б, не обнаружены.

Колонны после ремонта запущены в эксплуатацию, ресурс их эксплуатации был продлен на 2 года до 2007 г.

В 2007 г. в ходе очередного планового ремонта этих колонн трещины и другие дефекты в ремонтных зонах, выполненных с использованием рекомендованной технологии и электродов АНВ-70Б, не были выявлены.

Трещины и другие дефекты в колоннах К-2 и К-5 были обнаружены в ранее неремонтированных местах.

Ремонт колонн полностью был выполнен с использованием электродов

АНВ-70Б. Колонны К-2, К-5 и К-6 признаны годными, ресурс их эксплуатации был снова продлен на 2 года (до 2009 г.).

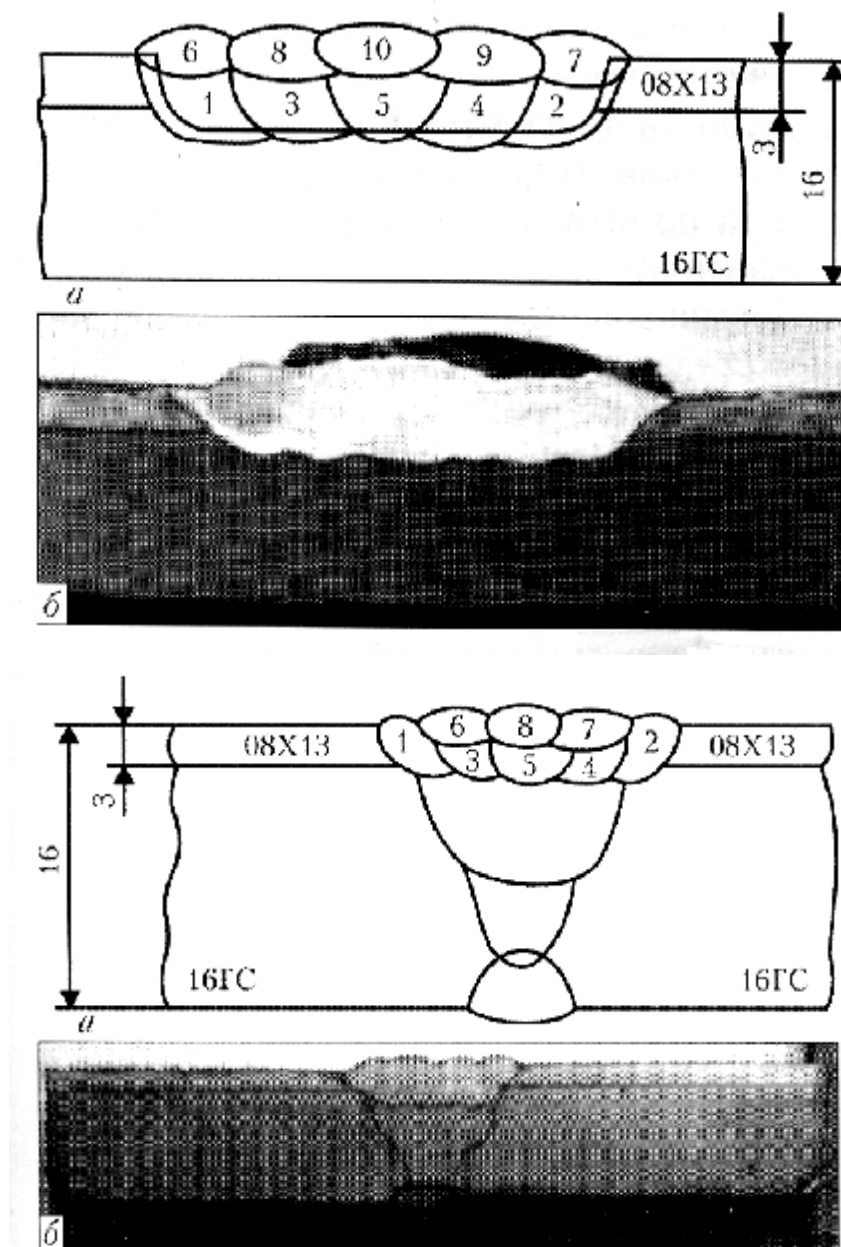


Рис. 8 Примеры ремонта дефектных зон

В 2009 г. указанные колонны вновь были подвергнуты плановому ремонту.

Сбоев, нарушений технологического процесса при эксплуатации колонн К-12/1 и К-12/2 с 2005 по 2009 гг. не было, поэтому эти колонны в 2009 г. не вскрывались.

В колонне К-6 дефекты, подлежащие ремонту методами сварки, не были обнаружены, поэтому предполагалось продление ресурса ее эксплуатации на 4 года. В колоннах К-2 и К-5 дефекты (трещины в швах и в ОШЗ по слою 08Х13) были обнаружены только в неремонтированных ранее зонах. Исключением была только зона заплаты размером 700 × 400 × 30 мм из стали 20К, вваренной в 2005 г. в полусферический переходник колонны К-5 диаметром 8000 ÷ 5500 мм. По периметру заплаты произошел отрыв коррозионностойкого слоя 08Х13 на длине до 3 – 5 мм.

Дефектные места в колоннах К-2 и К-5 были отремонтированы снова по разработанной технологии с использованием электродов марки АНВ-70Б.

Колонны признаны годными и ресурс их эксплуатации в третий раз был продлен на 2 года (до 2011 года). Учитывая положительные результаты и накопленный опыт, в 2009 г. на ПАО «УкрТаТнафта» в производстве № 2 с использованием описанной технологии была отремонтирована колонна К-1 установки Л-35-11/300 по изготовлению светлых фракций нефтепродуктов.

Колонна К-1 эксплуатируется в более жестких условиях по сравнению с колоннами К-2, К-5, К-6 производства № 3. Размеры колонны К-1: высота 26 м, диаметр 2,2 м, изготовлена из стали СтЗсп+08Х13 толщиной 20 мм (обечайка) и 21 мм (днища); в эксплуатации находится с 1965 г. Конструктивно она более жесткая по сравнению с колонной К-2 производства № 3 (14 поясов, 2 днища, сваренных из отдельных элементов; к корпусу приварено 12 люков-лазов Ду-450мм из двухслойной стали 20К+12Х18Н10Т и более 20 штуцеров Ду50, Ду100, Ду300 и Ду350 мм из стали 12Х18Н10Т).

Рабочая среда – нестабильный гидрогенизат (бензин + углеродно-водородная смесь) более агрессивная, давление в колонне 1,4 МПа (в 7 раз выше, чем в колонне К-2), температура эксплуатации 270 °С (низ колонны).

Твердость металла основного слоя СтЗсп – на уровне нормативных требований (несколько ниже 1900 МПа), плакирующего слоя 08Х13 больше нормативного в среднем на 300 МПа (~ 2500 МПа). При вскрытии и обследовании корпуса колонны К-1 в 2007 г. были выявлены трещины в сварных швах и в околошовной зоне в виде сетки в слое 08Х13 (рис. 9) и питтинговое поражение слоя 08Х13 в ОШЗ сварных швов глубиной до 3 – 7 мм.

Ранее, в 2007 г., ремонт колонны производился по старой технологии с использованием для плакирования швов и ремонта слоя 08Х13 электродов марки 03Л-6 типа Э-10Х25Н13Г2. В 2009 г. при выполнении очередного ремонта колонны К-1 установлено: количество и длина трещин в сварных швах

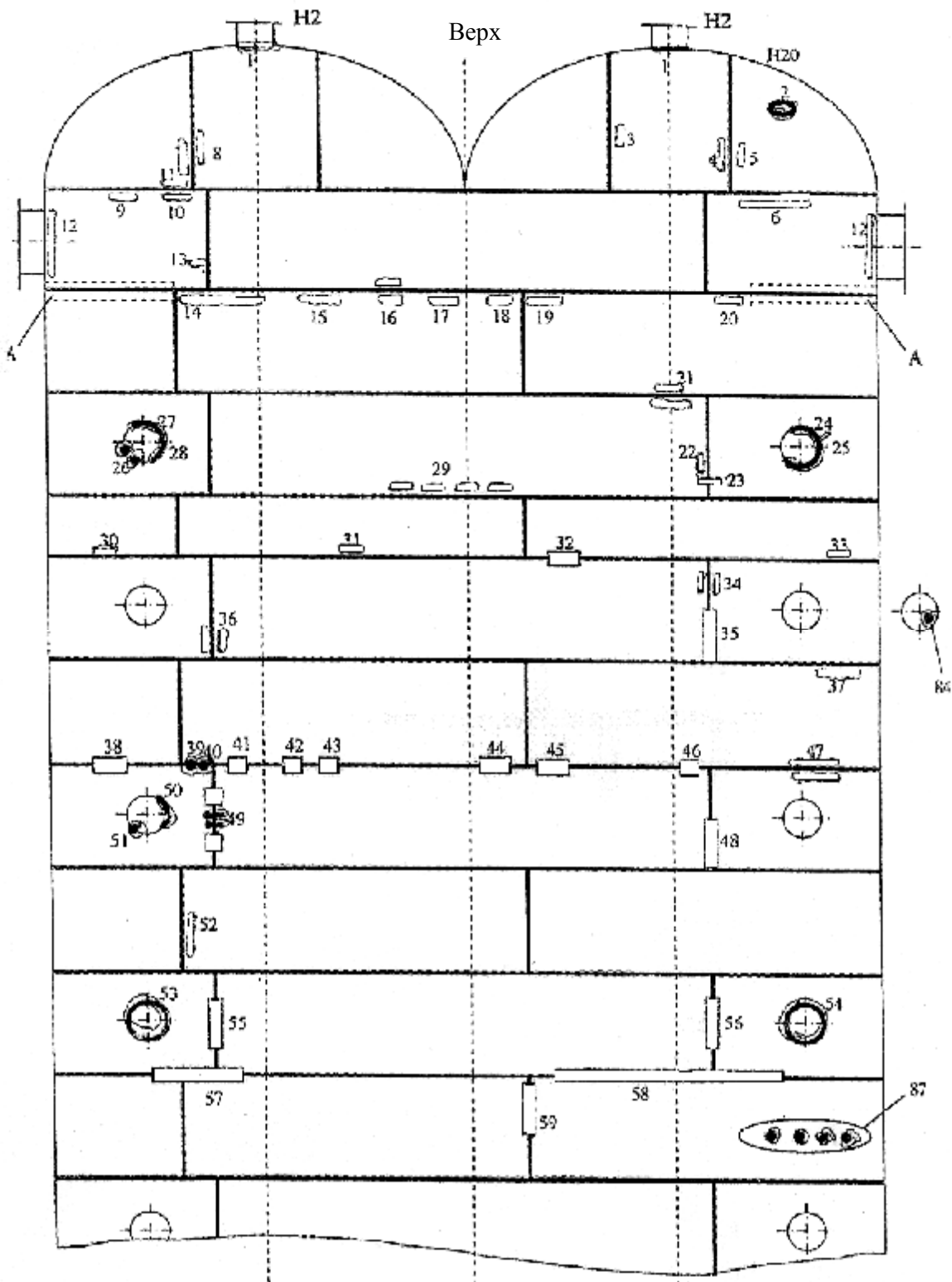


Рис. 9. Схема расположения дефектов (трещин, питтингов, язв, сосредоточенной коррозии) в сварных швах и ОШЗ в слое 08X13 в верхней части колонны К-1 выявленных в ходе плановых ремонтов в 2007 г.

и в ОШЗ по слою 08X13 увеличились по сравнению с коррозионно-техническим состоянием колонны при выполнении ремонта в 2007 г. (рис. 10).

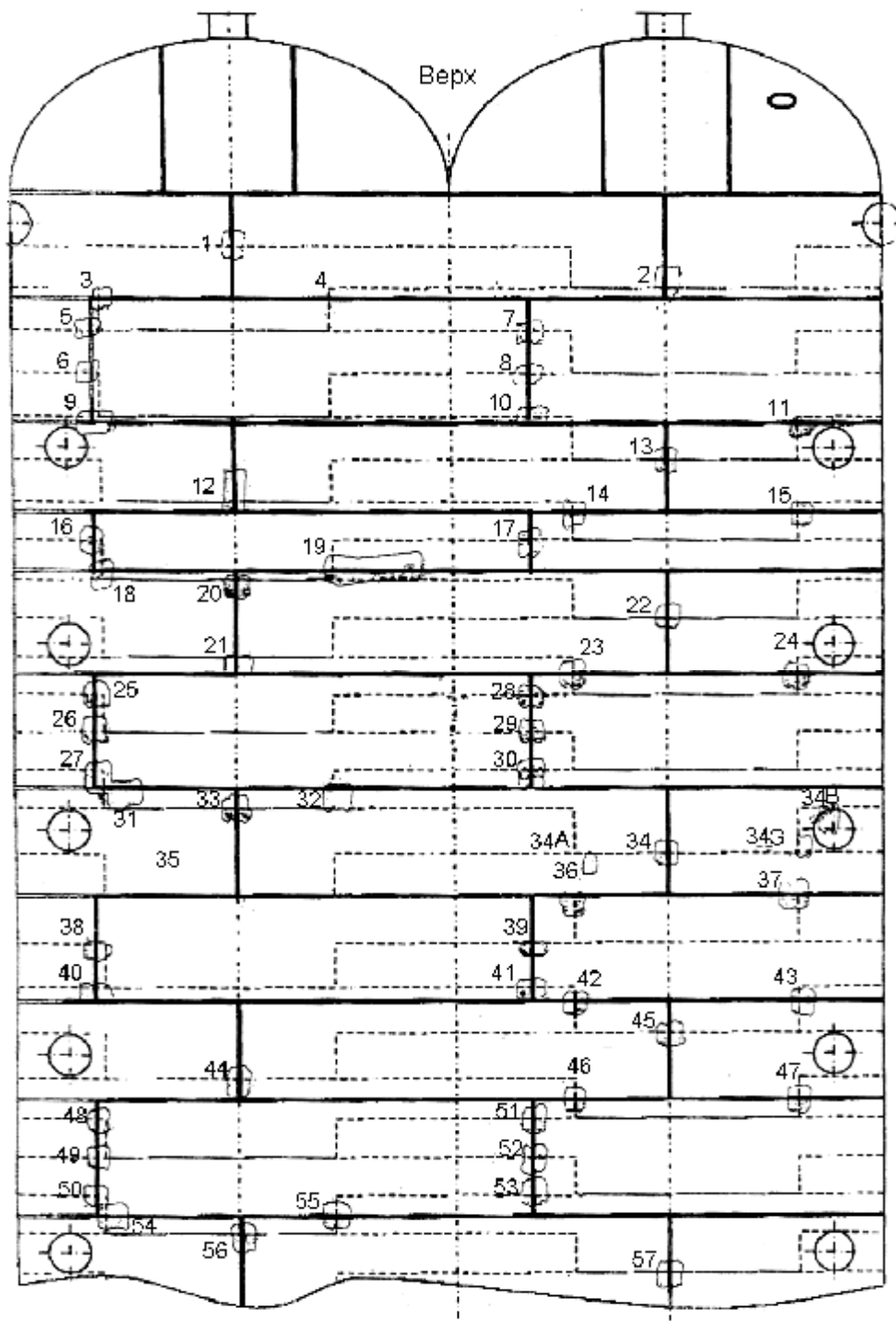


Рис. 10. Схема расположения дефектов (трещин, питтингов, язв, сосредоточенной коррозии) в сварных швах и ОШЗ в слое 08X13 в верхней части колонны К-1, выявленных в ходе плановых ремонтов в 2009 г.

Увеличилось также питтинговое повреждение слоя 08X13.

Твердость металла слоев за 2 года эксплуатации с 2007 г. практически не изменилась.

Учитывая сравнительно невысокий уровень коррозионно-технического состояния колонны, была произведена тщательная зачистка и разделка трещин в швах и в ОШЗ и контроль в описанном выше объеме.

Заварку дефектов в основном слое СтЗсп и сварных швах произведено электродами УОНИИ 13/45, плакирование дефектных зон – электродами АНВ-70Б.

Произведен 100 % капиллярный контроль всех ремонтных зон, в отдельных местах также УЗК.

После подварки дефектных мест произведено гидроиспытание колонны в сочетании с акустико-эмиссионным контролем.

Колонна признана годной и запущена в эксплуатацию.

Ресурс эксплуатации колонны продлен на 2 года до 2011 г.

Выводы.

1. ИЭС им. Е.О. Патона, ОАО «УкрНИИхиммаш» и ПАО «УкрТаТнафта» разработана и применена базовая технология ремонта колонного оборудования из двухслойных сталей СтЗсп + 08X13, 16ГС+08X13 с повышенным уровнем твердости коррозионностойкого слоя 08X13 после длительной сверхнормативной эксплуатации.

2. Опыт оценки состояния колонн К-2, К-5, К-6 и К-1 производств № 3 и № 1 ПАО «УкрТаТнафта» показывает, что после ремонта и устранения трещин ресурс их эксплуатации может быть продлен на 2 года, а после очередного переосвидетельствования и на более длительные сроки.

3. Базовая технология может быть использована для ремонта колонн других типов.

Список литературы: 1. Можливості ремонту колонного обладнання нафтопереробних заводів з метою подовження ресурсу експлуатації // Зб. наукових статей інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона. – К.: 2006. – С. 501 – 505. 2. *Чекотило Л.В.* Продление эксплуатации колонного оборудования нефтеперерабатывающих производств / [*Л.В. Чекотило, Ю.Н. Каховский, А.В. Булат та інші.*] // Автоматическая сварка. – 2006. – № 11. – С. 30 – 35. 3. Обладнання технологічне нафтопереробних, нафтохімічних та хімічних виробництв. Технічне діагностування. Загальні технічні вимоги; ДСТУ 4046-2001. – [Чинний від 2007-07-01]. – К. : Держстандарт України, 2006. – 24 с. – (Національні стандарти України).

А.И. КАБАШНЫЙ, ОАО «УкрНИИХиммаш», г. Харьков, Украина

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ШВОВ СВАРНЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ПРОТИВ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН

Проведено дослідження про вплив конструктивних та технологічних факторів на схильність швів зварних пластинчатих теплообмінників до утворення тріщин. Вибрано профілі проставок, які забезпечують стабільний провар кореня шва в середовищі аргону. Запропоновано міри по попередженню появи тріщин в корені шва при виконанні торцевих з'єднань в пластинчатих теплообмінниках.

Проведено исследование о влиянии конструктивных и технологических факторов на склонность швов сварных пластинчатых теплообменников к образованию трещин. Выбранная профили проставок, обеспечивающих стабильный провар корня шва в среде аргона. Предложены меры по предупреждению появления трещин в корне шва при выполнении торцевых соединений в пластинчатых теплообменниках.

A study on the impact of structural and technological factors on the propensity of seams welded plate heat exchangers for cracks. Your account prostavok that provide stable weld root penetration in the argon. A measure to prevent cracking at the root weld butt joints in the performance of plate heat exchangers.

Решаемая проблема: при эксплуатации сварных пластинчатых теплообменников, изготовленных из сталей 12X18H10T и 10X17H13M2T на предприятиях химической промышленности известны случаи выхода их из строя из-за образования перетоков в полостях, явившихся следствием разрушения сварных швов. Исследования микроструктуры сварных швов помогло выявить то обстоятельство, что трещины всегда располагаются в области конструктивного непровара. Одновременное воздействие коррозионной среды и динамических нагрузок при наличии непровара, который может служить концентратором напряжений типа надреза, приводит к появлению коррозионноусталостных трещин. В соединениях с прямоугольной проставкой, применяемых при изготовлении теплообменной аппаратуры из листа, было обнаружено появление трещин при сварке. Непровары и трещины в сварных швах способны вызвать высокий уровень напряжений и, таким образом, существенно понизить прочность сварных соединений [1]. Возникла необходимость получения качественных сварных соединений при изготовлении сварных пластинчатых теплообменников.

Постановка задачи: исследование влияния конструктивных и технологических факторов на образование трещин при сварке и разработка мер по их предупреждению.

Испытания проводились на моделях, имитирующих соединение проставка-пластина-проставка и представляли собой несколько таких соединений. Изучалось влияние сварочных материалов, профиля проставки и режимов сварки на образование трещин. Известно [1], что усталость сварных соединений в значительной степени зависит от глубины проплавления соединяемых элементов, поэтому стремятся к созданию сквозного проплавления. Конструктивные особенности соединения (малая ширина проставки) и возможность проявления остаточных напряжений с увеличением объема наплавленного металла не позволяют достигнуть сквозного проплавления существующими в производстве теплообменников видами сварки. В связи с этим для исследования взят профиль проставки с деконцентратором напряжений, представляющим продольную канавку в виде полуокружности. Профили проставок, исследованные в экспериментах, см. рис. 1. Толщина пластин 1,0 мм.

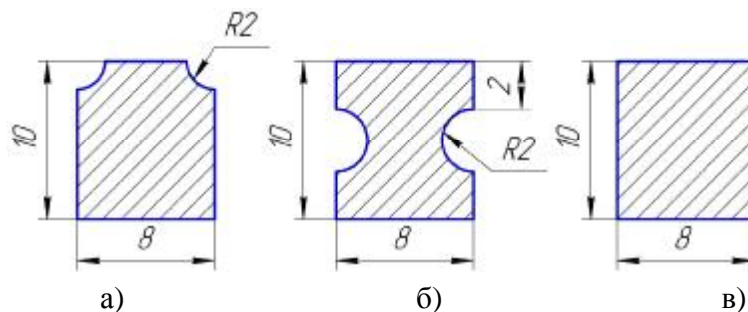


Рис. 1. Профили проставок, использованные в экспериментах

Обнаружение трещин и изучение особенностей формирования структуры швов производилось металлографически на шлифах, вырезанных поперек шва моделей (рис. 2). Проставки и пластины изготавливались из сталей 12X18H10T и 10X17H13M2T.

В качестве присадочного материала использовались следующие проволоки: Св.-06X19H9T, Св.-07X19H10Б, Св.-05X20H9ФБС – для сварки стали 12X18H10T и Св.-04X19H11M3, Св.-06X20H11M3ТБ, Св.-01X19H18Г10АМ4 – для сварки стали 10X17H13M2T. Сварочные материалы выбирались в соответствии с требованиями нормативных документов [2, 3] и результатами исследований [4].

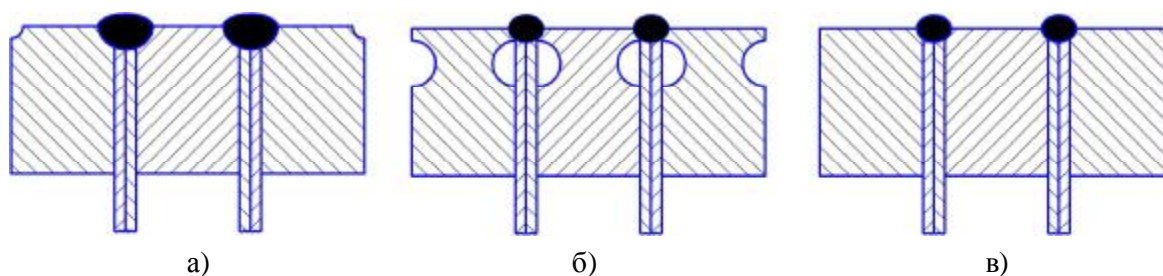


Рис. 2. Поперечные сечения моделей для металлографических исследований

Сварка производилась в приспособлении, с конструктивным зазором. Рост кристаллитов в корне шва происходит в направлении почти параллельном зазору, вследствие чего место их стыковки является ослабленным. В данной работе, с целью более благоприятной направленности кристаллитов, металл сварочной ванны подвергался реверсивному электромагнитному перемешиванию.

Для установления зависимости между режимом сварки и стойкостью швов против образования трещин внимание уделялось следующим параметрам: силе сварочного тока, напряжению дуги, скорости сварки.

При сварке соединения с прямоугольным профилем проставки в интервале токов 170 – 210 А, напряжений 15 – 17 В, скоростей сварки 4 – 7 м/ч наблюдалось образование трещин в корне шва (рис. 2 в).

При $I_{св.}=185$ А, $U_{д}=17$ В, $V_{св}=6$ м/ч, образуется минимальное количество микротрещин. Результаты опытов свидетельствуют о том, что в соединении с прямоугольным профилем проставки, независимо от величины и исследуемых параметров возможно появление трещин, в большинстве случаев распространяющихся по линии сплавления (рис. 3).

Наиболее стабильные результаты получены в соединении (рис. 2 а).

При глубине проплавления, не превышающей 3 мм, линия сплавления в таком соединении имеет плавное очертание с наличием почти прямолинейного участка в корне шва, образующего прямой угол с плоскостью пластины (рис. 4). Трещины в шве отсутствовали.

Образование плоской площадки по всей длине шва препятствует стыковке кристаллитов и исключает появление трещин. Одним из определяющих факторов, способствующих возникновению трещин при сварке соединения с прямоугольной проставкой (по результатам металлографического анализа) можно считать скачкообразность линии сплавления к корне шва. Скачки образуются за счет более быстрого расплавления пластины и связаны с изменением направленности тепловложения при ручной сварке и величиной зазора.

В соединении с деконцентратором напряжений при незначительном провисании валика также наблюдаются трещины в корне шва см. рис. 5а.

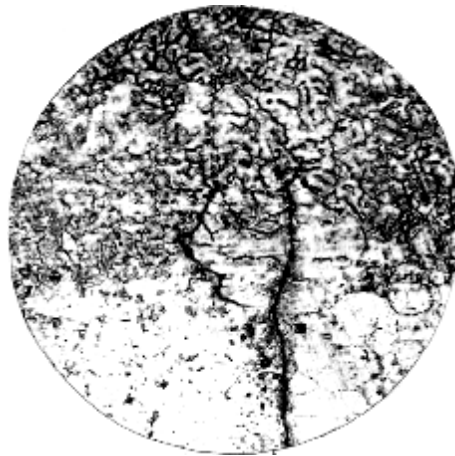


Рис. 3. Микроструктура поперечных сечений швов сварных соединений стали 12Х18Н10Т с прямоугольной формой проставки, выполненных аргонодуговой сваркой с присадкой Св.-07Х19Н10Б

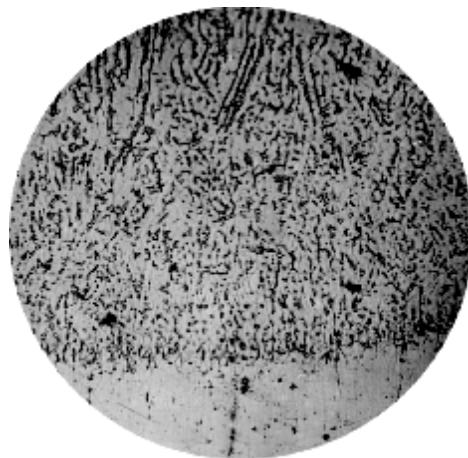


Рис. 4. Микроструктура поперечных сечений швов сварных соединений стали 12Х18Н10Т со скругленной формой проставки, выполненных аргонодуговой сваркой с присадкой Св.-07Х19Н10Б

Избежать трещинообразования в соединении (рис. 2 б) удастся при полном и надежном проплавлении корня шва (рис. 5 б и в).

Достичь проплавления можно при тщательной отработке режимов сварки и точном их соблюдении. Применение механизированных видов сварки способствует стабильности проплавления корня шва. Плавный переход от проставки к пластине при обеспечении плоской или слабоогнутой поверх-

ности валика со стороны сварки – необходимое условие качественного формирования корня шва в сварном соединении с деконцентратором напряжений.

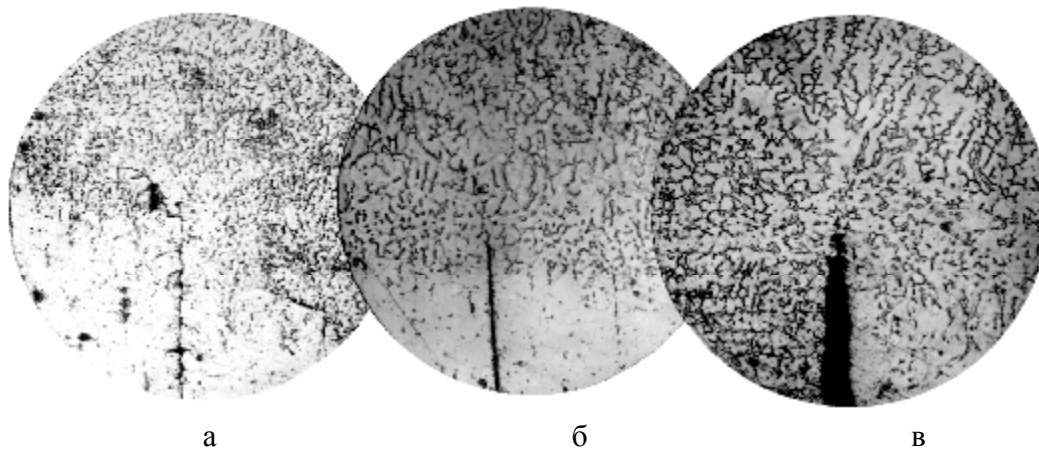


Рис. 5 Микроструктура поперечных сечений швов сварных соединений стали 12X18H10T с деконцентратором напряжений, выполненных аргонодуговой сваркой с присадкой Св.-07X19H10Б

Обращает на себя внимание то обстоятельство, что присадочный материал существенного влияния на образование трещин не оказывал, за исключением проволоки Св.-01X19H18Г10АМ4, применение которой способствует повышению трещиностойкости. Электромагнитное перемешивание сварочной ванны, хотя и приводило к измельчению структуры и ее дезориентации, однако не предупреждало появления скачков линии сплавления в корне шва в сварном соединении с прямоугольной проставкой.

Выводы.

В результате проведенных исследований было установлено, что причиной образования трещин в швах сварных пластинчатых теплообменников является конструктивный непровар и неплавный переход от основного металла к наплавленному в корне шва; выбраны профили проставок и типы соединений гарантирующие, при соблюдении оптимальных режимов сварки, качественное сварное соединение.

Наиболее приемлемой формой проставки, с точки зрения технологичности является проставка (рис. 1 а).

Линия сплавления и характер кристаллизации сварочной ванны в соединениях с такой проставкой обеспечивает получение сварного шва без микротрещин в корне шва.

Список литературы: 1. *Кудрявцев И.В.* Усталость сварных конструкций / *И.В. Кудрявцев, Н.Е. Наумченков.* – М.: Машиностроение, 1976. – 272 с. 2. Зварювання плавленням металевих матеріалів в хімічному та нафтовому машинобудуванні. Вимоги до технологічного процесу; ГСТУ 3-020-2001. – К.: М-во промислової політики України, 2001. – 213 с. – (Нормативний документ міністерства промислової політики України). 3. Посудини та апарати сталеві зварні. Загальні технічні умови; СОУ МПП 71.120-217:2009. – К.: М-во промислової політики України, 2009. – 339 с. – (Нормативний документ міністерства промислової політики України). 4. *Каховский Н.И.* Сварка высоколегированных сталей / *Н.И. Каховский.* – К.: Техніка, 1975. – 376 с. 5. *Петрушин И.В.* Новая технология сварки торцовых соединений из стали и сплава аустенитного класса / [*И.В. Петрушин, А.Ф. Малыгин, А.К. Гуро и др.*] // Сварочное производство. – 1976. – № 9. – С. 15 – 17.

Поступила в редколлегию 25.03.10

УДК 66.011

О.И. НЕВШУПА, Д.В. БОБКОВ, канд. техн. наук,
В.А. КАЧАНОВ, канд. хим. наук, **Ю.Б. ДАНИЛОВ**, докт. техн. наук,
С.Е. БОГУЧАРОВА, Н.Е. ЗАГОРУЛЬКО, Е.К. ГВОЗДИКОВА,
В.Ю. КОЗИН, ОАО «УкрНИИХиммаш», г. Харьков, Украина

РЕГЕНЕРАЦИЯ ОТРАБОТАННЫХ РАСТВОРОВ КАУСТИКА В ПРОИЗВОДСТВЕ ЦИРКОНИЯ

Об'єктом досліджень є водний розчин, отриманий після вилуджування водою цирконієвого спека, що містить їдкий натр с домішками з'єднань кремнію, алюмінію, заліза, титана, кальцію, цирконію з метою розробки технології регенерації їдкого натру з відпрацьованих розчинів цирконієвих виробництв. Проведені дослідження та отримані практичні результати по очистці розчинів їдкого натру методом каустифікації, фільтрування отриманої після каустифікації суміші, концентрування очищених від домішок розчинів їдкого натру. Проведена оцінка якісного состава отриманих при регенерації їдкого натру відходів, запропоновані способи їх утилізації.

Объектом исследования является водный раствор, получаемый в результате выщелачивания водой циркониевого спека, и содержащий едкий натр с примесями соединений кремния, алюминия, железа, титана, кальция, циркония с целью разработки технологии регенерации едкого натра из отработанных растворов циркониевого производства. Проведены исследования и получены практические результаты по очистке растворов едкого натра методом каустификации, фильтрованию полученной после каустификации суспензии, концентрированию очищенных от примесей растворов едкого натра. Проведена оценка качественного состава получаемых при регенерации едкого натра отходов, предложены способы их утилизации.

The object of research is the aqueous solution obtained after vyludzhuvannya zirconium heat water containing sodium hydroxide with impurities of compounds of silicon, aluminum, iron, titanium, calcium,

zirconium, to develop technologies regeneration of spent caustic soda rozchynyv zirconium production. Conducted research and practical results obtained by caustic soda cleaning solution by kaustyfikatsiyi, obtained after filtering kaustyfikatsiyi mixture purified from impurity concentration of caustic soda solution. The assessment of the qualitative composition obtained by regeneration of caustic soda waste, the proposed methods of disposal.

Решаемые проблемы. Металлический цирконий находит широкое применение в черной и цветной металлургии, химическом и атомном машиностроении, производстве искусственного волокна, других отраслях промышленности [1].

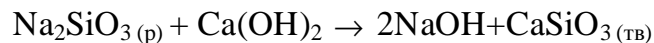
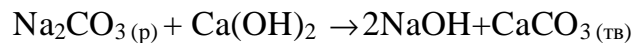
В промышленности известен метод разложения циркониевых концентратов, состоящий в том, что циркон с содержанием 56 – 60 % ZrO_2 спекается при температуре 600 – 700 °С с едким натром.

При водном выщелачивании спека в раствор переходит избыток щелочи, водорастворимые силикат натрия и карбонат натрия (как поступивший с исходным шелоком, так и образованный в процессе спекания).

Щелочные растворы после водного выщелачивания спека подлежат регенерации с получением твердого едкого натра 96 % и возвратом его на стадию спекания с циркониевым концентратом.

Процесс регенерации отработанных щелочных растворов должен включать очистку растворов от примесей, концентрирование очищенных растворов, получение твердого едкого натра, утилизацию отходов.

Одним из наиболее перспективных способов очистки является известковый способ, основанный на каустификации карбоната и силиката натрия известью, в результате которого образуются труднорастворимые соли $CaCO_3$ и $CaSiO_3$. При каустификации повышается концентрация едкого натра за счет обменных реакций [2 – 4]:



Фильтрация суспензии целесообразно проводить с применением фильтр – прессов – они находят широкое применение в промышленности при фильтрации суспензий, шламов, пульп, обладающих высоким гидравлическим сопротивлением и обеспечивают эффективную и экономичную промывку отфильтрованного осадка непосредственно на фильтре, получение осадков с пониженной влажностью.

Максимальная рабочая температура перерабатываемой суспензии может достигать 95 °С, в особых случаях – 105 °С.

Выпарные установки, предназначенные для концентрирования растворов NaOH, могут быть оснащены выпарными аппаратами различных конструкций: пленочного типа, с естественной и принудительной циркуляцией раствора.

Очистка растворов едкого натра от имеющихся примесей необходима для получения готового продукта, соответствующего по качеству требованиям предъявляемым к едкому натру, полученному химическим способом. В щелочных растворах, получаемых при водном выщелачивании циркониевого спека, примесями являются смеси солей Na_2CO_3 и Na_2SiO_3 ; сульфат ионы практически отсутствуют.

Очистку от примесей концентрированного до 50 % NaOH раствора проводят в отстойниках, в которых происходит осаждение примесей. Одновременно с осаждением раствор в отстойниках охлаждают с целью наиболее полного выделения из раствора кристаллизующихся примесей.

Технология получения твердого едкого натра имеет свои особенности и включает две основные стадии: обезвоживания и получения при кристаллизации твердого продукта.

С повышением концентрации щелочи температура кипения растворов возрастает, и окончательное обезвоживание едкого натра проводят при высокой температуре [4]. Процесс обезвоживания необходимо проводить в таких условиях, чтобы ни на одной стадии не образовывалась твердая фаза. Для полного обезвоживания едкого натра при атмосферном давлении необходима температура около 500 °С. При плавке едкого натра при пониженном давлении температура обезвоживания может быть снижена до 350 – 400 °С.

Сотрудниками УкрНИИхиммаша предложены способ получения твердого едкого натра и установка для реализации указанного способа.

При получении моногидрата едкого натра исходный раствор вначале концентрируют до 70 – 75 % по едкому натру, затем очищают его от примесей, после очистки подвергают кристаллизации при температуре 0 – 60 °С с получением чешуированного продукта.

При получении безводного едкого натра исходный раствор концентрируют до 70 – 75 %, производят очистку его от примесей. После очистки от примесей раствор концентрируют до 80 – 92 % и подвергают кристаллизации при температуре 150 – 300 °С с получением чешуированного продукта.

При одновременном получении безводного NaOH и моногидрата NaOH раствор, оставшийся после выделения из него безводного едкого натра, подвергается кристаллизации при температуре 20 – 60 °С. В результате кристаллизации получают чешуированный моногидрат едкого натра.

Постановка задачи. Данная работа направлена на решение актуальных задач по регенерации отработанных растворов едкого натра в производстве циркония и его возврату в технологический процесс.

Методика проведения работ. Для анализа растворов на содержание NaOH и Na₂CO₃ применен объемный метод, Na₂SiO₃ – фотоколориметрический и объемный методы.

Кинематическая вязкость растворов определена с помощью вискозиметра ВПЖ-2 с точностью до 0,0002 мм²/с. Плотность растворов определена ареометром с точностью до ±0,001 г/см³ и пикнометрически с точностью ±0,0002 г/см³. Температура кипения растворов определена при помощи термометра с точностью ±0,1 °С.

Очистка щелочных растворов. Обработку исходного щелочного раствора проводили гидроокисью кальция (100 г/дм³ в пересчете на CaO) при комнатной температуре и при температуре 98 – 100 °С, при перемешивании в 2 этапа по 2 – 4 часа. Обработку щелочного раствора проводили негашеной известью (100 г CaO на 1 дм³ раствора) при комнатной температуре и при температуре 70 – 100 °С, при перемешивании в 2 этапа.

Каустифицированный щелочной раствор декантировали, осадок фильтровали и затем промывали дистиллятом от щелочи до pH 9 – 10.

Определяли скорость осаждения полученного осадка. Для этого в цилиндр помещали суспензию после каустификации и с помощью секундомера измеряли время полного осветления щелочного раствора. Скорость осаждения определяли отношением высоты осветления раствора к времени осаждения.

Гранулометрический анализ состава шлама проводили с помощью оптико-электронной системы «Миллипор», США, позволяющей измерять распределение частиц от 0,5 до 100 мкм.

Фильтрация растворов, полученных в результате очистки. Полученный в результате каустификации раствор после отстаивания в емкости – отстойнике декантировали. Осветленную часть раствора направляли для последующего концентрирования, а сгущенную часть раствора направляли на раз-

деление в лабораторную установку, моделирующую работу друк – фильтра. Площадь поверхности фильтрования модельного друк – фильтра составляла 0,0084 м². В качестве фильтрующей перегородки использовали полипропиленовую ткань с размером ячейки 15 – 20 мкм.

Концентрирование растворов и получение твердого чешуированного едкого натра. Для исследования процессов концентрирования растворов с последующим получением твердого едкого натра была смонтирована лабораторная установка.

Исследования проводились в следующей последовательности. Очищенный от примесей раствор едкого натра с содержанием NaOH 120 г/дм³ в объеме 2 дм³ заливали в емкость испаритель с подсоединённым холодильником и емкостью для сбора конденсата. Упаривание раствора в емкости – испарителе 1 проводили с помощью электронагрева. Ориентировочное значение концентрации NaOH в растворе при упаривании определяли по температуре кипения раствора и по количеству конденсата в тарированной емкости – сборнике конденсата. Замер температуры раствора осуществляли ртутным поверенным термометром с точностью ±2 °С. После достижения в емкости – испарителе концентрации 50 % NaOH определяли содержание в растворе основных компонентов (NaOH; Na₂CO₃; Na₂SiO₃) аналитическим методом.

В отобранном после упаривания раствора конденсате с целью определения каплеуноса определялось объемным методом содержание NaOH.

Упаренный раствор в количестве 1,8 дм³ с содержанием, масс. %: (NaOH – 49-50; Na₂CO₃ – 2,9; Na₂SiO₃ – 0,32) из емкости – испарителя переливали в емкость – отстойник и выдерживали в течение 6 – 9 ч. до достижения раствором комнатной температуры. После выдерживания раствор декантировали; осветленную его часть направляли на дальнейшее концентрирование, а сгущенную часть (шлам) – отправляли на фильтрацию и на стадию каустификации.

Очищенный от примесей раствор едкого натра с концентрацией 50 % NaOH упаривали согласно вышеописанной методике до концентрации 96 % NaOH.

Расплав едкого натра с концентрацией 96 % NaOH и температурой 360 °С заливали в, предварительно нагретую с помощью электроподогрева до температуры близкой к температуре расплава, ванну кристаллизатор.

В результате контакта расплава NaOH в ванне кристаллизатора с поверхностью вращающегося вальца имеющего более низкую температуру, чем

температура расплава, на поверхности вальца происходила кристаллизация с образованием тонкой корки твердого продукта. Полученный на вальце твердый продукт в виде чешуек срезали ножом и собирали в емкость сбора готового продукта.

Экспериментальная часть. Определение физико-химических свойств исходных, промежуточных и конечных продуктов. В табл 1 представлены результаты определения физико-химических свойств исходных, промежуточных растворов и полученного твердого едкого натра.

Таблица 1

Физико-химические свойства

№ п/п	Концентрация по NaOH, г/дм ³ (%)	Плотность (30 ⁰ С), г/см ³	Температура кипения, °С	Коэффициент динамической вязкости (30 °С), Па·с	Удельная теплоемкость (40 ⁰ С), кДж/(м·град.)	Теплопроводность 100 ⁰ С,Вт/(м·К)
1	Исходный 60-65 (6)	1,145	101	0,0011	3,912	
2	Очищенный 122 (11)	1,121	103,5	0,0017	3,783	0,627
3	Упаренный 757 (50)	1,53	132,5	0,05	3,23	
4	Конечный продукт (96 % NaOH), твердый чешуированный	2,1	360	-	2,07	

Проведение лабораторных исследований по очистке раствора едкого натра. Очистке подвергались растворы, содержащие 65 – 80 г/дм³ NaOH; 50 – 60 г/дм³ Na₂SiO₃; 5-35 г/дм³ Na₂CO₃, а также модельные растворы, имеющие максимальные (раствор № 1) и минимальные (раствор № 2) концентрации компонентов примесей, а также минимальное содержание NaOH при максимальной концентрации примесей (раствор № 3). Данные о составе растворов приведены в табл. 2.

Были проведены эксперименты по очистке щелочных растворов с помощью каустификации с применением СаО при повышенной температуре.

Очистку отработанных щелочных растворов с помощью каустификации проводили в лабораторной установке, представляющей собой изготовленный из титана ВТ1-0 реактор емкостного типа, с мешалкой из фторопласта и

снабженный обратным холодильником. Температуру поддерживали автоматически с помощью контактного термометра с точностью ± 2 °С.

Таблица 2

Химический состав исследованных растворов

Наименование исходного щелочного раствора	Содержание, г/дм ³		
	NaOH	Na ₂ CO ₃	Na ₂ SiO ₃
Раствор №1, полученный от заказчика	79,6	28	51
Раствор №2, полученный от заказчика	65,5	21,6	38
Модельный раствор №1	80	35	60
Модельный раствор №2	65	5	50
Модельный раствор №3	65	35	60

Степень каустификации мало зависит от температуры [2], 97 % при 80 °С и 96,9 % при 100 °С, однако скорость протекания реакции существенно зависит от температуры. Так, при 80 °С максимальная степень каустификации достигается за 12 часов, а при 100 °С – за 3 – 6 часов. Кроме того, увеличение температуры приводит к образованию более крупных кристаллов осадка, что заметно облегчает процесс фильтрации.

В реактор заливали 5л исходного щелочного раствора, добавляли 250 – 500 г СаО. Раствор при перемешивании нагревали до 80 – 100 °С и при этой температуре выдерживали 3 часа, затем оставляли на 18 часов без разогрева и перемешивания и затем выдерживали еще 3 часа при той же температуре и перемешивании. Полученную суспензию оставляли для охлаждения до комнатной температуры и отделения образовавшихся труднорастворимых солей СаСО₃ и СаSiO₃.

По стехиометрии для полного осаждения карбонатов и силикатов из 5 дм³ модельного раствора № 3, необходимо 222,5 г 100 %-ной СаО. В связи с тем, что возможно не полное протекание реакции, были проведены опыты с 10 % избытком СаО (суспензия 1).

В результате реакции получен раствор следующего состава: 122 г/дм³ NaOH, 1,27 г/дм³ Na₂SiO₃, 2,45 г/дм³ Na₂CO₃. Степень каустификации составила 97,9 %. Для проведения исследований по определению максимальной степени каустификации нами был взят почти двойной избыток СаО (100 г на 1 дм³ СаО исходного раствора) (суспензия 2). В результате реакции получен раствор следующего состава: 120 г/дм³ NaOH, 0,87 г/дм³ Na₂SiO₃, 2,13 г/дм³ Na₂CO₃. Степень каустификации составила 98,3 %. После этого осветленный

щелочной раствор декантировали, а осадок фильтровали. Скорость отстоя осадка составила 1,2 см/мин.

Данные, полученные после очистки растворов, представлены в табл. 3. Для очистки раствора № 1, модельного раствора № 2 взято 200 % CaO от необходимого по стехиометрии, для раствора № 2, модельных растворов № 1, 3 взят 10 % избыток CaO от необходимого по стехиометрии.

Как видно из табл. 3, в результате каустификации концентрация щелочи увеличивается на 35 – 40 % за счет образования дополнительного количества едкого натра по реакции, а также за счет расхода воды на гашение CaO.

Проведение лабораторных исследований по фильтрованию. Первая часть исследований по фильтрованию проведена в лаборатории на модели друк-фильтра в соответствии с изложенной выше методикой.

Таблица 3

Химический состав декантированных растворов после очистки

Компонент	Содержание, г/дм ³									
	Раствор № 1 заказчика		Раствор № 2 заказчика		Модельный раствор № 1		Модельный раствор № 2		Модельный раствор № 3	
	Исх.	После каустификац.	Исх.	После каустификац.	Исх.	После каустификац.	Исх.	После каустификац.	Исх.	После каустификац.
NaOH	76,9	113,6	66,5	96,0	80,0	130,5	65,0	89,6	65,0	120-122
Na ₂ CO ₃	28,0	3,82	21,6	2,97	35	2,3	5,0	2,3	35,0	2,13-2,45
Na ₂ SiO ₃	60,0	3,12	38,0	1,1	60,0	0,85	50,0	0,85	60	0,87-1,27

Фильтрованию подвергалась сгущенная суспензия, получаемая в результате каустификации раствора едкого натра оксидом кальция CaO.

Эксперимент на фильтровальной воронке площадью поверхности фильтрования 0,002 м² показал, что суспензия относится к легко фильтруемым: продолжительность фильтрования 0,2 дм³ суспензии при давлении 4 атм составила 5 мин. Толщина осадка составила 40 мм.

Состав полученных фильтратов представлен в табл. 3.

Полученные осадки в количестве 0,76 кг (осадок 1 из суспензии 1) и 1,285 кг (осадок 2 из суспензии 2) были подвергнуты промывки холодной дистиллированной водой. Влажность осадков составила 30 – 40 %.

Эксперименты с промывкой осадка проведены на модели камерного фильтр-пресса с вертикальной поверхностью фильтрования площадью 0,0072 м².

Промывку осуществляли в 4 стадии длительностью по 5 мин. каждая.

На промывку отобрали по 0,375 – 0,38 кг осадка.

После пересчета на всю массу осадка, на промывку осадка 1 необходимо 1,675 дм³ воды, на промывку осадка 2 необходимо 2,85 дм³ воды. Объем раствора после объединения фильтрата и промывной воды суспензии 1 составляет 6,24 дм³, а концентрация 101,2 г/дм³, степень извлечения NaOH составляет 96,5 %; объем раствора из суспензии 2 составляет 7,17 дм³ при концентрации 87,7 г/дм³, степень извлечения по NaOH составляет 96,2 %. Потери Na с осадком составляют 0,9 %.

Таким образом, при практически равной степени каустификации и степени извлечения едкого натра применение значительного избытка CaO нецелесообразно и в дальнейшем проводить очистку щелочных растворов необходимо с 10 % избытком CaO.

Просушка осадка применяется для снижения конечной влажности осадка. Продолжительность просушки – 3-4 минуты.

В результате фильтрации и промывки на модели камерного фильтр-пресса был получен осадок влажностью 30 – 40 %, который хорошо отделялся от ткани, плотный, транспортабельный.

Состав осадка после фильтрования и промывки: CaCO₃ – 22,5 – 23,71 %; Ca(OH)₂ – 5,98 – 6,27 %; CaSiO₃ – 40,92 – 42,82 %; Na₂SiO₃ – 0,01 – 0,02 %; Na₂CO₃ – 0,02 – 0,06 % ; NaOH – 0,41 – 0,86 %.

С помощью оптико-электронной системы «Миллипор», США определен гранулометрический состав осадка после каустификации.

Как видно из рисунка, размер частиц не превышает 50 мкм.

Осадок, полученный после каустификации, направляется на захоронение либо на нейтрализацию кубового остатка установки регенерации азотной кислоты. Проведение исследований по концентрированию предварительно очищенного от примесей 50 % раствора NaOH и получению твердого чешуированного едкого натра (96 % NaOH). Процессы концентрирования растворов едкого натра, очистка их от примесей и получение твердого чешуированного продукта исследованы на лабораторной установке в соответствии с описанной выше методикой.

На первой стадии очищенный от примесей раствор едкого натра концентрировали от 9 % до 50 % NaOH при $t_{кип} = 132,5$ °С и атмосферном давлении.

Концентрация едкого натра в конденсате вторичного пара составляет 20 мг/дм³.

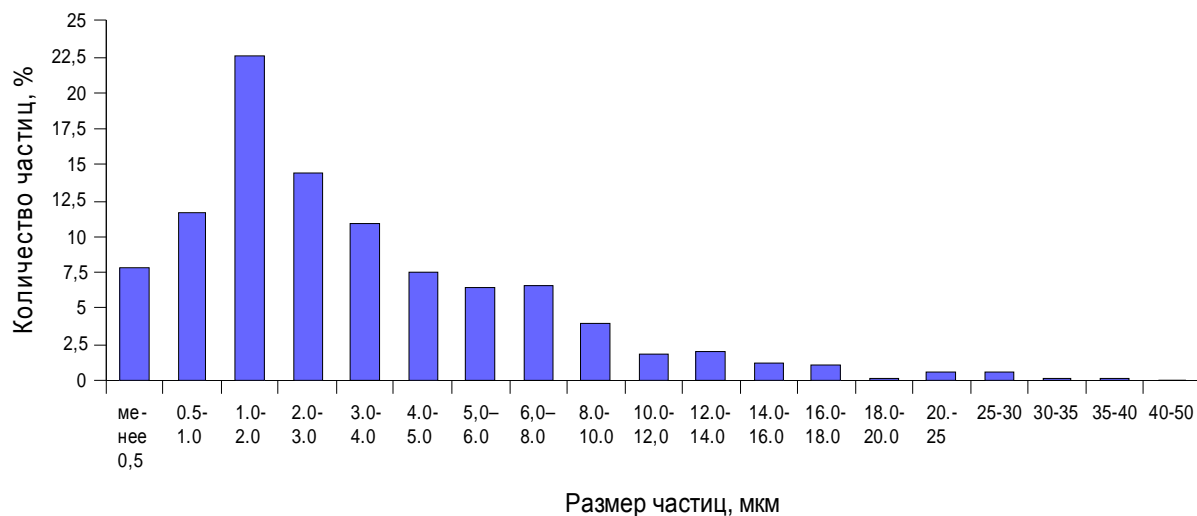


Рисунок – Гранулометрический состав осадка после каустификации

В результате концентрирования из 5 дм^3 9 % NaOH образуется $0,622 \text{ дм}^3$ раствора едкого натра следующего содержания: NaOH – 49,91 %; Na_2CO_3 – 0,55 – 0,93 %; Na_2SiO_3 – 0,31 – 0,57%.

Конденсат содержит 20 мг/дм^3 NaOH.

Далее указанный раствор помещали в емкость-отстойник, в которой производили его охлаждение и отстаивание. После разделения осветленной и сгущенной части (шлама) 22 г с 5 дм^3 9 % каустика, последнюю отбирали для проведения лабораторного анализа и определения состава. Состав шлама полученного после концентрирования раствора до 50 % по каустику составляет: NaOH – 40 %; Na_2CO_3 – 9,8 – 16 %; Na_2SiO_3 – 4,31 – 10,2 %, H_2O – 40 %.

Выход NaOH при концентрировании до 50 % составил 98,28 %.

50 %-ный раствор NaOH упаривали в емкости-испарителе до 96 % NaOH с получением расплава при $t_{\text{кип}} = 360 - 380 \text{ }^\circ\text{C}$. Концентрация едкого натра в конденсате вторичного пара составляет 1 г/дм^3 .

Из $0,498 \text{ дм}^3$ 50 % раствора едкого натра получается $0,236 \text{ дм}^3$ ($0,704 \text{ кг}$) 96 % NaOH.

Концентрация NaOH во вторичном конденсате составляет 1 г/дм^3 . Расплав едкого натра с концентрацией 96 % NaOH и температурой $360 \text{ }^\circ\text{C}$ заливали в кристаллизатор. В результате кристаллизации охлажденного расплава едкого натра на вальце кристаллизатора получили твердый продукт в виде тонкой корки.

Полученную корку твердого едкого натра срезали ножом и помещали в сборник готового продукта. В химической лаборатории определен состав полученного едкого натра.

Всего проведено 2 цикла работ по концентрированию растворов едкого натра с получением твердого чешуированного продукта, наработана представительская партия. Данные по качеству полученного твердого едкого натра представлены в табл. 4.

Таблица 4

Состав опытных партий твердого едкого натра

Наименование показателей	Результаты анализа, %	
	1 партия	2 партия
Содержание основного вещества (NaOH)	96,2	97,9
Содержание углекислого натрия (Na ₂ CO ₃)	1,2	1,29
Содержание силиката натрия (Na ₂ SiO ₃)	0,11	0,14
H ₂ O	Остальное	Остальное

Выводы.

Исследованы основные стадии технологического процесса регенерации отработанных щелочных растворов. Очистка от силикат- и карбонат-ионов проводится методом каустификации. Каустификация проводится посредством обработки исходного раствора твердым СаО. Определены оптимальные температуры, время реакции и расход СаО. Определены оптимальные параметры фильтрации и промывки суспензии. Предложено объединять промывные воды с высоким содержанием NaOH с фильтратом и направлять на концентрирование. Проведено концентрирование раствора каустической соды от 50 % до 96 % NaOH с получением расплава и дальнейшей кристаллизацией каустика на вальцевом кристаллизаторе. Температура поступающего на кристаллизацию расплава едкого натра 360 °С. Получена опытная партия твердого едкого натра с содержанием NaOH 96,2 – 97,9 %. Полученные экспериментальные данные подтверждают возможность и целесообразность регенерации отработанных щелочных растворов с возвращением едкого натра в технологический процесс в виде твердого чешуированного продукта. Степень регенерации едкого натра составляет 97,5 %.

Список литературы: 1. Сонгина О. А. Редкие металлы / О. Сонгина. – М.: Гитиз, 1955. – 372 с. 2. Григорьев П.Н. Растворимое стекло / П.Н. Григорьев, М.А. Матвеев. – М.: ГИЗ, 1956. – 418 с. 3. Беньковский С.В. Технология содопродуктов / С.В. Беньковский, С.М. Круглый, С.К. Секованов. – М.: Издательство «Химия», 1972. – 351 с. 4. Якименко А.М. Справочник по производству хлора, каустической соды и основных хлорпродуктов / А.М. Якименко, М.И. Пасманик. – М.: Издательство «Химия», 1974. – 440 с.

П.М. ЩЕРБАКОВ, канд. техн. наук, **П.И. СКОБЛИК**,
Ю.Б. ДАНИЛОВ, докт. техн. наук,
В.А. КАЧАНОВ, канд. хим. наук, ОАО «УкрНИИхиммаш»,
И.Н. ДЕМИДОВ, докт. хим. наук, НТУ «ХПИ», г. Харьков, Украина

МАЛОТОННАЖНОЕ ПРОИЗВОДСТВО БИМОТОРНЫХ ТОПЛИВ СМЕСЕВЫХ

Розроблена технологія виробництва моторних палив сумішевих на основі вуглеводневих і вуглеводневого сировинних ресурсів, як мінерального, так і рослинного походження (продукти переробки сільськогосподарських виробництв та їх відходи). В УкрНДІхіммаші створена стендова установка на якій відпрацьовувалася дана технологія. В статті наведені результати випробувань отриманих зразків на установці. Наведено техніко-економічні показники виробництва моторних палив сумішевих.

Разработана технология производства моторных топлив смесевых на основе углеводородных и углеводородного сырьевых ресурсов, как минерального, так и растительного происхождения (продукты переработки сельскохозяйственных производств и их отходы). В УкрНИИхиммаше создана стендовая установка на которой обрабатывалась данная технология. В статье приведены результаты испытаний полученных образцов на установке. Приведены технико-экономические показатели производства моторных топлив смесевых.

The technology of production of motor fuels based on mixed hydrocarbon and hydrocarbon raw materials as mineral and vegetable origin (food processing industries and agricultural wastes). In UkrNIHimmashе created poster vidpratsovuvalasya setting where this technology. The article presents the results of tests of samples obtained on the install. There are technical and economic parameters of motor fuels mixed.

Решаемые проблемы: во всем мире сейчас ведутся работы по расширению сырьевой базы производства моторных топлив за счет вовлечения в нее источников растительного происхождения. В частности решаются вопросы по получению моторных топлив из отходов масложировой промышленности и побочных продуктов спиртового производства.

Постановка задачи: производство высокооктановых бензинов и дизтоплив всесезонного применения осуществляется: или путем гидродинамического смешения низкооктановых бензинов и дизельных фракций с низшими спиртами и этиловым эфиром (патент Украины № 85148 от 25.12.2008 г.); или посредством введения в исходное углеводородное сырье этиловых эфиров жирных карбоновых кислот и низших спиртов с последующей совмест-

ной перегонкой этой смеси и получением высококачественных моторных топлив (патент Украины № 87784 от 10.08.2009 г.). Эти способы могут заменять и дополнять друг друга, что делает производство гибким в соответствии от исходного минерального углеводородного сырья. Остановимся более подробно на описании актуального в настоящее время вопроса получения моторных топлив из побочных продуктов спиртовых и масложировых производств.

Исследования по производству моторных топлив в этом направлении ведутся ряде стран. Бензиновые и дизельные фракции минерального нефтяного происхождения частично или полностью заменяют спиртами или спиртовыми эфирами. Имеется также достаточное количество работ и изобретений, в которых усилия направлены на увеличение базовых фракций моторных топлив, за счет вовлечения в них компонентов, получаемых из растительного сырья. Ряд работ и изобретений посвящены расширению пределов температурно-сезонного использования моторных топлив (патент США № 9372752, опубл. 8 февраля 1983 г.; патент Российской Федерации № 2261266, МПК C10G11/05, опубл. 2005.05.09, бюлл. 27).

Однако, в этих работах и изобретениях поставленная задача получения кондиционных моторных топлив в той или иной мере решается не полностью. Так, например, если стоит вопрос об увеличении выхода высокооктановой бензиновой фракции за счет вовлечения в нее этилового спирта, возникает необходимость дополнительной обработки топлива по обезвоживанию спирта или введения специальных стабилизаторов, чтобы избежать разделения. Увеличение дизельной фракции путем введения в нее спиртовых или бензиновых компонентов уменьшает цетановое число и понижает удельную плотность дизтоплива.

Известен способ получения моторных топлив, заключающийся в том, что в исходное углеводородное сырье перед фракционированием вводят спиртовую добавку и затем эту композицию (не обязательно гомогенную) подвергают фракционной разгонке. В результате получают непосредственно готовую к применению высокооктановую (76 – 85 ед. М.М.) бензиновую фракцию. Также при этом получают дизельную и другие фракции, если в качестве сырья взяты нефть или газовый конденсат (Патент Украины № 61953, МПК⁷ C10L1/16, опубл. 15.12.2003 г., бюлл. № 12.)

В работе выполненной в УкрНИИХиммаше было улучшено качество как бензиновых, так и дизельных фракций, а также увеличен их массовый

выход.

Поставленная задача была решена благодаря тому, что при получении кондиционных моторных топлив, включающем введение в исходное углеводородное сырье добавок, например, алканолов и соответствующих эфиров, с последующей прямой перегонкой полученной смеси, и получения прямогонных фракций бензинов и дизтоплив с потребительскими кондициями.

Таким образом, производство моторных топлив осуществляют путем совместного фракционирования смеси углеводородного сырья с добавкой, состоящей из смеси эфиров карбоновых кислот и низших спиртов. Добавку можно получить также этерификацией низших спиртов карбоновыми кислотами. Если для получения добавки используются сырьевые ресурсы растительного происхождения, она может называться биодобавкой, а моторные топлива, полученные с ее помощью – биомоторными топливами.

Технологию реализуют следующим образом.

В нефть и/или газовый конденсат перед фракционированием вводят до 50 об. % добавки. Затем полученную смесь подвергают прямой перегонке, в результате которой получают готовые к употреблению кондиционные моторные топлива (высокооктановый бензин и дизтопливо всесезонного использования).

Количество добавки и соотношение в ней низкомолекулярных спиртов и эфиров карбоновых кислот выбирают в зависимости от свойств и качественных характеристик бензинов и дизтоплив, которые требуется получить, а также от потенциального содержания соответствующих фракций в исходном углеводородном сырье.

В зависимости от антидетонационной стойкости бензина и марки дизтоплива, которые необходимо получить, предпочтительное соотношение компонентов может быть таким, об. %:

стабильный газовый конденсат (фракция 45 °С – 360 °С) – 70 %;

эфиры карбоновых кислот – 20 %;

низкомолекулярные спирты – 10 %.

После фракционирования получают бензин А-76 всесезонного использования и дизтопливо зимней марки.

Для получения бензина Аи-93 и дизтоплива зимнего сорта предпочтительно брать исходные компоненты в следующем соотношении, % об.:

стабильный газовый конденсат (фракция 45 °С – 360 °С) – 60 %;

эфиры карбоновых кислот – 20 %;

низкомолекулярные спирты – 20 %.

Ниже в табл. 1 и табл. 2 представлены образцы бензинов и дизтоплив, полученных при совместной перегонке стабильного конденсата и добавки с последовательным отбором бензиновой и дизельной фракций.

Таблица 1

Результаты испытаний образца бензиновой фракции

Показатели	Бензин	
	Образец 1	ДСТУ 40-63-2001; А-80Ек
Фракционный состав:		
температура начала перегонки, °С	45	не ниже 30
10 % перегоняется при температуре, °С	65	не ниже 75
50 % перегоняется при температуре, °С	109	не выше 120
90 % перегоняется при температуре, °С	150	не выше 190
конец кипения, °С	215	не выше 215
Плотность при 20 °С, г/см ³	0,765	не нормируется
Октановое число (моторным методом)	77	не ниже 76,0

Таблица 2

Результаты испытаний образца дизельной фракции

Показатели	Дизтопливо	
	Образец 2	ДСТУ 4840:2007; класс 0
Фракционный состав:		
выкипает при температуре 250 °С, % об.	50	не выше 65
выкипает при температуре 350 °С, % об.	88	не менее 85
90 % об. перегоняется при температуре, °С	355	не выше 360
Плотность при 20 °С, г/см ³	0,831	0,820 – 0,845
Цетановое число	52	51
Цетановый индекс	49	не менее 46
Граничная температура фильтрованности, °С	- 25	не выше -20
Температура помутнения, °С	- 12	не выше -10

Анализ фракционного состава, антидетонационной стойкости бензина и цетанового показателя топлив проводились в аттестованных лабораториях.

Определение эксплуатационных характеристик дизтоплив проводилось на сертифицированном стенде тракторных двигателей внутреннего сгорания в Институте проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАНУ. Анализ конъюнктуры, доступность и стоимость исходного сырья свидетельствуют о том, что для некоторых регионов Украины производство моторных топлив будет эффективно, если их размещать (или включать) вблизи инфраструктур

спиртовых или нефтегазоперерабатывающих заводов.

Так, например, в Харьковском регионе достаточно исходных сырьевых компонентов (этиловый спирт, жирные кислоты, нефтяные углеводороды) для организации малотоннажного производства смесевых моторных топлив в количестве 15 т в сутки (4,5 – 5,0 тыс.т/год). Стоимость основного и вспомогательного оборудования для такой установки составит – \$400 тыс. Экономический эффект при производстве 1 т топлива превышает 1 тыс. грн. на 1 т топлива. Окупаемость составит менее десяти месяцев. Спиртовые заводы Украины могут дополнительно произвести 200 – 250 тыс. т биоэтанола в год, что в состоянии заменить 7 – 10 % потребляемых светлых нефтепродуктов. Средний спиртовой завод Украины производит 20 – 25 т этанола в сутки. Мировой практикой доказано, что экономически целесообразным является предприятие суточной производительностью 250 – 300 т (80 – 100 тыс.т/год). Поэтому единичная мощность производства кондиционных смесевых моторных топлив в нашем варианте составит 250 – 300 тыс.т/год, стоимость реализации проекта потребует 25 – 30 млн. долларов США, окупаемость инвестиций – 2,5 – 3 года.

Выводы.

1. За счет вовлечения растительного сырья, а также побочных продуктов химических производств можно значительно увеличить массовый выход моторных топлив;

2. Расширяет номенклатуру технических средств и способов создания моторных топлив, так как могут использоваться производственные мощности спиртовых и масложировых заводов и их побочные продукты, например, сивушные фракции спиртов и масложировые отходы (соапстоки);

3. При эксплуатации биомоторных топлив в двигателях внутреннего сгорания выбросы вредных веществ снижаются. Для бензинов: выбросы оксида углерода уменьшаются на 35 %, углеводородов на 15 %. Для дизтоплив: выбросы оксида азота снижаются в 1,5 – 2 раза, а так же содержание сернистых соединений и их оксидов на 30 %;

4. Так как добавка, получаемая из растительного сырья, не содержит в своем составе сернистых соединений, ввод ее в минеральные моторные топлива в количестве 20 – 50 %, существенно снижает содержание в них серы, что дополнительно улучшает качество моторных топлив;

5. Улучшаются эксплуатационные характеристики, повышается антиде-

тонационная стойкость товарных бензинов и расширяются пределы сезонного применения дизтоплив без ухудшения цетанового показателя.

Список литературы: 1. Давыдова Е. Развитие топливного рынка ЕС: биодизельное топливо – возобновляемый энергетический ресурс / Е. Давыдова, В. Harten, Н. Пасхин // Журнал масложировая промышленность. – 2005. – № 4, 2. Патент України на винахід № 61953, МПК⁷ С10L1/16. Спосіб одержання високооктанових моторних палив / П.М. Щербаков, Г.О. Хоменко, П.І. Скоблік та інші.; опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12. 3. Патент України на винахід № 45691, МПК⁷ С10L1/10. Високооктанова домішка до бензинів / П.М. Щербаков, В.А. Качанов, П.І. Скоблік та інші.; опубл. 15.04.2004, Бюл. № 4. 4. Патент України на винахід № 85148, МПК⁷ С10L1/16. Спосіб одержання кондиційних моторних сумішевих палив / Ю.Б. Данилов, П.М. Щербаков, І.Г. Кіуїла, М.М. Струпов, П.І. Скоблік та інші.; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24. 5. Патент України на винахід № 87784, МПК⁷ С10L1/16. Спосіб одержання кондиційних моторних палив / Ю.Б. Данилов, П.М. Щербаков, І.М. Демідов, М.М. Струпов, П.І. Скоблік та інші.; опубл. 10.08.2009, Бюл. № 15.

Поступила в редколлегию 25.03.10

УДК 66.011

О.И. НЕВШУПА, Д.В. БОБКОВ, канд. техн. наук,
В.А. КАЧАНОВ, канд. хим. наук, **Ю.Б. ДАНИЛОВ**, докт. техн. наук,
С.Е. БОГУЧАРОВА, Н.Е. ЗАГОРУЛЬКО, Е.К. ГВОЗДИКОВА,
В.Ю. КОЗИН, П.И. СКОБЛИК, ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков,
Украина

ПОЛУЧЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ГИПСА ПРИ УТИЛИЗАЦИИ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ

Проведені дослідження нейтралізації технічної сірчаної кислоти суспензією крейди і одержані зразки синтетичного гіпсу марок Г-5 – Г- 6. Показана доцільність переробки великих об'ємів технічної сірчаної кислоти на товарний гіпс. Проведені необхідні технологічні розрахунки процесу. Розроблена технологічна схема і напрацьовані конструкції обладнання для втілення пропонуємої технології.

Проведены исследования нейтрализации технической серной кислоты суспензией мела и получение образца синтетического гипса марок Г-5 – Г- 6. Показана целесообразность переработки больших объемов технической серной кислоты в товарный гипс. Проведены необходимые технологические расчеты процесса. Разработана технологическая схема и наработаны конструкции оборудования для внедрения предложенной технологии.

The investigations of technical sulfuric acid neutralizing suspension of chalk and obtained samples of synthetic gypsum makes G-5 - G-6. The expediency of processing large amounts of sulfuric acid on tech-

nical trade plaster. Conducted the necessary engineering calculations process. Technological scheme of the established structures and equipment to implement the offered technology.

Решаемые проблемы. На многих химических предприятиях в процессе производства образуются значительные объемы серной кислоты различной концентрации зачастую содержащей разнообразные примеси. По экологическим соображениям выброс серноокислотных стоков недопустим. Концентрирование и очистка стоков серной кислоты по ряду причин зачастую нерентабельна. Предлагаемая технология позволяет утилизировать сбросы серной кислоты с получением товарного гипса марок Г-5 – Г-6. Проработка выполнена совместно с лабораторией вяжущих НТУ «ХПИ».

Постановка задачи. Целью данной работы является проработка технологии производства полуводного гипса из неликвидной технической серной кислоты и известняка для участия в тендере. Реакция получения сульфата кальция известна давно, но в условиях крупнотоннажного производства ставит ряд задач требующих серьезной проработки. Такие как низкая скорость реакции, высокое тепловыделение, значительная вязкость раствора, выделение углекислого газа, сопровождаемая значительным пенообразованием.

Методика. Концентрацию серной кислоты определяли титрометрически 0,1 Н раствором каустика, Содержание карбоната кальция и магния определяли трилометрически трилоном Б, содержание песка в известняке и меле определяли весовым методом после растворения навески в соляной кислоте. Определение марки гипса проводили по ГОСТ 23789-79 «ВЯЖУЩИЕ ГИПСОВЫЕ». Методы испытаний.

Был проведен анализ проб известняка и мела, полученных от заказчика на содержание карбоната кальция и магния, нерастворимых в серной кислоте примесей и влажность (таблица).

Таблица

Состав образцов мела и известняка

Наименование	Содержание $\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$, %	Содержание песка и глины, %	Влажность, %
Известняк	93,82	6,06	0,12
Мел	94,2	5,24	,56

Была проведена проработка процесса получения синтетического гипса с целью определения оптимального Т : Ж мела (известняка) и воды. Для этого

были приготовлены суспензии мела 5 г и воды: 3, 6, 9, 12, 15 мл соответственно. В суспензии при постоянном перемешивании было добавлено по 2,7 мл концентрированной серной кислоты. Процесс идет в большом пенообразованием, в растворах с соотношением $T : Ж = 5 : 3 - 5 : 9$ реакция идет в два раза дольше чем в растворе с $T : Ж = 5 : 12 - 5 : 15$. С целью интенсификации процесса были проведены опыты по гидрокавитационному измельчению мела (известняка). Получены суспензии мела и известняка с концентрацией $CaCO_3 + MgCO_3$ 50 – 70 г/л соответственно. Суспензии обрабатывались, при постоянном перемешивании, концентрированной серной кислотой в течении 10 – 30 минут до pH 6,5 – 7, а затем выдерживались в течении 1,5 – 3 часов до полного прекращения газовой выделению. Затем суспензия гипса отфильтровывалась, остаточная влажность составила порядка 30 %. После этого гипс высушивался и измельчался. Полученные образцы гипса были проверены по ГОСТ 23789-79 «ВЯЖУЩИЕ ГИПСОВЫЕ». Методы испытаний», гипс полученный из известняка соответствовал марки Г-3 – Г-5, а из мела Г-4 – Г-6 соответственно. Таким образом вести процесс было рекомендовано с суспензией мела. На основании проведенных исследований была разработана технология производства синтетического гипса.

Производства синтетического полуводного гипса проводится по следующей технологической схеме (рисунок). Со склада сырья известняк поступает на измельчение и подготовку суспензии, которая затем поступает в реактор.

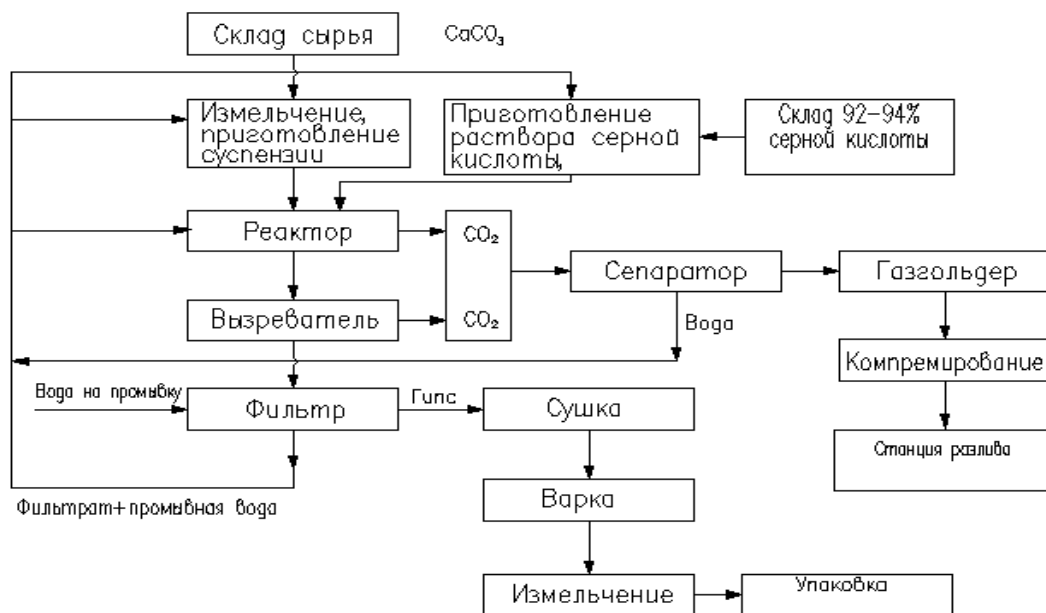


Рисунок – Блок схема производства искусственного гипса

Туда же поступает со склада предварительно подготовленная до необходимой концентрации серная кислота. Суспензия известняка и подготовленная серная кислота смешивается в реакторах, где происходит реакция с образованием гипса с выделением CO_2 . Суспензия гипса из реакторов поступает в вызреватель, где завершается процесс образования двухводного гипса. Выделившийся в процессе реакции углекислый газ отделяется от влаги в сепараторе, накапливается в газгольдере и, после сжижения разливается в тару.

Из выревателя суспензия гипса поступает в отделение фильтрации, где на фильтре гипс отделяется от фильтрата и промывается водой от остаточной серной кислоты до показателя рН 6 – 7.

В отделении сушки отфильтрованный гипс освобождается от свободной влаги в барабанной сушилке и в виде сухого двухводного кристаллогидрата отправляется на стадию варки в варочный котел. В процессе варки частично удаляется кристаллическая вода и получается полуводный кристаллогидрат гипса. Режим варки определяет требуемые свойства и качество полуводного гипса и является предметом разработки лаборатории вяжущих НТУ «ХПИ».

Полученный в процессе варки полуводный гипс измельчается в мельнице до размера фракции 200 мкм и направляется на упаковку и далее на склад. Предлагаемая технология решает поставленные задачи, упрощает конструкцию аппаратов, снижает агрессивность среды, предотвращает выброс углекислого газа в атмосферу.

Выводы.

Проведенные исследования показали целесообразность утилизации больших объемов технической серной кислоты посредством нейтрализации суспензии мела с получением товарного гипса марок Г-5 – Г-6.

Разработана технологическая схема получения искусственного гипса и проработаны вопросы конструирования требуемого технологического оборудования.

Список литературы: 1. Беньковский С.В. Технология содопродуктов / С.В. Беньковский, С.М. Круглый, С.К. Секованов. – М.: Химия, 1972. – 351 с. 2. Вяжущие гипсовые. Методы испытаний. ГОСТ 23789-79. – [Действителен с 1980-07-01]. – М.: Издательство стандартов, 1987. – 11 с. 3. Бутт Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов / Ю.М. Бутт, М.М. Сычев, В.В. Тимашев. – М.: Издательство «Высшая школа», 1980. – 472 с. 4. Справочник по производству гипса и гипсовых изделий / [Анастасиади А.П., Боровский В.Р. и др.]; под ред. К.А. Зубарева. – М.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1963. – 464 с.

Содержание

1.	Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ ПОСВЯЩАЕТСЯ 80-ЛЕТИЮ УКРАИНСКОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО И КОНСТРУКТОРСКОГО ИНСТИТУТА ХИМИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ	3
2.	Ю.Б. ДАНИЛОВ УКРАИНСКОМУ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМУ И КОНСТРУКТОРСКОМУ ИНСТИТУТУ ХИМИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ – 80 ЛЕТ	5
3.	Ю.Б. ДАНИЛОВ, В.Н. КОЛОМИЕЦ, М.А. ХАРЧЕНКО ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ОТБЕЛКИ КОНЦЕНТРИРОВАННОЙ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ФТОРОПЛАСТОВЫХ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ АППАРАТОВ	15
4.	А.Н. СУЛИМА, И.А. СУЩЕНКО, И.П. ШЕПОТЬКО, Т.Г. ЯШИНА, Т.А. КУРОЧКА, М.Ю. ВАСЮК, С.П. НЕГОДА ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОЛОННЫ ДЛЯ МАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ	21
5.	В.Н. КОЛОМИЕЦ, Ю.Б. ДАНИЛОВ, А.Н. СУЛИМА, М.А. ХАРЧЕНКО ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СТАДИИ СТАБИЛИЗАЦИИ СЫРЬЯ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ОСОБО ЧИСТОЙ РЕАКТИВНОЙ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ	30
6.	Ю.Б. ДАНИЛОВ, В.Н. КОЛОМИЕЦ ОБОРУДОВАНИЕ ИЗ ФТОРОПЛАСТА ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ И НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	35
7.	А.М. ХАРЧЕНКО, М.А. ХАРЧЕНКО АППАРАТ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ	47
8.	С.А. БЕЛОВ, С.А. ГОНДАРЕВА ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ГЕРМЕТИЧНОСТИ АРМАТУРНЫХ ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ	51
9.	П.С. МАРЧЕНКО, С.А. БЕЛОВ РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ПЕРЕГОРОДОК И ПЛОСКИХ ДНИЩ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СОСУДОВ ИЛИ АППАРАТОВ	64
10.	В.А. КОБЗЕВ, В.Н. СТОГНИЙ, Г.В. РОЗОВ, А.И. ЛОТОРЕВ, Г.А. КАЧКИН, И.А. ГУКОВ, А.В. СНЕЖКО АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЙ КОНТРОЛЬ РЕАКТОРА С ВНУТРЕННЕЙ ПЛАКИРОВКОЙ	70
11.	В.М. ДОЛИНСКИЙ, В.Г. ИВАНОВ, Л.Д. МИЩЕНКО, Е.Я. ВЕКСЛЕР, Н.К. ЗАПЛОТИНСКИЙ ПРОДЛЕНИЕ РЕСУРСА ТРУБОПРОВОДА ПРИРОДНОГО ГАЗА В ОДЕССКОМ ПРИПОРТОВОМ ЗАВОДЕ	84
12.	П.С. МАРЧЕНКО РАСЧЕТ УГЛА ПОВОРОТА ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ФЛАНЦА ПОД ДЕЙСТВИЕМ НАГРУЗКИ БОЛТА	89
13.	В.М. ДОЛИНСКИЙ ОСОБЕННОСТИ ИНДИВИДУАЛЬНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА СОСУДОВ	95

14.	Б.Я. КАНТОР, В.М. ДОЛИНСКИЙ, Р.Л. ОНАЦКИЙ ВЛИЯНИЕ ВМЯТИН НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ СОСУДОВ	99
15.	В.А. КАЧАНОВ, Ю.Б. ДАНИЛОВ, Е.К. ГВОЗДИКОВА, Т.Э. ШЕПТЛЬ, В.Ю. КОЗИН ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ КОЖУХОТРУБЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ИЗ СТАЛИ 08Х13	107
16.	Т.Э. ШЕПИЛЬ, В.А. КАЧАНОВ, Ю.Б. ДАНИЛОВ, В.Ю. КОЗИН, В.М. ДОЛИНСКИЙ, В.Г. ИВАНОВ МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОТРЕЗКОВ ТРУБ, ВЫРЕЗАННЫХ ИЗ ПЕЧИ РИФОРМИНГА НА ОДЕССКОМ ПРИПОРТОВОМ ЗАВОДЕ	115
17.	К.А. ЮЩЕНКО, Л.В. ЧЕКОТИЛО, Ю.Н. КАХОВСКИЙ, А.В. БУЛАТ, Р.И. МОРОЗОВА, В.В. МУТАС, Г.Ф. НАСТЕНКО, Ю.Б. ДАНИЛОВ, В.А. КАЧАНОВ, В.М. ДОЛИНСКИЙ, А.И. КАБАШНЫЙ, С.М. ИВАНУНА, В.Н. БЕСПАЛЫЙ, О.А. СИКОВЕЦ, Ю.А. БАГРОВ, С.В. КИРИЧКОВ ОПЫТ РЕМОНТА КОРПУСОВ КОЛОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ НЕФТИ ИЗ ДВУХСЛОЙНЫХ СТАЛЕЙ	122
18.	А.И. КАБАШНЫЙ ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ШВОВ СВАРНЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ПРОТИВ ОБРАЗОВАНИЯ ТРЕЩИН	137
19.	О.И. НЕВШУПА, Д.В. БОБКОВ, В.А. КАЧАНОВ, Ю.Б. ДАНИЛОВ, С.Е. БОГУЧАРОВА, Н.Е. ЗАГОРУЛЬКО, Е.К. ГВОЗДИКОВА, В.Ю. КОЗИН РЕГЕНЕРАЦИЯ ОТРАБОТАННЫХ РАСТВОРОВ КАУСТИКА В ПРОИЗВОДСТВЕ ЦИРКОНИЯ	142
20.	П.М. ЩЕРБАКОВ, П.И. СКОБЛИК, Ю.Б. ДАНИЛОВ, В.А. КАЧАНОВ, И.Н. ДЕМИДОВ МАЛОТОННАЖНОЕ ПРОИЗВОДСТВО БИОМОТОРНЫХ ТОПЛИВ СМЕСЕВЫХ	153
21.	О.И. НЕВШУПА, Д.В. БОБКОВ, В.А. КАЧАНОВ, Ю.Б. ДАНИЛОВ, С.Е. БОГУЧАРОВА, Н.Е. ЗАГОРУЛЬКО, Е.К. ГВОЗДИКОВА, В.Ю. КОЗИН, П.И. СКОБЛИК ПОЛУЧЕНИЕ ИСКУССТВЕННОГО ГИПСА ПРИ УТИЛИЗАЦИИ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ	158

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ “ХПІ”

Тематичний випуск
“Хімія, хімічна технологія та екологія”

Збірник наукових праць

Випуск № 14

Науковий редактор д.т.н., проф. М.І. Рищенко

Технічний редактор С.З. Зеленцов

Відповідальний за випуск к.т.н. І.Б. Обухова

Обл.-вид. № 90-10

Підп. до друку 04.04.2010 р. Формат 60x84 1/16. Папір офісний.
RISO-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 10. Обл.-вид. арк. 10.
Наклад 300 прим. Перший завод 1-100. Зам. № 938. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ “ХПІ”.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

Надруковано у СПДФО Ізрайлев Є.М.

Свідоцтво № 04058841Ф0050331 від 21.03.2001 р.

61024, м. Харків, вул. Фрунзе, 16