

ВЕСТНИК
НАЦИОНАЛЬНОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА «ХПИ»

Сборник научных трудов

Тематический выпуск

«Химия, химическая технология и экология»

15'2010

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. – № 15. – 167 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 «УкрНИИ химмаш» – 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 «УкрНИИ-химмаш» 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

Ю.Б. ДАНИЛОВ, докт. техн. наук,

В.В. ДРОЗДОВ, канд. техн. наук, ОАО «УкрНИИхиммаш»,

г. Харьков, Украина

К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАСТИНЧАТЫХ ПЕРЕКРЕСНОТОЧНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Стаття присвячена підвищенню теплової ефективності пластинчастих перехресноточних теплообмінників. Розглянута та проаналізована конструкція пакету теплообмінних пластин, сформованого гофрованими пластинами з різними кутами нахилу гофр щодо напрямку руху теплоносіїв.

Статья посвящена повышению тепловой эффективности пластинчатых перекрестноточных теплообменников. Рассмотрена и проанализирована конструкция пакета теплообменных пластин, сформированного гофрированными пластинами с разными углами наклона гофр относительно направления движения теплоносителей

The article is devoted to increase the thermal efficiency of plate Cross-exchangers. Considered and analyzed the design of a package of heat exchange plates, formed by corrugated plates with different corrugation angles to the direction of motion of coolants.

В нефтеперерабатывающей промышленности многих стран мира все большее распространение приобретают пластинчатые теплообменники с разборным корпусом и перекрестноточным движением теплоносителей. Самыми известными аппаратами такого типа являются теплообменники «Компаблок» (фирма Альфа-Лаваль), которые, обладая высокой теплогидравлической эффективностью и компактностью, успешно заменяют традиционные кожухотрубчатые теплообменники с 2,5 – 3 раза большей площадью поверхности теплообмена и 3 – 5 раза большей массой.

Разборный корпус таких аппаратов состоит из плоских толстостенных стальных элементов. В качестве теплопередающих элементов в теплообменниках типа «Компаблок» применяются квадратные гофрированные пластины из коррозионностойких металлов и сплавов. При этом углы наклона гофр к направлению движения обоих теплоносителей, движущихся друг относительно друга в перпендикулярном (перекрестном) направлении, одинаковы и равны 45° – пластина $45^\circ \times 45^\circ$ (рисунок).

В ОАО «УкрНИИхиммаш» разработана конструкция перекрестноточно-

го пластинчатого теплообменника, имеющего ряд преимуществ по сравнению с аппаратами фирмы «Альфа-Лаваль». Так, боковые стенки разборного корпуса выполнены в виде элементов цилиндрической обечайки, что позволило снизить массу аппарата за счет уменьшения толщины стенок корпуса. Кроме того, цилиндрическими элементами стенок корпуса сформированы коллекторные камеры для входа и выхода теплоносителей, имеющие в поперечном сечении форму сегмента, что обеспечивает равномерное распределение теплоносителей по всей ширине теплообменных каналов, и, в конце концов, эффективное использование теплообменной поверхности.

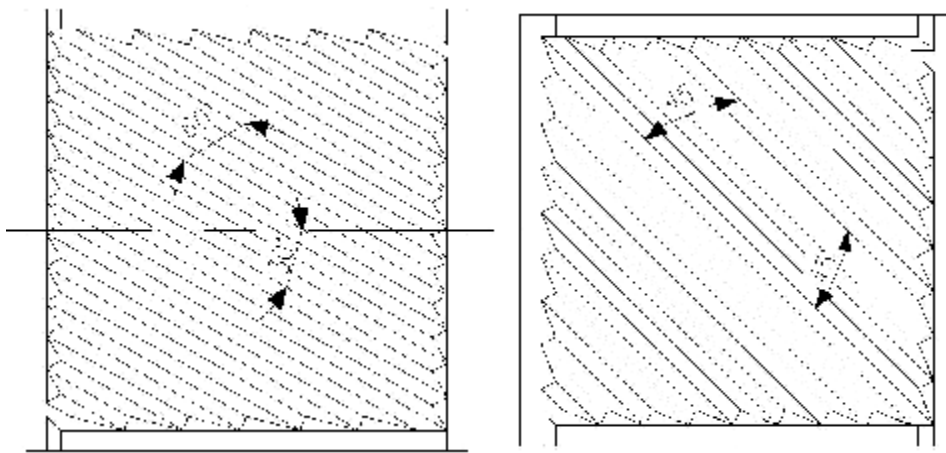


Рисунок – Теплопередающие элементы в теплообменниках типа «Компаблок»

Из практического использования теплообменных аппаратов известно, что в 95 % случаев теплоносители отличаются друг от друга как расходами, так и теплофизическими свойствами, что заведомо обуславливает различные значения теплоотдачи. Известно также, что коэффициент теплопередачи, а, следовательно, и площадь поверхности теплообмена определяются преимущественно меньшим из двух значений коэффициентов теплоотдачи. Регулирование уровней теплоотдачи с помощью изменения количества ходов по трактам теплоносителей с целью повышения коэффициента теплопередачи без существенного увеличения потерь давления удается лишь в исключительных случаях.

Угол наклона гофр к направлению движения теплоносителя существенно влияет на интенсивность теплообмена, причем с ростом угла наклона это влияние увеличивается. Поэтому применение теплообменных пластин с гофрировкой $30^\circ \times 60^\circ$, имеющих различную теплофизическую эффектив-

ность по полостям теплоносителей позволяет регулировать уровень теплоотдачи по обоим теплоносителям с целью достижения максимального значения коэффициента теплопередачи k_{\max} .

В качестве теплопередающих элементов разработаны пластины с разными углами наклона гофр к направлению движения каждого из теплоносителей – пластина $30^\circ \times 60^\circ$ (рисунок).

Применение пластин $30^\circ \times 60^\circ$ в сравнении с пластиной $45^\circ \times 45^\circ$ приводит к повышению коэффициента теплоотдачи теплоносителя, направляющего в полость с углом наклона гофр 60° , на 60 %, а величина снижения коэффициента теплоотдачи другого теплоносителя, направленного в полость с углом наклона гофр 30° , составляет 30 %.

При этом теплоноситель с заведомо меньшим коэффициентом теплоотдачи (например, бензин, нефть, мазут, газ с одной стороны, вода с другой) направляется в каналы с углом наклона гофр 60° .

Разработанная конструкция пластин имеет особое значение при ее использовании в аппаратах, где осуществляются процессы конденсации или испарения. При этом конденсирующиеся или испаряющиеся рабочие среды направляются в каналы с углом наклона гофр 30° , что также приводит к некоторому повышению $\alpha_{\text{конд}}$ или $\alpha_{\text{исп}}$. Этот эффект объясняется тем, что снижение угла наклона гофр в теплообменных каналах, в которых осуществляются процессы конденсации или испарения, способствует более быстрому отводу образующегося конденсата или газа от теплообменной поверхности. При этом пакет ориентирован таким образом, что теплообменные пластины, а, следовательно, и теплообменные каналы расположены вертикально.

Для достижения максимальной тепловой эффективности аппарата, что определяется условием $(\alpha_1 + \alpha_2)_{\max}$ в разработанной конструкции предлагается использование также комбинации двух пластин, чередующихся в пакете друг с другом, например, пластины $30^\circ \times 60^\circ$ и $45^\circ \times 45^\circ$ (средний угол $37,5^\circ$). При сравнении с традиционным пакетом с пластинами $45^\circ \times 45^\circ$, комбинированный пакет позволяет увеличить теплоотдачу в каналах со средним углом наклона гофр $52,5^\circ$ – на 20 %, а в каналах со средним углом гофров $37,5^\circ$ снижение теплоотдачи составляет 16 %.

Таким образом, применение пластин с разными углами наклона гофр в поперечном и продольном направлениях в перекрестноточных теплообменниках позволяет существенно снизить площадь поверхности теплообмена аппаратов, а также их массу.

Ю.Б. ДАНИЛОВ, докт. техн. наук,

В.Н. КОЛОМИЕЦ, канд. техн. наук, ОАО «УкрНИИхиммаш»,

г. Харьков, Украина

ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ В ОБЪЕМЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КИПЯТИЛЬНИКА ИЗ ФТОРОПЛАСТОВЫХ ТРУБОК

У роботі досліджені й описані фактори впливу фторопластової тепловіддаючої площини на перенесення тепла при пазирковому кипінні та на інтенсивність тепловіддачі при кипінні. Наведені математичні залежності, що дозволяють прогнозувати вплив різних факторів на механізм та інтенсивність процесу теплообміну при кипінні.

В работе исследованы и описаны факторы влияния фторопластовой теплоотдающей площади на перенос тепла при пузырьковом кипении и на интенсивность теплоотдачи при кипении. Приведены математические зависимости, которые позволяют предсказывать влияние различных факторов на механизм и интенсивность процесса теплообмена при кипении.

In process investigational and described factors of influence of fluoroplastic teplootdayuschey area on the transfer of heat at the bubble boiling and on intensity of heat emission at boiling. We present mathematical relationships that allow predicting the influence of various factors on the mechanism and intensity of heat transfer during boiling.

В процесі дослідження теплоотдачі при кипінні в експериментальному кипятильнику із фторопластових труб режимні параметри змінювались в наступних межах:

- поверхнісна густина теплового потоку від 4578 до 10698 Вт/ м²;
- тиск гріючого пара – від 0,1 до 0,2 МПа;
- швидкість гріючого пара – від 27 до 54 м/с;
- витрата гріючого пара – від 0,16 до 0,39 кг/с.

Конструкція досліджуваного виносного кипятильника отбілочної колонни з об'ємними награвачами із фторопластових труб забезпечує кипіння в великому об'ємі, т.е. кипіння на поверхні нагріву, погрузенної в ємкість з первонаочно неподвижною рідиною.

Процес кипіння, когдa тиск насиченого пара речовини рівно зовнішньому тиску, а пароутворення відбувається по всьому об'єму рідини, широко використовується в енергетиці, хімічній і інших галузях

промышленности. В нашем случае в процессе кипения азотной кислоты происходит выделение окислов азота. Необходимым условием передачи тепла от твердой поверхности к кипящей жидкости является перегрев поверхности относительно температуры насыщения. При малых разностях температур стенки теплообменной трубки и жидкости ($\Delta T = T_{нов} - T_n$) пузырьки пара зарождаются в малом числе центров парообразования, их перемешивающий эффект для всей поверхности теплообмена остается незначительным, и интенсивность теплообмена определяется процессом свободной конвекции жидкости около нагретой поверхности фторопластовых труб.

По мере увеличения перегрева поверхности число роста пузырьков быстро увеличивается и увеличивается частота их отрыва от поверхности. Это способствует увеличению интенсивности перемешивания жидкости у стенки и во всем объеме и соответствующему повышению коэффициента теплоотдачи.

При некотором значении $\Delta T = \Delta T_{кр}$, для существующих конструкций кипятильников из металла, пузырьки у поверхности трубки перестают открываться индивидуально и сливаются в сплошную паровую пленку, которая блокирует горячую поверхность теплопередающих трубок от жидкости. Данное явление называется кризисом кипения. При этом значение коэффициента теплопередачи уменьшается в 20 – 40 раз, поэтому в промышленности стараются организовать процесс в области развитого пузырькового кипения.

Простейшим случаем пузырькового кипения является кипение на горизонтальной поверхности нагрева в большом объеме. В данном случае механизм процесса передачи теплоты от греющей стенки и жидкости к ее пару не осложнен факторами, препятствующими его пониманию и описанию. Однако аналитически описать данный процесс трудно. Причины этого состоят в сложности описываемого явления.

К основным факторам, определяющим теплоотдачу при кипении, можно отнести теплофизические и физико-химические свойства поверхности нагрева, теплофизические свойства кипящей жидкости.

Экспериментальные данные убедительно свидетельствуют также о том, что свойства материала теплоотдающей поверхности оказывают влияние на перенос теплоты при пузырьковом кипении. Поток теплоты, поступающий от пара к стенке фторопластовой трубки и определяющий мгновенную теплопринимающую способность тела, можно определить по закону теплопро-

водности Фурье и по формуле конвективной теплоотдачи, т.е. вычислениями левой и правой частей граничного условия внешнего теплообмена в системе:

$$\frac{dT}{dt} = a \frac{d^2T}{dx^2} \quad ; \quad -l \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = a(t_f - T \Big|_{x=0}); \quad T \Big|_{t=0} = T_0; \quad \frac{dT}{dx} \Big|_{x \rightarrow \infty} = 0, \quad (1)$$

что даст:

$$q \Big|_{x=0} = -l \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = a(t_f - T \Big|_{x=0}). \quad (2)$$

Количество теплоты, поглощенное единицей поверхности тела от начала процесса нагрева до любого момента времени t , определится интегрированием уравнения потока теплоты:

$$Q_{(t)} = \int_0^t q \, dt. \quad (3)$$

Когда коэффициент теплоотдачи a достаточно велик (при $a/l \rightarrow \infty$), температура погружной поверхности тела практически постоянна и равна температуре нагреваемой среды ($T \Big|_{x=0} = t_f$). На погружной поверхности происходит нагрев нагреваемой среды.

Решение системы (1) относительно безразмерной температуры в любой точке полубезграничного тела в любой момент времени:

$$\Theta = \frac{T_{(x,t)} - T_0}{t_f - T_0} = \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a \cdot t}} - \exp\left(\frac{a}{l} x + \frac{a^2}{l^2} a \cdot t\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a \cdot t}} + \frac{a}{l} \sqrt{a \cdot t}\right) \quad (4)$$

в этом предельном случае можно существенно упростить, поскольку второе слагаемое правой части при $a/l \rightarrow \infty$ стремиться к нулю:

$$\Theta_{(x,t)} = \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a \cdot t}} \quad (5)$$

Полученное уравнение является уравнением распределения температуры.

Уравнение потока теплоты через материал теплопередающей поверхно-

сти можно получить, дифференцируя полученное уравнение распределения температуры (5):

$$q_{(t)} = -I \frac{dT}{dx} /_{x=0} = (t_f - T_0) \frac{\sqrt{I \cdot c \cdot r}}{\sqrt{p \cdot t}} \quad (6)$$

В данном уравнении теплофизические константы материала скомпоновались в одной группе $\sqrt{I \cdot c \cdot r}$, которая характеризует теплоусвоение материала или коэффициент тепловой активности материала. На его значение имеет наибольшее влияние коэффициент теплопроводности материала I .

Таким образом, количество теплоты, аккумулированной в материале поверхности, и возможность ее передачи растущему пузырю зависят в первую очередь от теплофизических свойств поверхности (в нашем случае трубки из фторопласта – 4Д), в частности от коэффициента теплоусвоения материала.

$$E = \sqrt{I \cdot c \cdot r} \quad (7)$$

Сток теплоты с поверхности материала происходит через растущие пузыри, образованные на теплообменной поверхности. Центрами парообразования могут быть те элементы поверхности, которые не заполняются жидкостью после отрыва пузыря, это могут быть имеющиеся на поверхности фторопластовых трубок несмывающиеся микровпадины.

На интенсивность теплоотдачи при кипении влияет также толщина греющей стенки. В зависимости от теплопроводности материала поверхности нагрева пульсации температуры, возникающие под растущим пузырем, проникают на ту или иную глубину, т.е. изменяется величина объема поверхности, из которого растущий пузырь отбирает аккумулированную теплоту. Очевидно, чем выше теплопроводность материала, тем на большую глубину проходят пульсации температуры. Если толщина поверхности нагрева меньше возможной глубины их проникновения, скорость подвода теплоты в растущий пузырь снижается, что вызывает общее уменьшение интенсивности теплоотдачи.

Это необходимо учитывать при использовании фторопластовых трубок для конструирования теплообменных аппаратов. Установлено, что в зависимости от температуры теплоносителя глубину проникновения последней в толщину стенки можно описать следующей формулой:

$$\Delta = \frac{dT \cdot l_{CT}}{q} \quad (8)$$

Экспериментальные данные при температуре греющего пара 110 °С и поверхностной плотности теплового потока 4578 – 10698 Вт/м² показывают, что такая глубина составляет 0,002 – 0,003 м. Тогда как толщины стенок применяемых фторопластовых трубок составляют 0,0004 – 0,0006 м. Данное явление подтверждается экспериментально различием величин тепловых потоков и коэффициентов теплопередачи для фторопластовых трубок диаметром 0,0038 × 0,0004 м и 0,0062 × 0,0006 м.

Теплофизические свойства кипящих жидкостей также заметно влияют на механизм и интенсивность процесса теплообмена при кипении. Азотная кислота относится к среднетемпературным жидкостям, температура кипения которых незначительно отличается от температуры кипения воды. Для таких жидкостей имеется большинство расчетных соотношений. Так, при проведении испытаний фторопластового кипятильника выявлено, что для определения коэффициента теплоотдачи для кипящей 98 % – ной азотной кислоты при температуре 86 °С наиболее приемлема формула:

$$a_k = b \left(\frac{l^2 \cdot r_{жк}}{m \cdot d \cdot T_{кин}} \right)^{1/3} \cdot q^{2/3} \quad (9)$$

Существующую формулу можно легко преобразовать в более приемлемую для расчетов формулу:

$$a_k = 6,1 \cdot q^{0,67} \quad (10)$$

Коэффициент теплоотдачи для пара, конденсирующегося внутри горизонтальных трубок, с наиболее приемлемой точностью можно определить по формуле:

а) для трубок с внутренним диаметром 0,005 м

$$a_n = 92,7 \cdot q^{0,5} \quad (11)$$

б) для трубок с внутренним диаметром 0,003 м

$$a_n = 88 \cdot q^{0,5} \quad (12)$$

При анализе показателей коэффициента теплоотдачи и коэффициента теплопередачи для кипятильника с нагревательными элементами из фторопластовых труб с внутренним диаметром 0,003 м и 0,005 м определено, что кипятильник с нагревательными элементами из фторопластовых труб с внутренним диаметром 0,003 м имеет эти теплотехнические показатели выше, чем кипятильник с нагревательными элементами из фторопластовых труб с внутренним диаметром 0,005 м при одинаковых расходах исходного раствора, пара и состава исходного раствора.

Этим подтверждается правильность теоретических предпосылок, изложенных выше.

Поступила в редколлегию 25.03.10

УДК 66.048.36.001.5:661.48

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

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ФТОРПЛАСТОВЫХ ДЕФЛЕГМАТОРОВ И ПУТЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИХ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

У роботі приведена конструкція фторопластового дефлегматора та описані принцип його роботи й показники ефективності його застосування в колонних апаратах. Також показані перспективні сфери застосування фторопластових дефлегматорів.

В работе приведена конструкция фторопластового дефлегматора, дано описание принципа его работы и показателей эффективности при его использовании в колонных аппаратах. Также показаны перспективные области применения фторопластовых дефлегматоров.

The construction of fluoroplastic dephlegmator is in-process resulted, description of principle of his work and indexes of efficiency is given at his use in колонних апаратах. Perspektivne application of fluoroplastic dephlegmators domains are also rotined.

Теплообменная аппаратура из неметаллических материалов является перспективным для широкого внедрения в химической промышленности видом оборудования.

Эти аппараты особенно эффективны в производствах с высокой агрессивностью сред или в производствах, где необходимо обеспечить повышенные требования к чистоте перерабатываемых продуктов.

Особый интерес среди этого оборудования представляет фторопластовая тарелка – дефлегматор.

Фторопластовая тарелка – дефлегматор предназначена для проведения процессов тепло- и массообмена в колонных аппаратах, например, ректификационных, абсорбционных, колоннах концентрирования минеральных кислот.

Конструкция дефлегматора представляет собой плоские, оплетенные из труб фторопласта тарелки диаметром, соответствующим диаметру колонного аппарата в количестве 10 штук, которые расположены друг над другом.

Полотнища имеют общие коллекторы, в которые вварены концы трубок и через которые подается и отводится охлаждающая вода.

Между тарелками и внутри их имеются дренажные устройства, через которые отводится избыток жидкой фазы.

В центральной части дефлегматора имеется цилиндрический стакан, служащий для закрепления в нем дренажных устройств, отвода жидкой фазы (конденсата) и придания дефлегматору монолитной конструкционной формы.

Эксплуатация фторопластовых дефлегматоров в производствах концентрирования минеральных кислот определила основные гидромеханические и теплотехнические параметры их работы.

При анализе опытных данных эксплуатации фторопластовых дефлегматоров в колоннах различных производств определен возможный интервал нагрузок по газу и жидкости, который по газу составляет от 1200 до 4000 м³/час и по орошаемой жидкости от 3 до 30 м³/час при гидравлическом сопротивлении 15 – 60 мм водяного столба.

Наибольшей эффективности при эксплуатации колонны достигают дефлегматоры в которых одновременно с отводом теплоты конденсации низкокипящих компонентов парогазовой смеси наиболее полно осуществляется концентрирование между образовавшимся конденсатом и паром.

Этим требованиям отвечает данная конструкция дефлегматора.

Фторопластовый дефлегматор обеспечивает теплосъем 270 кВт при коэффициенте теплопередачи 200 – 230 Вт/м² К.

Развитая пенообразующая поверхность фторопластового дефлегматора способствует проведению процессов массообмена в пенном режиме.

Организованный отвод избытка конденсата (жидкой фазы) позволяет поддерживать устойчивый гидромеханический режим контакта фаз.

Эффективность применения фторопластовых дефлегматоров в колонных аппаратах подтверждена следующими основными показателями:

- сокращение энергозатрат на 15 %;
- снижение металлоемкости на 80 %;
- удлинение срока службы аппарата в 5 – 10 раз;
- сокращение затрат на ремонт и обслуживание на 40-60%.

Применение фторопластового дефлегматора позволяет повысить качество получаемого продукта.

В таблице 1 приведены сопоставимые показатели анализов концентрированной азотной кислоты производства концентрирования азотной кислоты нитратмагниевым методом.

Таблица 1

Сравнение показателей качества кислоты двух колонных установок

Показатели качества кислоты	При работе колонны баз фторопластового дефлегматора	При работе колонны с фторопластовым дефлегматором
Содержание HNO ₃ , %	97,0 – 98,5	98,5 – 99,7
Содержание окислов азота N ₂ O ₄ , %	0,3 – 0,4	0,07 – 0,26
Содержание прокаленного остатка, %	0,04 – 0,02	0,008 – 0,015

Опыт промышленной эксплуатации фторопластовых дефлегматоров, а также экспериментальные исследования конструкции тарелки – дефлегматора площадью поверхности теплообмена 32 м², определяют перспективность конструкции в случае дальнейшего совершенствования аппаратов, с площадью поверхности теплообмена 6,3, 10, 32 и 63 м².

Намечены пути совершенствования конструкции с целью улучшения технико-экономических показателей и расширения областей применения в колонных аппаратах диаметром 1000 – 1600 мм, которые представлены в таблице 2.

Перспективные области применения дефлегматоров

Краткая техническая характеристика конструкции	Перспектива производства для внедрения дефлегматоров
Встроенный дефлегматор с площадью поверхности теплообмена 10 м ² и 32 м ² , диаметр 1000 мм	Производство концентрирования азотной кислоты, колонны концентрирования: - производство реактивной серной кислоты, изотермические абсорберы; - производство хлорорганики, ректификационные колонны
Встроенный дефлегматор с площадью поверхности теплообмена 63 м ² , диаметр 1600 мм	Производство концентрирования минеральных кислот, агрегаты укрупненной мощности, отбелочные колонны.
Встроенный дефлегматор с площадью поверхности теплообмена 63 м ² , диаметр 1200 мм	Для оснащения сепараторов отбелочных колонн.

Поступила в редколлегию 25.03.10

УДК 661.56

В.Н. КОЛОМИЕЦ, канд. техн. наук, **А.Н. СУЛИМА**, канд. техн. наук,
М.А. ХАРЧЕНКО, канд. техн. наук, **Ю.В. БОРОВЕНСКИЙ**,
ОАО “УкрНИИхиммаш”, г. Харьков, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИСТИЛЛЯЦИИ РАСТВОРОВ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ НА ОПЫТНОЙ УСТАНОВКЕ

В роботі надані результати експериментальних досліджень дистиляції розчинів азотної кислоти в заводських умовах. Одержані результати найдуть своє примінення при розробці установок дистиляції розчинів.

В работе предоставлены результаты экспериментальных исследований дистиляции растворов азотной кислоты в заводских условиях. Полученные результаты найдут свое применение при разработке установок дистиляции растворов.

The paper presented the results of experimental studies distillation nitric acid solutions at the factory. The results would be applied when developing solutions distillation plants.

Интенсификация производства азотных удобрений, а также концентрирования азотной кислоты с применением водоотнимающих веществ ($Mg(NO_3)_2$; H_2SO_4) во многом определяется исходной концентрацией HNO_3 поступающей на переработку.

Кроме того в ряде случаев возникает необходимость в регенерации отработанных растворов азотной кислоты, имеющих относительно низкую концентрацию.

Одним из перспективных путей укрепления растворов азотной кислоты является ее дистилляция.

Такой технологический прием предварительного концентрирования азотной кислоты до 63 ÷ 65 % масс., а также по аппаратному оснащению установки описан в научно-технической литературе около 40 лет назад.

Однако, такая технология укрепления азотной кислоты до настоящего времени не получила широкого практического применения по ряду причин.

К ним относятся:

- отсутствие высокоэффективного и коррозионноустойчивого оборудования, обладающего работоспособностью в азотной кислоте при температуре 100 – 160 °С;

- недостаточно четкие представления об особенностях процесса дистилляции слабой азотной кислоты из различных источников получения и связанные с этим требованиями к конструктивному исполнению технологического оборудования;

- отсутствие данных по технико-экономической эффективности внедрения стадии предварительного концентрирования в различных технологических системах производства азотной кислоты;

- недооценки экологического фактора при получении концентрированной азотной кислоты сернокислотным методом.

Для получения надежных данных, которые можно будет использовать при проектировании промышленных установок дистилляции растворов слабой азотной кислоты большой единичной мощности, а также опытной проверки работоспособности предложенных устройств были проведены экспериментально исследования по дистилляции растворов HNO_3 в заводских условиях.

Опытная установка включала дистилляционную колонну, кипятильник, конденсаторы, подогреватель и была оснащена необходимыми контрольно-измерительными приборами и дозаторами.

Дистилляционная колонна с внутренним диаметром 400 мм имела высоту 13000 мм.

Насадка колонны кольца Рашига (50 × 50 × 50 мм).

Футеровка колонны и насадочные кольца были изготовлены из фторпласта.

В колонну дистилляционную вмонтировались две теплообменные секции общей поверхностью 24 м².

Конденсаторы (1X18H10T) включались последовательно.

Кипятильник – титановый (BT1-0).

Режим работы колонны дистилляционной был непрерывный.

Раствор 45 ÷ 55 % азотной кислоты поступал в колонну дистилляции из подогревателя с температурой 70 – 80 °С.

Масса оксидов азота в кислоте изменялась от 0,04 до 0,19 %.

Скорость подачи раствора HNO₃ в колонну дистилляции составляла от 0,1 до 4 кг/сек (0,36 – 1,44 тонны в час).

Флегмовое число варьировалось в пределах 0,35 – 1,5.

При проведении экспериментов измеряли производительность по исходной кислоте, дистилляту, кубовой жидкости.

Контролировался и регулировался температурный режим по высоте колонны, в кубе, кипятильнике, конденсаторах и подогревателе.

Определялась температура охлаждающей воды на входе и выходе из соответствующих устройств.

В зависимости от нагрузки, температурного режима и содержания в исходной кислоте окислов азота, флегмового числа и интенсивности охлаждения теплообменных секций изменяется состав дистиллята.

Массовая доля кислоты в нем колебалась от 2, 3 до 7 процентов.

Содержание окислов азота в дистилляте определялось от наличия следов до 5,5 % масс.

В таблице представлены отдельные экспериментальные данные дистилляции HNO₃. Скорость подачи HNO₃ – 0,16 кг/сек.

Температура колонны 100 °С.

Следует отметить, что результаты проведенных опытных исследований значительно отличаются от тех параметров (особенно по дистилляту), которые прогнозируются в результате моделирования этого процесса по известным литературным источникам.

Экспериментальные данные дистилляции HNO_3

Состав жидкости, масс. %						R
Исходная HNO_3		Дистиллят		Куб		
HNO_3	N_2O_3	HNO_3	N_2O_3	HNO_3	N_2O_3	
50,5	0,12	4,5	5,4	57,8	Следы	0,61
54	0,2	6,8	0,3	59,5	–"–	0,82
54	0,2	6,2	0,18	59,7	–"–	0,48
55,2	0,3	4,0	Следы	62	–"–	2,0
53,5	0,2	2,3	–"–	66	–"–	2,0
54,2	0,12	4,0	–"–	62,5	–"–	1,46

Такое расхождение можно объяснить тем, что при составлении математических моделей дистилляции слабых растворов не учитывается наличие оксидов азота, которые могут присутствовать в исходной кислоте, так и появляться в результате разложения HNO_3 под действием температуры и других причин.

Наличие оксидов азота и повышает концентрацию HNO_3 в дистилляте, так как происходит процесс их абсорбции водой.

Полученные экспериментальным путем результаты на опытной установке дают возможность уточнять данные, необходимые при разработке установок дистилляции растворов, а также определять оптимальный технологический режим при котором достигается минимальное содержание HNO_3 в дистилляте и исключается присутствие в нем оксидов азота.

Проведенные экспериментальные работы показывают целесообразность предварительного укрепления растворов HNO_3 для отдельных технологических систем производства концентрированной азотной кислоты.

Поступила в редколлегию 25.03.10

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

СМЕСИТЕЛЬ-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕХРОМАТОРА

В статті по результатам лабораторних досліджень запропонований новий матеріал для пониження вмісту хрому в цементі до безпечного для здоров'я людини рівня та запропонований апарат для його одержання продуктивністю 4000 кг/г.

В статье по результатам лабораторных исследований предложен новый материал для понижения содержания хрома в цементе до безопасного для здоровья человека уровня и предложен аппарат для его получения производительностью 4000 кг/ч.

In this article on the results of the laboratory researches the new material, which reduce the maintenance of the chrom in cement to the standart, is offerd, and the apparatus for production this material capacity of 4000 kg/h is suggested.

Проблема наличия шестивалентного хрому в цементе актуальна для всех заводов, которые используют хромомagneзитовые огнеупоры и сырьевые материалы, содержащие соединения хрому.

Потому, что согласно решению Европарламента 2003/53/AG от 17 января 2005 года, установлены ограничения по содержанию в материалах определенных вредных веществ, в частности: «Цемент и цементсодержащие смеси не могут быть применены, если содержание в них свободного хрому Cr(VI) после гидратации составляет больше чем 2 ppm (0,0002 %) от сухой массы цемента».

Именно такое содержание Cr(VI) считается безопасным для здоровья человека и отвечает требованиям охраны окружающей среды.

Понижение содержания в цементе шестивалентного хрому до безопасного уровня является особенно актуальным при экспорте цемента в страны ЕС.

В качестве одного из путей решения проблемы было предложено использовать, как дехроматор, семиводный сульфат железа $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Учитывалось также наличие на «ОАО Сумыхимпром» и других предприятиях неиспользуемых запасов железного купороса.

При этом Cr^{6+} переводят в безопасную для здоровья человека форму Cr^{3+} , чем обеспечивается соответствие портландцементов (относительно содержания Cr^{6+}) европейским стандартам.

При этом такой дехроматор существенно не влияет на качество портландцемента, в частности на его прочностные характеристики.

Вместе с тем, в качестве добавок при производстве цемента широко используются палигорскитовые глины.

Учитывая тот факт, что обе добавки необходимо вводить в цемент, было предложено получать предварительно их смесь, а затем использовать смесь при производстве цемента.

ОАО «УкрНИИхиммаш» совместно с «МинДиП» (г. Сумы) были проведены лабораторные исследования по получению дехроматора на основе семиводного железного купороса (ДСТУ 2463-94) и палигорскита (ДСТУ 30233-95).

Исследования проводились на лабораторном двухшнековом аппарате со шнеками диаметром 45 мм.

Готовилась предварительная (грубая) смесь исходных компонентов в соотношении 9 к 1.

Смесь вручную дозировалась в загрузочную зону шнекового аппарата.

В рубашки аппарата подавалась вода для охлаждения.

Процесс проводили при частоте вращения шнеков 110 об/мин.

Производительность составила 22 – 25 кг/ч, затраты мощности – 0,02 – 0,03 кВт/кг.

Полученная гомогенная масса с частицами размером до 500 мкм анализировалась на равномерность распределения компонентов.

Наработанные небольшие партии добавлялись в портландцемент и определялось содержание Cr^{6+} .

На основании проведенных исследований «МинДиП» (г. Сумы) разработал технические условия на новый дехроматор ТУУ 24.1-05766356-053:2005.

Продукт характеризуется следующими параметрами качества:

- фракционный состав – менее 0,5 мм – 100 %,
- массовая доля влаги – 3 %,
- содержание свободной кислотности в пересчете на H_2SO_4 , не более 1,5%,
- насыпная масса 0,8 – 0,85 т/м³.

«ОАО УкрНИИхиммаш» разработал промышленный смеситель - измельчитель:

Производительность, кг/ч	4000
Диаметр шнека, мм	250
Количество шнеков, шт.	2
Рабочая длина шнеков, мм	2800
Частота вращения шнеков, об/мин	119
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	5,0
Температура продукта в аппарате, °С	60
Установленная мощность двигателя, кВт	132
Масса, кг	15000

Разработка осуществлялась масштабированием результатов лабораторных исследований.

Поскольку в результате измельчения исходных компонентов выделяется тепло, то выполнялся тепловой расчет аппарата, по которому определялся необходимый расход охлаждающей воды и требуемая площадь поверхности теплообмена корпуса.

Блочная конструкция корпуса и блочная конструкция шнеков дают возможность обеспечивать требуемый технологический процесс, а также восстанавливать с меньшими трудозатратами износившиеся в процессе эксплуатации элементы рабочих органов шнеков и корпуса.

Поступила в редколлегию 25.03.10

С.А. БЕЛОВ, канд. техн. наук,

М.А. ОРАЗОВА, УкрНИИХиммаш, г. Харьков, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРНОГО УЗЛА КОКСОВОЙ КАМЕРЫ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

У роботі розглядається задача тривалої циклічної міцності опорного вузла коксової камери. Через великий градієнт температур по висоті опорної обечайки в області приварки опори виникають значні місцеві напруження. Для зниження градієнта температур в опорному вузлі між опорною обечайкою та днищем камери, на деякій відстані від зварного шва приварки опори, встановлюється додаткове кільце, яке передає температуру від днища до опорної обечайки. Виришується задача оптимізації параметрів встановлення додаткового кільця. Виконується оцінка тривалої циклічної міцності коксової камери.

В работе рассматривается задача длительной циклической прочности опорного узла коксовой камеры. Из-за большого градиента температур по высоте опорной обечайки в области приварки опоры возникают значительные местные напряжения. Для снижения градиента температур в опорном узле между опорной обечайкой и днищем камеры, на некотором расстоянии от сварного шва приварки опоры, устанавливается дополнительное кольцо, которое передает температуру от днища к опорной обечайке. Решается задача оптимизации параметров установки дополнительного кольца. Выполняется оценка длительной циклической прочности коксовой камеры.

The problem of long-term cyclic strength of the holding bridge of coke oven chamber is considered in this work. Due to the large temperature gradient in height bearing shell in the area of welding support there are significant local tensions. To reduce the temperature gradient in the holding bridge between the bearing shell and the bottom of the camera at some distance from the weld welding supports an additional ring is established which transmits the temperature from the bottom to the supporting sidewall. The problem of the parameters of the installation of additional rings is solving. The estimate of prolonged cyclical strength of coke oven chamber is performing.

Коксовая камера является реактором циклического действия.

Циклический характер работы обуславливает циклические перепады и неравномерность температур оболочки реактора, как по периметру и высоте, так и по толщине стенок аппарата.

Наиболее нагруженной областью коксовой камеры является зона соединения опорной обечайки с корпусом.

Циклический характер работы камеры может привести к возникновению трещин в сварном шве приварки опорной обечайки к корпусу.

В частности, на Херсонском НПЗ во всех пяти коксовых камерах после

20 лет эксплуатации при обследовании были обнаружены трещины в зоне приварки опор.

Склонность к трещинообразованию обусловлена большим градиентом температур по высоте опорной обечайки.

Для снижения градиента температур в опорном узле между опорной обечайкой и днищем на некотором расстоянии от сварного шва приварки опоры устанавливается кольцо.

При монтаже между кольцом и днищем имеется зазор.

В режиме коксования этот зазор выбирается и за счет теплопроводности кольца снижается градиент температур.

В данной работе решаются задачи оптимизации параметров установки указанного выше кольца (расстояние от сварного шва до места установки кольца и зазор между кольцом и днищем) и оценки циклической прочности опорного узла коксовой камеры с учетом температурных напряжений.

Корпус коксовой камеры изготовлен из двухслойной стали 12ХМ+08Х13.

Толщина плакирующего слоя 6 мм.

Опорная обечайка в нижней части (на высоте 1500 мм) выполнена из стали 09Г2С, в верхней части – из стали 12ХМ.

Основные размеры корпуса и опорного узла показаны на рис. 1.

Аппарат изолируется от тепловых потерь.

Толщина тепловой изоляции 200мм.

На наружной поверхности нижней части опорной обечайки, высотой 600мм теплоизоляция отсутствует.

В качестве теплоизоляционного материала используются маты минераловатные прошивные М-100, которые укладываются в два слоя.

Для определения напряженного состояния опорного узла коксовой камеры применялся программный комплекс, реализующий метод конечных элементов.

Для создания расчетной модели использовались элементы двух типов: 8-узловой конечный элемент твердого тела с одной степенью свободы в узле – температурой и 8-узловой конечный элемент твердого тела с тремя степенями свободы в узле.

Расчеты выполнялись в два этапа: первый этап - получение поля распределения температур, второй этап – определение напряженного состояния (НС).

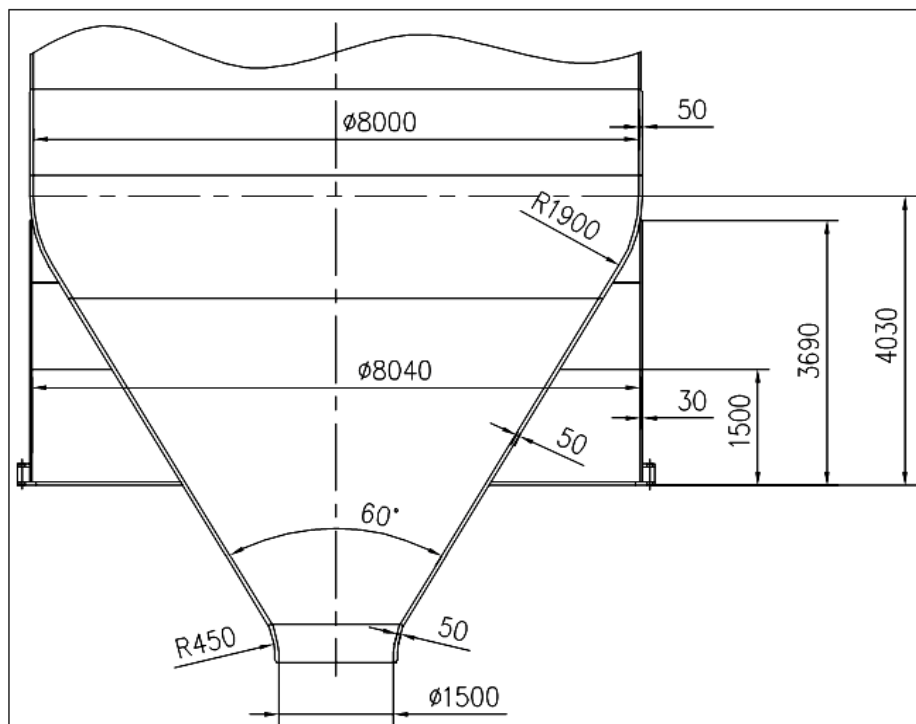


Рис. 1. Конструкция опорного узла коксовой камеры

В рассматриваемой модели учитывается основной и плакирующий слои, имеющие различные коэффициенты линейного расширения.

Расчеты показали, что эффективнее всего установить кольцо 10×250 мм на расстоянии 700 мм от сварного шва приварки опорной обечайки. Кольцо состоит из 25 сегментов, зазор между сегментами 15 мм. При монтаже между кольцом и днищем существует зазор 10 мм, который выбирается при повышении температуры в режиме коксования. Ввиду симметрии аппарата и нагружения рассматривается 1/25 часть корпуса.

При определении температурного поля применялись следующие граничные условия: задание температуры $495 \text{ }^\circ\text{C}$ на внутренней поверхности корпуса; задание на внешней поверхности теплоизоляции температуры окружающей среды $25 \text{ }^\circ\text{C}$ и коэффициента теплоотдачи от изоляции к воздуху. На этом этапе учитывается теплопроводность воздуха, который находится в «треугольнике», образованном частью внутренней поверхности опоры, частью внешней поверхности днища и верхней поверхностью кольца.

Диаграмма температур приведена на рис. 2.

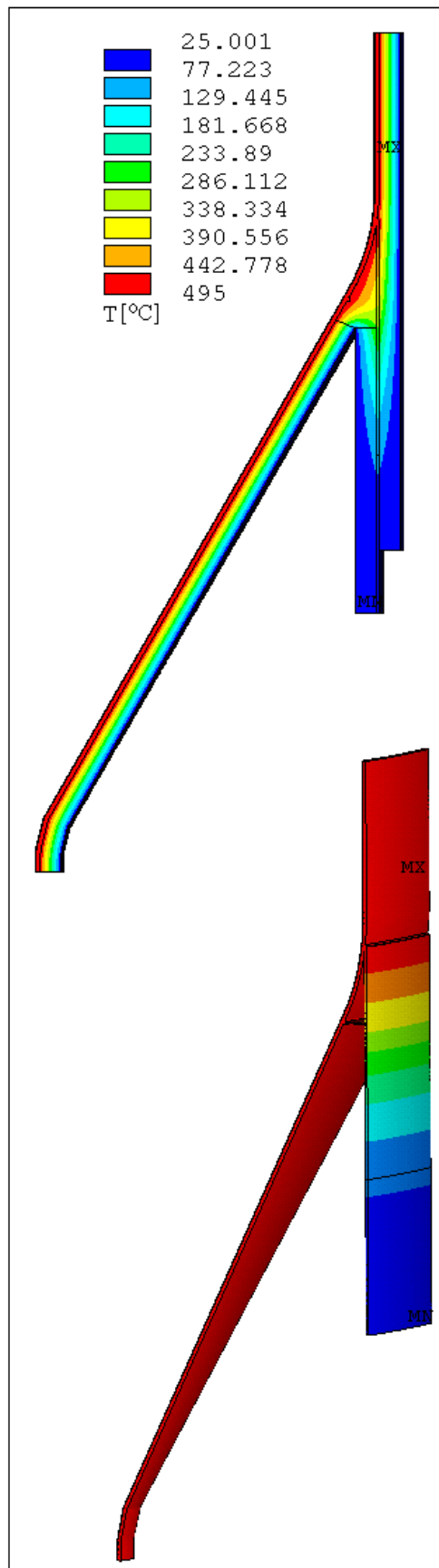


Рис. 2. Диаграмма температур

График распределения температуры вдоль образующей на внутренней поверхности опорной обечайки показан на рис. 3 (верхняя тонкая кривая соответствует опорной обечайке с приваренным дополнительным кольцом, нижняя утолщенная кривая – опорной обечайке без дополнительного кольца).

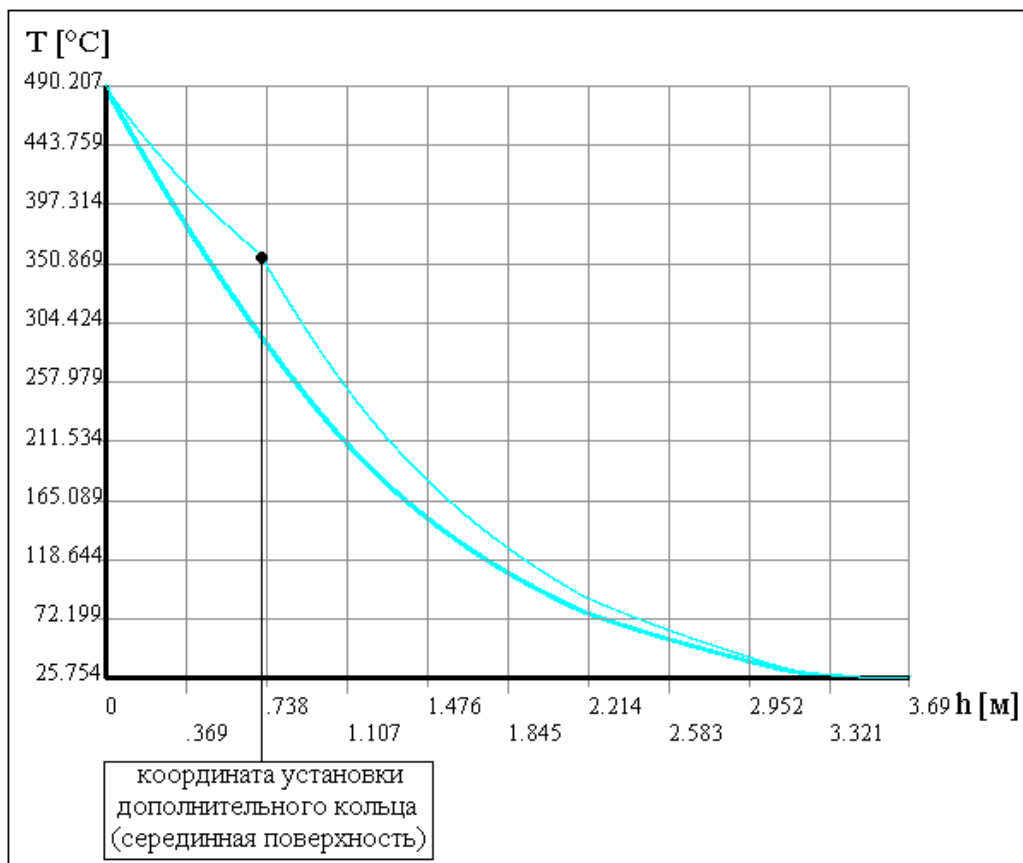


Рис. 3. График распределения температуры вдоль образующей на внутренней поверхности опорной обечайки

На основании графика распределения температуры вдоль образующей опорной обечайки можно сделать вывод о том, что установка дополнительного кольца способствует снижению градиента температур опорной обечайки и, соответственно, снижению уровня НДС.

При выполнении расчета на прочность давление принимается для цикла коксования.

На высоте от 0 до 23665 мм давление равномерно меняется от 8,51 кг/см² до 5,27 кг/см².

Температурное поле, полученной ранее, используется в качестве внешней нагрузки.

В расчете также учитываются следующие массовые нагрузки: масса корпуса – 270 т, изоляции – 25 т, среды – 1685,6 т.

Перечисленные массовые нагрузки моделировались давлением, приложенным к верхней кольцевой поверхности цилиндрической обечайки корпуса.

В качестве граничных условий используются условия циклической симметрии по поверхностям отсечения рассматриваемой части корпуса, а также запрещение осевых перемещений нижней кольцевой поверхности опорной обечайки.

На рис. 4 ÷ 6 приведены диаграммы эквивалентных напряжений (по Мизесу) для рассматриваемых частей конструкции.

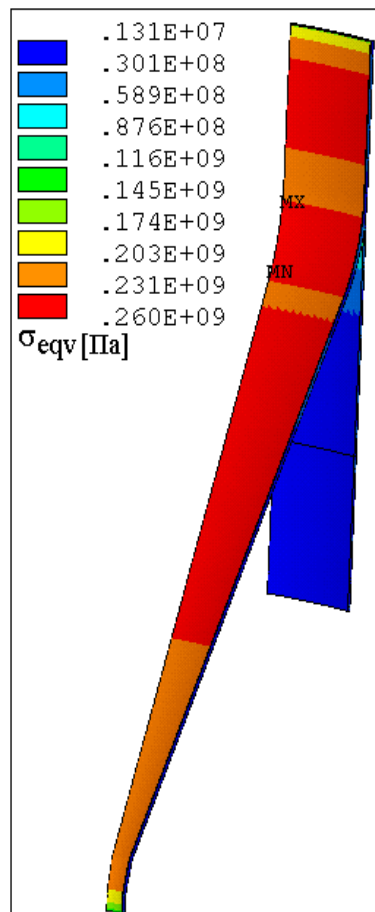


Рис. 4. Диаграмма эквивалентных напряжений опорного узла

На основании приведенных выше результатов можно сделать следующие выводы:

- максимальное значение эквивалентного напряжения для конического днища наблюдается в области сварного шва приварки опорной обечайки и достигает для плакирующего слоя 260 МПа (внутренняя поверхность днища) и для основного слоя 85,8 МПа (внешняя поверхность днища);

- максимальное значение эквивалентного напряжения для опорной обечайки также наблюдается в области сварного шва и достигает 148 МПа (внутренняя поверхность опорной обечайки).

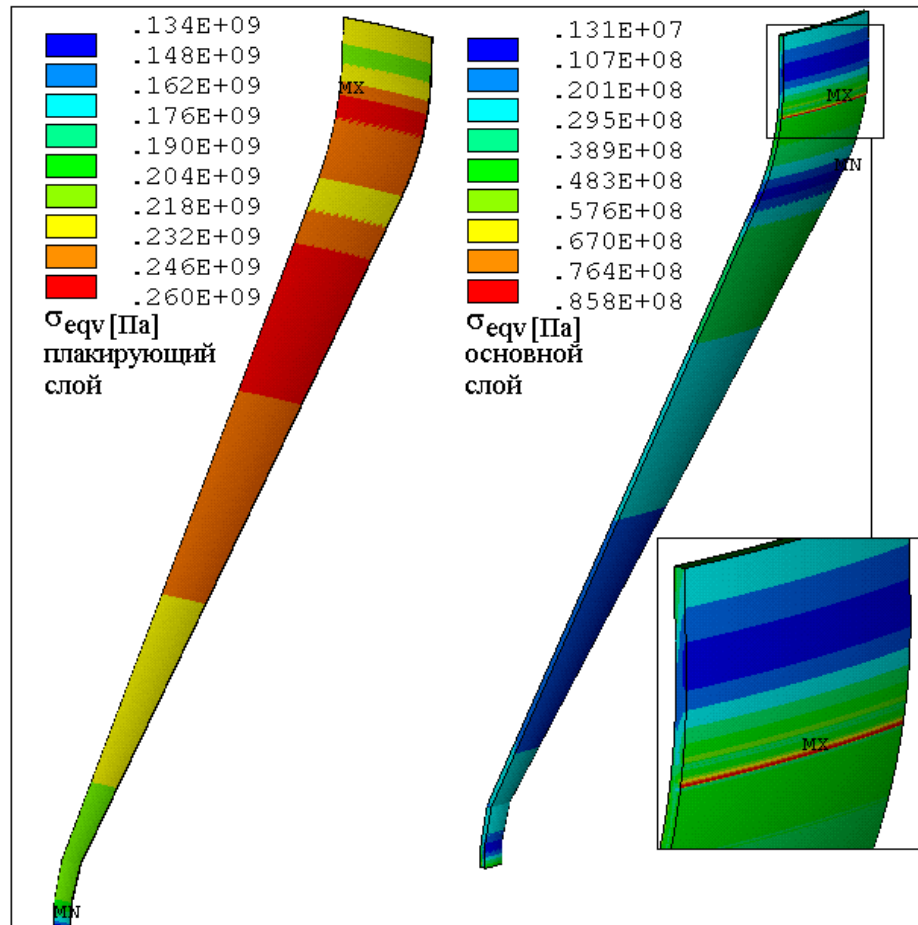


Рис. 5. Диаграмма эквивалентных напряжений конического днища

Результаты, приведенные на рис. 4 ÷ 6 соответствуют режиму коксования.

После окончания цикла коксования, перед резкой кокса, на рассматриваемую конструкцию действуют только массовые нагрузки.

Под действием массовых нагрузок:

- максимальное значение эквивалентного напряжения для конического днища наблюдается для основного слоя в области сварного шва приварки

опорной обечайки (внешняя поверхность днища) и составляет 49,5 МПа; для плакирующего слоя максимальное эквивалентное напряжение достигает 17,8 МПа;

- максимальное значение эквивалентного напряжения для опорной обечайки также наблюдается в области сварного шва и достигает 30,9 МПа (внутренняя поверхность опорной обечайки).

Для первого цикла нагружения – перехода от цикла коксования к подготовке выгрузки кокса – амплитуда напряжений составит:

- для конического днища $\sigma_a = K_\sigma \Delta \sigma_{eqv} / 2 = 1 \cdot (260 - 7,7) / 2 = 126,2$ МПа;
 - для опорной обечайки $\sigma_a = K_\sigma \Delta \sigma_{eqv} / 2 = 1,2 \cdot (148 - 30,9) / 2 = 70,3$ МПа.
- Здесь K_σ – эффективный коэффициент концентрации напряжений [1].

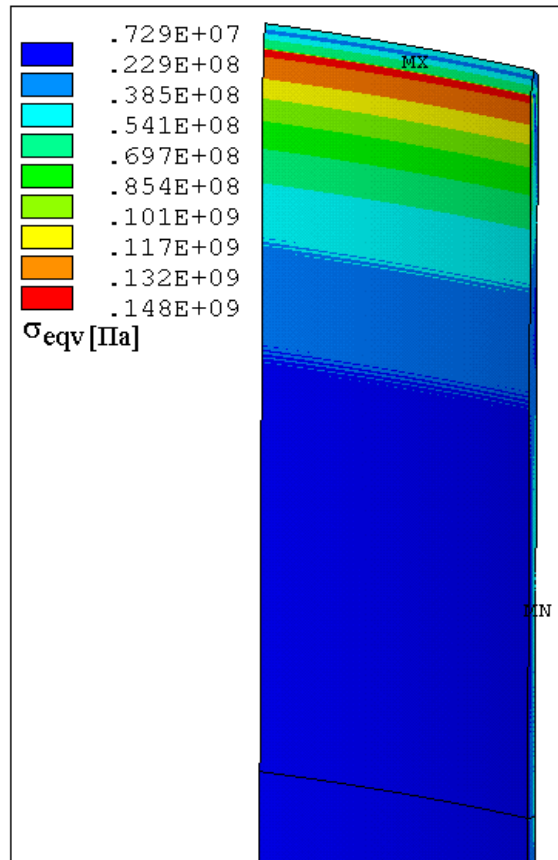


Рис. 6. Диаграмма эквивалентных напряжений опорной обечайки

Оценку напряженного состояния опорной обечайки производим по кривым длительной циклической прочности [2].

Амплитуде напряжения $\sigma_a = 70,3$ МПа [2] соответствует допустимое число циклов нагружения $[N_1] = 7000$ циклов.

Для плакирующего слоя конического днища (сталь 08X13) определим допускаемое число циклов нагружения [1]:

$$[N] = \frac{1}{n_N} \cdot \left[\frac{A}{\bar{s}_a - \frac{B}{n_S}} \cdot C_t \right]^2 \quad \bar{s}_a = \max \left\{ s_a; \frac{B}{n_S} \right\},$$

здесь: n_N – коэффициент запаса по числу циклов; $A = 0,6 \cdot 10^5$ – характеристика материала; $B = 0,4 \cdot R_{m/t}$ – характеристика материала, $R_{m/t}$ – временное сопротивление материала при расчетной температуре [3]; $C_t = (2300-t)/2300$ – поправочный коэффициент, учитывающий температуру; t – расчетная температура; n_σ – коэффициент запаса по напряжениям.

Допускаемое число циклов для плакирующего слоя конического днища составляет $[N_2] = 33540$ циклов.

Окончательно, для коксовой камеры принимается допускаемое число циклов нагружения $[N] = 7000$ циклов.

Выводы.

В результате выполненного анализа дана рекомендация по параметрам установки дополнительного кольца, приведена оценка циклической прочности опорного узла коксовой камеры.

Список литературы: 1. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на прочность при малоцикловых нагрузках: ГОСТ Р 52857.6-2007. 2. ПНАЭ Г-7-002-86 / Госатом-энергонадзор СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1989. 3. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования: ГОСТ Р 52857.1-2007.

Поступила в редколлегию 25.03.10

П.С. МАРЧЕНКО, канд. техн. наук,

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

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ПАТРУБКА ШТУЦЕРА С ГИЛЬЗОЙ

Використавши кусково-лінійну апроксимацію діаграми пружно-пластичного деформування матеріалу тонкостінної циліндричної оболонки, котру називають гильзою, обчислено контактний тиск, який виникає між стінками гильзи та патрубка штуцера під дією внутрішнього тиску та термічного розширення. Отримані розрахункові формули, котрі дають можливість оцінювати міцність такого патрубка та місць приварювання гильзи.

Используя кусочно-линейную аппроксимацию диаграммы упруго пластического деформирования материала тонкостенной цилиндрической оболочки, которую называют гильзой, вычислено контактное давление, которое возникает между стенками гильзы и патрубка штуцера под действием внутреннего давления и температурных расширений. Получены расчетные формулы, которые позволяют оценить прочность такого патрубка и мест приварки гильзы.

Using piecewise-linear approximation of the diagram of elastic - plastic deformation of a material of a thin-walled cylindrical environment, a so-called sleeve, the contact pressure arising between a wall of a sleeve and a branch pipe of the union under action of internal pressure and temperature expansions is calculated. Having taken advantage of normative safety factors, the settlement formulas are received, allowing to estimate durability of a branch pipe and zones welding sleeves.

Иногда при изготовлении сосудов или аппаратов возникает необходимость с внутренней стороны патрубка штуцера 2 (рис. 1 а) установить тонкостенную цилиндрическую оболочку, так называемую гильзу 1.

Как правило, гильза изготавливается из коррозионностойкой стали аустенитного класса, которая имеет коэффициент линейного расширения больше, чем материал патрубка 2.

В месте соединения гильзы 1 с корпусом 3 и фланцем 4 делается наплавка такого же материала высотой δ .

Решение такой задачи при другом сочетании материалов или с учетом зазора между гильзой и патрубком не имеет принципиального отличия и не приводится здесь только в силу громоздкости изложения.

При нагревании такого соединения гильза 1 расширяется в осевом и радиальном направлении больше, чем патрубок 2, что приводит к образованию осевой нагрузки сварного шва N_c , контактного давления p_k и, при трении этих деталей друг о друга, осевой нагрузки трения τ_k (рис. 1 б,в).

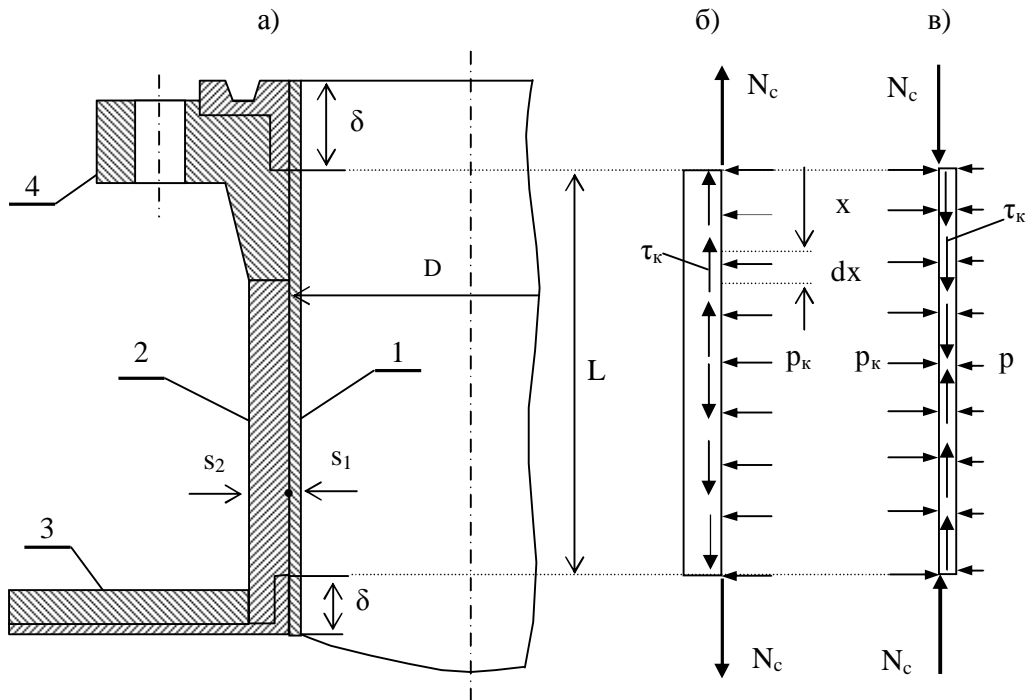


Рис. 1. Расчетная схема соединения гильзы с патрубком штуцера

Для определения нагрузок N_c и p_k необходимо приравнять осевые и радиальные перемещения гильзы и патрубка:

$$\Delta_{1o} = \Delta_{2o}, \quad \Delta_{1r} = \Delta_{2r}, \quad (1)$$

где Δ_{1o} – осевое удлинение гильзы

$$\Delta_{1o} = \alpha_1(t - t_0)L + \frac{N_o L}{\pi(D - s_1)E_1 s_1} - \nu \frac{pD(D - 2s_1)}{4E_1 s_1} + \nu \frac{p_k D^2}{4E_1 s_1};$$

Δ_{2o} – осевое удлинение патрубка

$$\Delta_{2o} = \alpha_2(t - t_0)L - \frac{N_o L}{\pi(D + s_2)E_2 s_2} - \nu \frac{p_k D^2}{4E_2 s_2};$$

Δ_{1r} – радиальное расширение гильзы

$$\Delta_{1r} = \alpha_1(t - t_0) \frac{D}{2} - \nu \frac{N_o D}{2\pi(D - s_1)E_1 s_1} + \frac{pD(D - 2s_1)}{4E_1 s_1} - \frac{p_k D^2}{4E_1 s_1};$$

Δ_{2r} – радиальное расширение патрубка

$$\Delta_{2r} = \alpha_2(t-t_0)\frac{D}{2} + \nu \frac{N_o D}{2\pi(D+s_2)E_2 s_2} + \frac{p_k D^2}{4E_2 s_2};$$

N_o – неизвестная осевая нагрузка гильзы (растягивающая с плюсом, а сжимающая с минусом); L – расчетная длина гильзы (рис. 1); p – расчетное давление; t – расчетная температура стенки гильзы и патрубка; t_0 – температура сборки сосуда или аппарата ($t_0 \approx 20$ °C); D – внутренний диаметр патрубка; s_1, s_2 – толщина стенки гильзы и патрубка; E_1, E_2 – модуль продольной упругости материала гильзы и патрубка при расчетной температуре; α_1, α_2 – коэффициенты линейного расширения материала гильзы и патрубка при расчетной температуре; ν – коэффициент Пуассона.

После преобразования первого из условий (1) получаем:

$$N_o = N_t + N_p - N_{pk}, \quad (2)$$

где N_t – составляющая осевой нагрузки патрубка, возникающая при нагревании

$$N_t = \pi (D - s_1) s_1 E_1 (\alpha_2 - \alpha_1) (t - t_0) / C_1,$$

N_p – составляющая осевой нагрузки патрубка, возникающая под действием расчетного давления

$$N_p = \nu \pi D (D - s_1) (D - 2 s_1) p / (4 C_1 L);$$

N_{pk} – составляющая осевой нагрузки патрубка, возникающая под действием контактного давления

$$N_{pk} = \nu \pi D^2 (D - s_1) C_2 p_k / (4 C_1 L);$$

C_1, C_2 – коэффициенты, которые учитывают толщину гильзы и патрубка

$$C_1 = 1 + \frac{E_1 s_1 (D - s_1)}{E_2 s_2 (D + s_2)}, \quad C_2 = 1 + \frac{E_1 s_1}{E_2 s_2}.$$

Используя второе из уравнений (1) и зависимость (2) можно вычислить

контактное давление по формуле:

$$p_k = \frac{4E_1s_1}{D^2C_2C_3} \Delta_H, \quad (3)$$

где C_3 – коэффициент, который учитывает соотношение диаметра и длины гильзы

$$C_3 = 1 - \frac{v^2D}{2L};$$

Δ_H – радиальное перемещение, которое необходимо компенсировать контактным давлением

$$\Delta_H = (\alpha_1 - \alpha_2)(t - t_0) \frac{D}{2} + \frac{pD(D - 2s_1)}{4E_1s_1} - v \frac{C_1D(N_t + N_p)}{2\pi(D - s_1)E_1s_1}.$$

Поскольку на гильзу изнутри действует давление p , а снаружи контактное давление p_k (см. рис. 1,в), окружное сжимающее напряжение в ней можно вычислить по формуле:

$$\sigma_1 = \frac{p_k D - p(D - 2s_1)}{2s_1}.$$

Очевидно, что зависимость (3) будет справедлива только в упругой области деформаций, когда $\sigma_1 \leq R_{p0.2}$, где $R_{p0.2}$ – расчетное значение предела текучести, при котором остаточные деформации составляют 0,2 %.

Принимается по [1] для материала гильзы при расчетной температуре.

Приравнявая $\sigma_1 = R_{p0.2}$, можно определить предельное значение контактного давления, при котором гильза не имеет пластических деформаций:

$$p_{кр} = [2s_1 \cdot R_{p0.2} + p \cdot (D - 2s_1)] / D.$$

Воспользовавшись формулой (3), можно также определить предельное значение радиального перемещения, при котором начинаются пластические деформации:

$$\Delta_{\text{нпр}} = \frac{P_{\text{кпр}} D^2 C_2 C_3}{4E_1 s_1}.$$

Иными словами, если $\Delta_n > \Delta_{\text{нпр}}$, то на участке $\Delta_{n1} = \Delta_n - \Delta_{\text{нпр}}$ в гильзе имеют место пластические деформации.

Для гильзы, изготовленной из коррозионностойкой стали аустенитного класса, диаграмму упруго-пластического деформирования можно аппроксимировать зависимостью, приведенной на рис. 2.

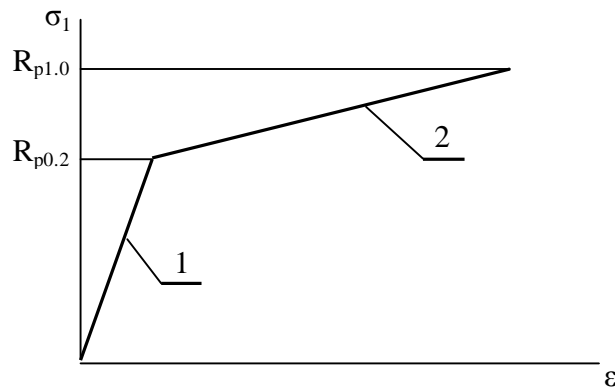


Рис. 2. Аппроксимация диаграммы деформирования материала гильзы

При такой аппроксимации полагаем, что на участке 1 (рис. 2) при напряжении $0 < \sigma_1 \leq R_{p0.2}$ имеется линейная зависимость $\sigma_1 = E_1 \cdot \varepsilon$, где ε – относительная деформация гильзы в окружном направлении.

На участке 2 (рис. 2) при $R_{p0.2} < \sigma_1 \leq R_{p1.0}$, также имеется линейная зависимость между приращением напряжения $\Delta\sigma_1$ и приращением деформации $\Delta\varepsilon$:

$$\Delta\sigma_1 = E_y \cdot \Delta\varepsilon,$$

где E_y – модуль упрочнения, который можно вычислить по формуле

$$E_y = E_1 / \kappa_y;$$

κ_y – коэффициент упрочнения

$$\kappa_y = 0,008 E_1 / (R_{p1.0} - R_{p0.2});$$

$R_{p1.0}$ – расчетное значение предела текучести, при котором остаточные де-

формации составляют 1,0 %. Принимается по [1] для материала гильзы при расчетной температуре.

В таком случае, при $R_{p0.2} < \sigma_1 \leq R_{p1.0}$, контактное давление представляет собой сумму

$$p_k = p_{кпр} + p_{к1}, \quad (4)$$

где $p_{к1}$ – приращение контактного давления, возникающее при деформировании гильзы на участке 2 (рис. 2), которое можно вычислить по формуле

$$p_{к1} = \frac{4E_y s_1}{D^2 C_2 C_3} \Delta_{н1},$$

в которой при вычислении коэффициента C_2 необходимо использовать E_y вместо E_1 , а при вычислении коэффициента C_3 следует принимать $\nu = 0,5$.

Очевидно, что граница применимости формулы (4) будет $\sigma_1 \leq R_{p1.0}$.

Полученное по формуле (3) или (4) значение контактного давления p_k позволяет вычислить окружное напряжение в патрубке (рис. 1 б) по формуле

$$\sigma_2 = p_k D / 2 s_2.$$

Чтобы сохранить требуемые запасы прочности, необходимо принять условие $\sigma_2 \leq [\sigma]_2$, где $[\sigma]_2$ – допускаемое напряжение материала патрубка. Принимается по [1] или другой аналогичной нормативной документации при расчетной температуре стенки патрубка.

Для расчета прочности соединения гильзы с патрубком будем полагать, что при нагревании рассчитываемого соединения гильза 1 (рис. 1) расширяется в обе стороны от середины патрубка.

Такое удлинение гильзы сопровождается трением о стенки патрубка, что приводит к возникновению осевой нагрузки трения $\tau_k = \mu \cdot p_k$, где $\mu = 0,10 - 0,15$ – коэффициент трения (сталь по стали со смазкой – 0,10 или без смазки – 0,15).

При этом контактное давление p_k и, следовательно, осевая нагрузка трения τ_k распределены практически равномерно по всей площади контакта гильзы с патрубком (рис. 1 б, в).

Тогда на расстоянии x от края гильзы осевую нагрузку гильзы можно вычислить по формуле

$$N_o = -N_c - x \pi D \tau_k.$$

При такой осевой нагрузке на элементарном участке длиной dx приращение деформаций гильзы и патрубка можно вычислить по формулам:

$$d\Delta_{1oN} = \frac{N_o dx}{\pi(D - s_1)E_1 s_1}, \quad d\Delta_{2oN} = -\frac{N_o dx}{\pi(D + s_2)E_2 s_2}.$$

Суммируя эти элементарные удлинения, можно получить следующие формулы:

$$\Delta_{1oN} = -\frac{N_c L}{\pi(D - s_1)E_1 s_1} - \mu \frac{p_k D L^2}{4(D - s_1)E_1 s_1},$$

$$\Delta_{2oN} = \frac{N_c L}{\pi(D + s_2)E_2 s_2} + \mu \frac{p_k D L^2}{4(D + s_2)E_2 s_2}.$$

Приравнявая полученные значения удлинений $\Delta_{1oN} = \Delta_{2oN}$, можно получить

$$N_c = N_k,$$

где N_k – суммарное значение осевой нагрузки, возникающей под действием трения гильзы о патрубок, которое вычисляется по формуле

$$N_k = \mu \pi D L p_k / 4.$$

Поскольку нагрузка τ_k всегда действует в сторону противоположную осевой нагрузке патрубка N_o , то для вычисления осевой нагрузки сварного шва следует использовать условие

$$N_c = N_o \pm N_k. \quad (5)$$

В уравнении (5) следует принимать знак плюс тогда, когда $N_o < 0$ и знак минус тогда, когда $N_o > 0$. Кроме того, зависимость (5) говорит о том, что при $N_k = |N_o|$ осевая нагрузка трения τ_k может полностью разгрузить сварной шов

и $N_c = 0$. Если же осевая нагрузка сварного шва по абсолютной величине $|N_c| > 0$, то для расчета зоны наплавки на срез следует принять расчетное значение

$$N_{ср} = \min\{|N_c|; N_{ср}\},$$

где $N_{ср}$ – предельная осевая нагрузка сварного шва, которую без учета упрочнения можно вычислить по формуле

$$N_{ср} = \pi (D - s_1) s_1 R_{p0.2}.$$

При оценке статической прочности зон соединения гильзы с корпусом и фланцем (высоты наплавки δ на рис. 1) необходимо принять условие

$$\tau \leq [\tau],$$

где τ – напряжение среза зоны наплавки

$$\tau = N_{ср} / (\pi D \delta),$$

$[\tau]$ – допускаемое напряжение среза

$$[\tau] = [\sigma] / 2;$$

$[\sigma]$ – меньшее из допускаемых напряжений материала гильзы и патрубка при расчетной температуре стенки. Принимается по [1] или другой аналогичной нормативной документации.

Если требуется произвести оценку циклической прочности зон соединения гильзы с корпусом и фланцем, можно воспользоваться экспериментальными данными, принятыми в [2] для сварных соединений теплообменных труб с трубными решетками:

$$\tau \leq \varphi_c [\sigma], \tag{6}$$

где φ_c – коэффициент уменьшения циклической прочности сварных соединений труб с решетками

$$\varphi_c = 0,95 - 0,2 \lg N;$$

N – число циклов нагружения сварного шва ($N \leq 50000$).

Для вычисления допускаемого числа циклов нагружения формулу (6) можно преобразовать к виду

$$[N] = e^{\xi},$$

где $[N]$ – допускаемое число циклов нагружения для зон присоединения гильзы к патрубку; e – основание натуральных логарифмов; ξ – показатель, который зависит от напряжения τ и вычисляется по формуле

$$\xi = (0,95 - \tau/[\sigma]) \ln 10 / 0,2 .$$

Вывод.

Полученные зависимости позволяют произвести расчет на прочность как самого патрубка под действием контактного давления p_k , которое, как показали расчеты, в несколько раз больше расчетного давления p , так и зон приварки гильзы к корпусу и фланцу штуцера.

Список литературы: 1. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность: ГОСТ 14249-89. – [Введен в действие от 18.05.89]. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1989. – 79 с. **2.** Аппараты выпарные. Нормы и методы расчета на прочность: РД 26-01-55-84. – [Введен в действие от 23.05.1984]. – Х.: УкрНИИхиммаш, 1984. – 112 с.

Поступила в редколлегию 25.03.10

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

СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ КОЛОННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРИЗУЮЩИХСЯ СРЕД

У статті розглянуті проблеми створення ефективного обладнання для процесів масообміну при розділенні сумішей, схильних до полімеризації та обсмоленню. У результаті досліджень та конструктивних опрацювань створена нова конструкція колонного апарату, промислове впровадження якого підтвердило ефективність використаних конструктивних рішень для інтенсифікації технологічного процесу.

В статье рассмотрены проблемы создания эффективного оборудования для процессов массообмена при разделении смесей, склонных к полимеризации и осмолению. В результате исследований и конструктивных наработок создана новая конструкция колонного аппарата, промышленное внедрение которого подтвердило эффективность использованных конструктивных решений для интенсификации технологического процесса.

In the article the problems of creation of efficient equipment are considered for the processes of mass transference at the division of mixtures, feel like polymerization and asphaltization. As a result of researches and structural workings the new construction of column industrial introduction of which was confirmed by efficiency of the used structural decisions for intensification of technological process is created.

Массообменные процессы разделения смесей широко применяются в химической и нефтехимической технологии. Условия их осуществления так разнообразны, что для каждой группы процессов требуется создание контактных устройств специальных конструкций.

В данной статье приведены результаты разработки оптимальной конструкции колонных аппаратов для переработки полимеризующихся сред.

Например, в производстве синтетического каучука полимеризация наблюдается в колоннах получения изопрена.

Полимер откладывается на тарелках в застойных зонах, в частности, в сливных карманах, что приводит к частой остановке производства и трудоемкой работе по очистке колонны. Поэтому основной задачей при создании конструкции аппарата явилось устранение условий отложения полимера на рабочих поверхностях колонных аппаратов и способность контактных устройств к самоочищению. Конструкция тарелки и контактных элементов

должна исключать возможность образования застойных зон, в которых начинается отложение полимера. Затем зона отложения расширяется вследствие торможения жидкой фазы по тарелке и в сливных карманах, что приводит к снижению эффективности работы и полной забивке аппарата. Чистка аппарата – продолжительный и трудоемкий процесс, который требует тщательного освобождения от полимера поверхности тарелок и сливных карманов.

При разработке конструкции аппарата необходимо было интенсифицировать технологический процесс с устранением отложений полимера на внутренних поверхностях аппарата, улучшением качества получаемых продуктов, увеличением срока безостановочной работы, облегчением чистки. Такие результаты могут быть обеспечены оптимальной схемой движения контактирующих фаз и их распределением по сечению аппарата, соответствующей формой рабочих поверхностей, геометрией контактных элементов.

Основной целью проведенных исследований являлось создание конструкции аппарата, состоящего из различных рабочих зон – тарелок с контактными элементами, форма которых обеспечивает эффективный контакт газовой и жидкой фаз без застойных зон на тарелке и сливных устройств специальной конструкции, в которых в отличие от традиционных конструкций, полимер не откладывается. Исследовались способы размещения тарелок в колонне, при которых обеспечивается максимальная эффективность процесса и сводится к минимуму возможность образования полимера на рабочих поверхностях.

Рассматриваемая проблема относится к решению задач аппаратурного оформления и интенсификации процесса тепло-массообмена для смесей, склонных к полимеризации и закоксовыванию, увеличению срока безостановочной работы, облегчению чистки оборудования.

Интенсификация этих процессов дает возможность увеличить производительность аппаратов при уменьшении их габаритов, металлоемкости, стоимости, эксплуатационных расходов.

Повышение эффективности процесса разделения при переработке полимеризующихся сред достигается конструктивными приемами.

Интенсификация гидродинамики газо-жидкостных процессов при разделении полимеризующихся сред позволяет получить желаемые эффекты – отсутствие отложений на поверхностях аппарата, улучшение качества получаемых продуктов

На рис. 1 приведен продольный разрез аппарата.

Тепломассообменный аппарат состоит из корпуса **1**, разделенного на 2 части вертикально диаметральной перегородкой **2**. Перегородка не доходит до нижнего и верхнего днищ аппарата. В каждой части смонтированы по высоте наклонно установленные тарелки **3**, имеющие переливные устройства **4** для приемки стекающей с тарелки жидкости и последующего ее распределения переливной планкой **5**. Планка установлена с зазором **6** относительно дна перелива. Соседние наклонные тарелки соединены одна с другой окнами. На полотно тарелок в шахматном порядке установлены контактные элементы, выполненные в виде щели с отогнутой кромкой, направленной под острым углом к основанию тарелки в сторону ее наклона.

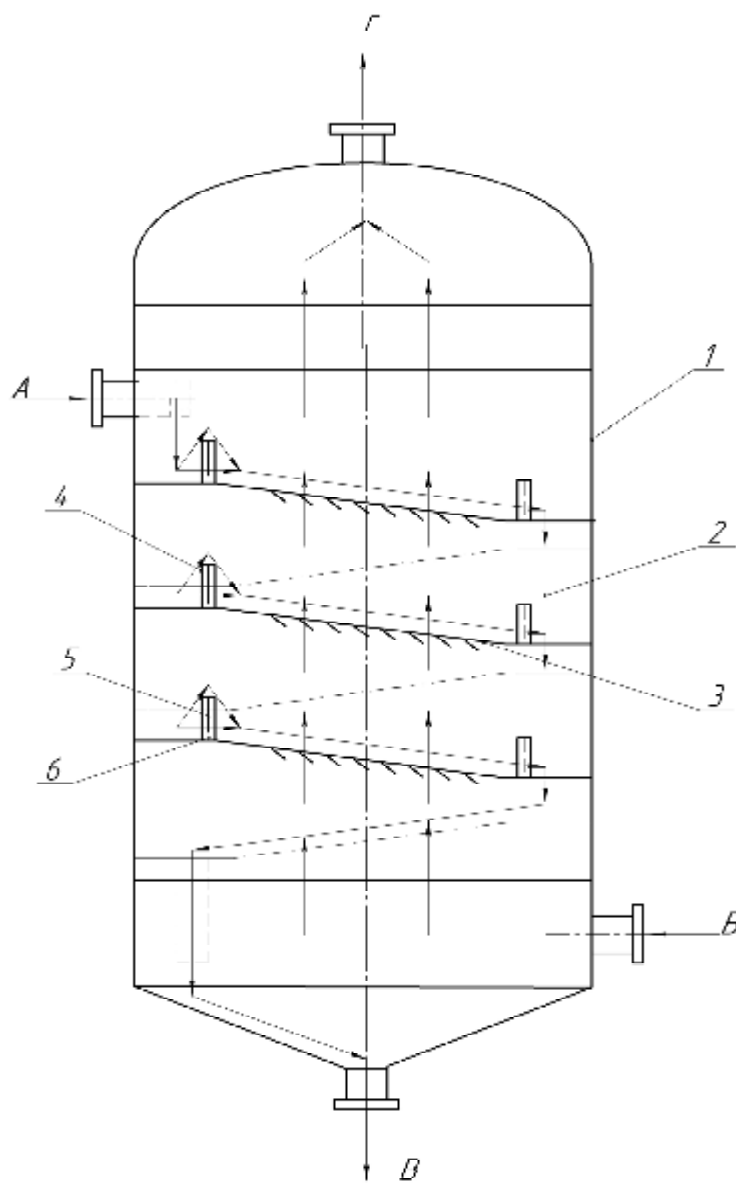


Рис. 1. Тепломассообменный аппарат для переработки полимеризующихся сред

Аппарат работает по следующей схеме: исходный раствор поступает через штуцер **А** в приемный желоб переливного устройства, из которого через окно в диаметральной перегородке и распределительный желоб поступает на наклонную тарелку.

Поступившая на тарелку жидкость контактирует с поступающим через щели контактных элементов паром, в результате диспергирования происходит расширение потока жидкости и его задержка. Образовавшийся газожидкостной слой перемещается по наклонной тарелке к приемному желобу ниже лежащей тарелки. После последовательного прохождения всех наклонных тарелок жидкость сливается в кубовую часть аппарата и через штуцер **В** выводится из аппарата.

Паровой (газовый) поток, поступающий в аппарат через штуцер **Б** после деления диаметральной перегородкой 2 на два потока, поступает в обе части аппарата. Поднимаясь вверх, каждая часть парового потока последовательно контактирует с жидкостью, движущейся по наклонным тарелкам. Выходящий с верхних тарелок паровой поток через штуцер **Г** выводится из аппарата.

Выполнение щелей контактных элементов заглубленными, с отогнутой кромкой, направленной под острым углом к основанию тарелки в сторону наклона тарелки, интенсифицирует процесс тепломассопередачи за счет направленного ввода расширяющихся струй пара навстречу стоку жидкости при сохранении гладкой внешней поверхности. Отсутствие препятствий на пути стока жидкости и наклон полотна тарелки по направлению движения жидкости уменьшают вероятность отложения полимера, и облегчает чистку полотен тарелок. Движение жидкости по двум наклонным половинам тарелок увеличивает длину пути жидкости и время контакта фаз по сравнению с традиционной однопоточной тарелкой, повышая эффективность процесса и не увеличивая высоту аппарата. Отгиб кромок струйных элементов позволяет создавать оптимальные гидродинамические условия входа газовой фазы на тарелку. Схема движения жидкости по наклонным тарелкам аппарата приведена на рис. 2.

Важным конструктивным параметром является угол наклона тарелок относительно горизонтали. От величины угла наклона тарелок зависит скорость движения газо-жидкостного слоя по тарелке и задержка жидкости. Исследованию этого параметра было уделено особое внимание. Был определен угол наклона тарелки, при котором эффективность соответствует 0,85 при

оптимальном межтарельчатом расстоянии $0,25 \div 0,5$ м. Высокая эффективность достигается за счет такой скорости движения, при которой отсутствует отложение продукта вследствие полимеризации при увеличении времени контакта фаз. И при этом не снижается эффективность разделения смеси вследствие увеличения скорости слива жидкости с лотков тарелки. Оптимизации гидродинамической обстановки на тарелке способствует и конструкция переливной планки, позволяющая равномерно распределять жидкость по сечению тарелки. Переливная планка устанавливается с зазором относительно донной части переливного устройства. При этом сливающийся с тарелки жидкостной поток поступает в перелив двумя потоками через щель и верхнюю кромку переливной планки. Интенсивное движение жидкости в сливном устройстве исключает возможность зарастания перелива полимером.

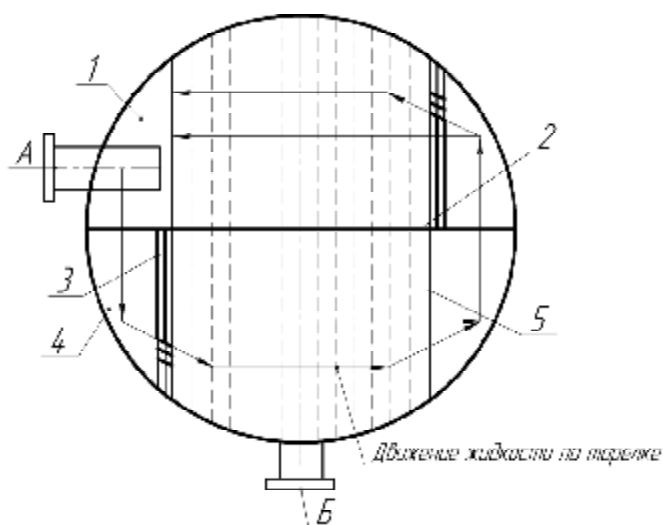


Рис. 2. Схема движения жидкости в аппарате:

- 1 – приемное устройство; 2 – вертикальная диаметрально расположенная перегородка; 3 – переливная планка; 4 – переливное устройство;
- 5 – нижняя кромка тарелки.

Штуцер А – вход жидкой фазы; штуцер Б – вход газовой фазы.

Наклонные струйные тарелки имеют высокую пропускную способность по жидкости, так как не встречают сопротивления движению контактирующих фаз вдоль тарелки от приемного до сливного кармана.

Проведенные исследования позволили решить задачи оптимизации контактного устройства и всего аппарата. Применение новых конструкций элементов тарелок, способа их размещения в аппарате обеспечили оптимальную схему движения контактирующих фаз и их распределение по сечению

тарелок. Промышленное внедрение на одном из заводов синтетического каучука новых тарелок в колонне диаметром 2,4 м взамен клапанных подтвердило их высокую эффективность и способность к самоочищению. Осмотр внутренних поверхностей аппарата после длительной промышленной эксплуатации показал отсутствие отложений полимера на тарелках и в сливных карманах. Срок непрерывной эксплуатации аппарата увеличен более чем в 3 раза.

Поступила в редколлегию 25.03.10

УДК 620.16.001.24

С.А. БЕЛОВ, канд. техн. наук,

Е.А. СЫПКО, С.А. КОРОЛЕВА,

О.А. БЕЛОВА, ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина

ПРОЧНОСТЬ И ГЕРМЕТИЧНОСТЬ ФЛАНЦЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ ПЛАВАЮЩЕЙ ГОЛОВКИ

У справжній роботі проводиться дослідження напружено-деформованого стану й герметичності фланцевого з'єднання плаваючої головки теплообмінного апарату. У роботі розглядаються режим монтажу та робочий стан. При постановці завдання розглядаються наступні контактні пари: з'єднання гайок і фланця, прокладки із фланцями, а також трубної решітки з напівкільцями. Прокладка моделювалася завданням нелінійних характеристик матеріалу на базі експериментальних даних. Розрахунок зроблений за допомогою програмного комплексу, який реалізує метод кінцевих елементів.

В настоящей работе проводится исследование напряженно-деформируемого состояния и герметичности фланцевого соединения плавающей головки теплообменного аппарата. В работе рассматривается режим монтажа и рабочего состояния. При постановке задачи рассматриваются следующие контактные пары: соединения гаек и фланца; прокладки с фланцем а также трубной решетки с полукольцами. Прокладка моделировалась заданием нелинейных характеристик материала на базе экспериментальных данных. Расчет выполнен при помощи программного комплекса, реализующего метод конечных элементов.

The present work carries out research tensely-deformed conditions and tightness reinforcing flanged connections floating head warmly exchange device. 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 gasket with flanges. The gasket 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.

Кожухотрубчатые теплообменники с плавающей головкой получили большее распространение в химической и нефтеперерабатывающей промышленности.

Такие теплообменники применяют для нагрева или охлаждения главным образом жидких нефтепродуктов, при этом по трубному пучку пропускается более вязкая и загрязненная жидкость.

В случае загрязнения трубный пучок, составленный из прямых труб, может быть очищен механическим способом. Конструктивно теплообменник выполняется так, что все его узлы могут быть разобраны, а трубный пучок можно вынимать из корпуса.

В теплообменниках с плавающей головкой теплообменные трубы закреплены в двух трубных решетках, одна из которых неподвижно связана с корпусом, а другая имеет возможность свободного осевого перемещения. При нагревании и удлинении трубок плавающая головка свободно перемещается внутри кожуха. Наиболее полный обзор различных фланцевых соединений приведен в [2].

В настоящей работе рассматривается задача прочности и герметичности одного из основных элементов аппарата – фланцевого соединения плавающей головки [4]. Конструкция фланцевого соединения показана на рис. 1.

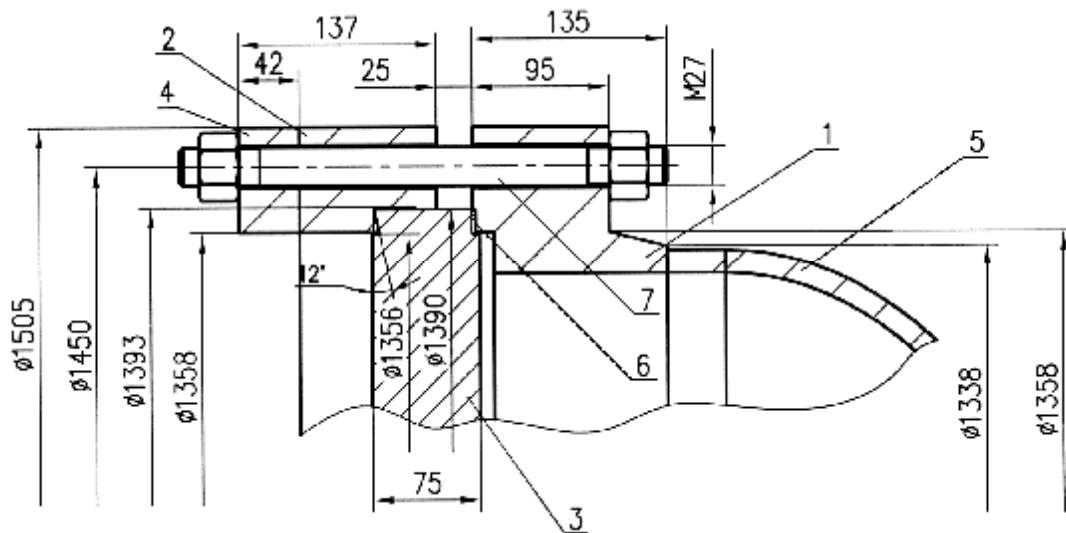


Рис. 1. Конструкция фланцевого соединения плавающей головки

Фланцевое соединение состоит из фланцевого кольца 1, двух полуколец 2, трубной решетки 3, планки 4, крышка с эллиптическим днищем 5.

В соединении также входит уплотняющая прокладка 6 и шпильки с гайками 7 (рис. 1)

Для решения задачи использовался программный комплекс, реализующий метод конечных элементов [1]. Для моделирования объемных элементов, таких как трубная доска, полукольца, шпильки, гайки, эллиптическое днище, применялся объемный конечный элемент с восемью узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле: перемещения в направлении осей X, Y, Z.

Прокладка моделировалась с помощью трехмерного восьми узлового элемента взаимодействия (уплотнения).

Для конечного элемента уплотнения в качестве свойств материала задавались кривые деформирования паронитовой прокладки при нагружении (кривая нагружения) и нескольких циклах разгрузки (кривые разгрузки), полученные экспериментальным путем на разрывной машине «Instron» (рис. 2).

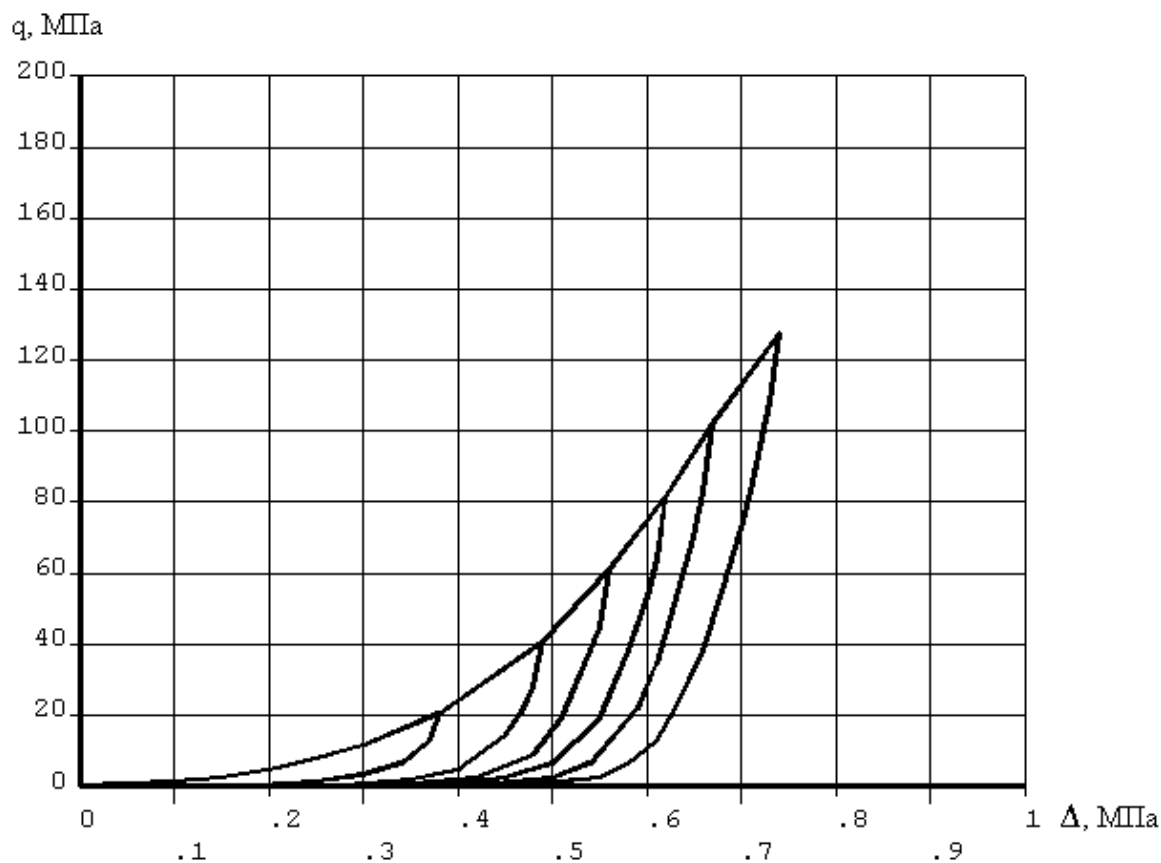


Рис. 2. Диаграмма деформирования паронитовой прокладки

В программном комплексе кривые деформирования задаются в табличном виде.

Усилие затяжки болтов, обеспечивающее герметичность прокладки, моделировалось с помощью элементов предварительного нагруженного соединения. Элемент имеет одну степень свободы UX. Направление перемещения UX соответствует направлению предварительного усилия. Предварительно нагруженное сечение моделируется набором предварительно нагруженных элементов.

Для моделирования контактного взаимодействия гаек с фланцевым соединением, а также трубной решетки с полукольцами задавался трехмерный контактный элемент типа поверхность с поверхностью и связанный с ним трехмерный ответный элемент. Контактная задача решалась с учетом сил трения с коэффициентом трения $\mu = 0,3$. В алгоритм решения контакта заложен расширенный метод множителей Лагранжа.

В силу симметрии конструкции и действующей нагрузки фланцевого соединения плавающей головки, рассматривается 1/60 часть конструкции. Напряжения в конструкции, вызванные ее весом, в расчете не учитываются ввиду их малости.

Расчет проводился для двух режимов: монтаж и рабочие условия.

Для выполнения условия герметичности при монтаже каждая из шпилек в месте соединения гаек с фланцами создает контактное давление с результирующим усилием $N_{60} = 66758,3 \text{ Н}$ [3].

В рабочих условиях дополнительно к предварительной затяжки шпилек подается давление в трубное пространство $p = 1,6 \text{ МПа}$, в межтрубное пространство $p = 0,53 \text{ МПа}$. Температура фланцев и стенок эллиптического днища составляет $t = 180,5 \text{ }^\circ\text{C}$, температура трубной решетки равна $t_p = 225,5 \text{ }^\circ\text{C}$, болтов – $t_b = 135,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Объемная геометрическая модель 1/60 части фланцевого соединения плавающей головки приведена на рис. 3.

В результате расчета напряженно-деформированного состояния фланцевого соединения плавающей головки получены распределения напряжений и перемещений во фланцевом кольце, полукольцах, шпильках и прокладке.

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

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

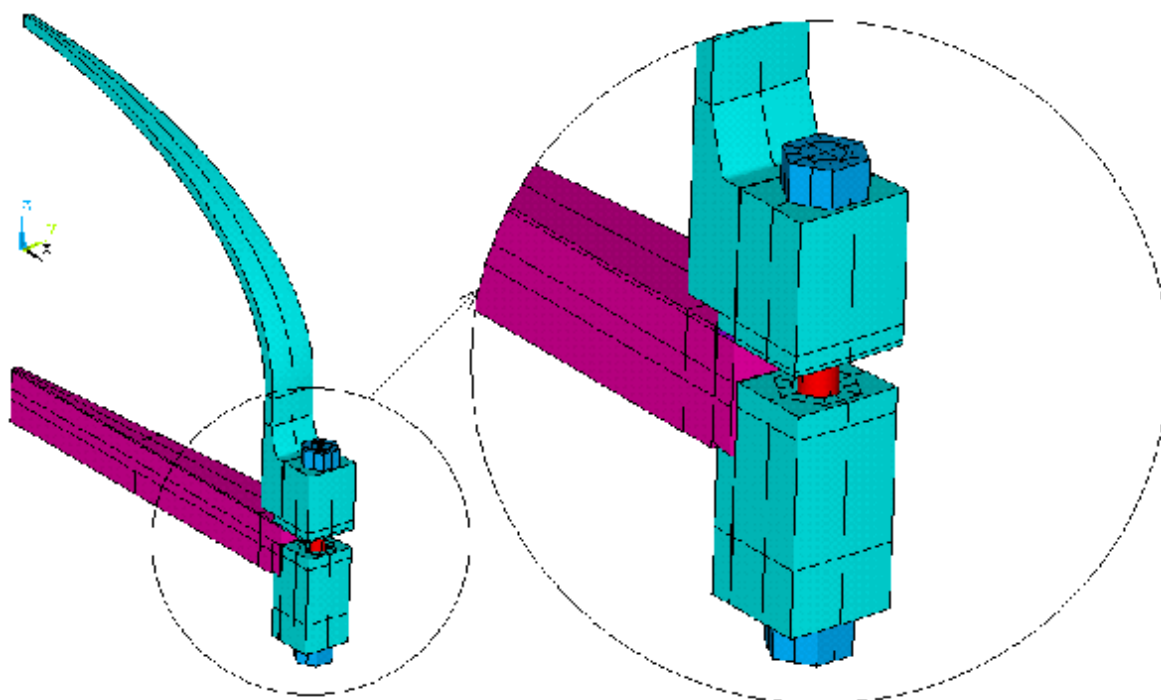
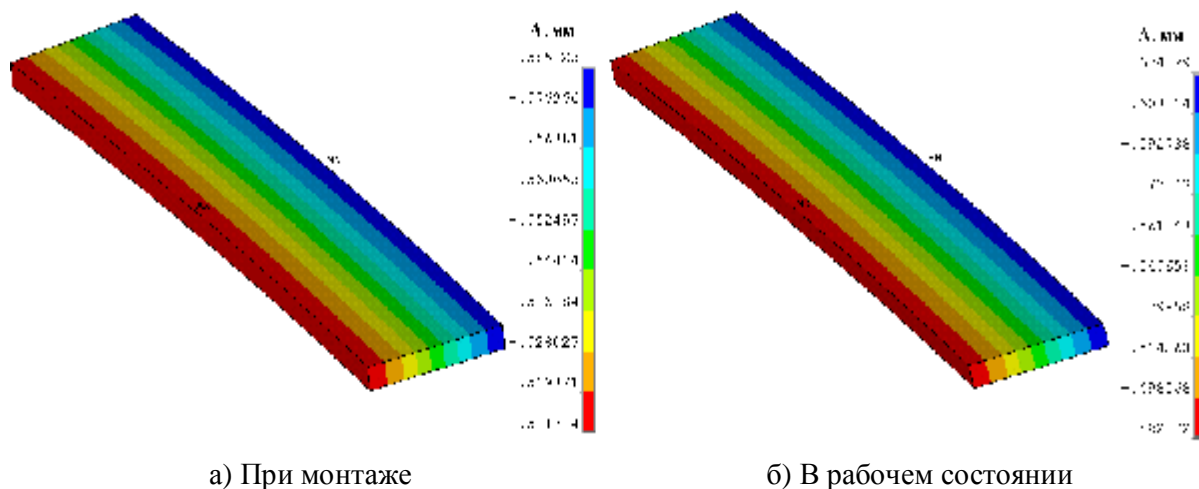


Рис. 3. Объемная геометрическая модель 1/60 части фланцевого соединения плавающей головки



а) При монтаже

б) В рабочем состоянии

Рис. 4. Деформации прокладки

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 [3] для паронита необходимо создать контактное давление 20,0 МПа. Для обеспечения герметичности соединения в рабочих

условиях необходимо обеспечить давление на прокладке, равное $q_n = m \cdot p$, где m – коэффициент прокладки [3], p – расчетное давление в аппарате.

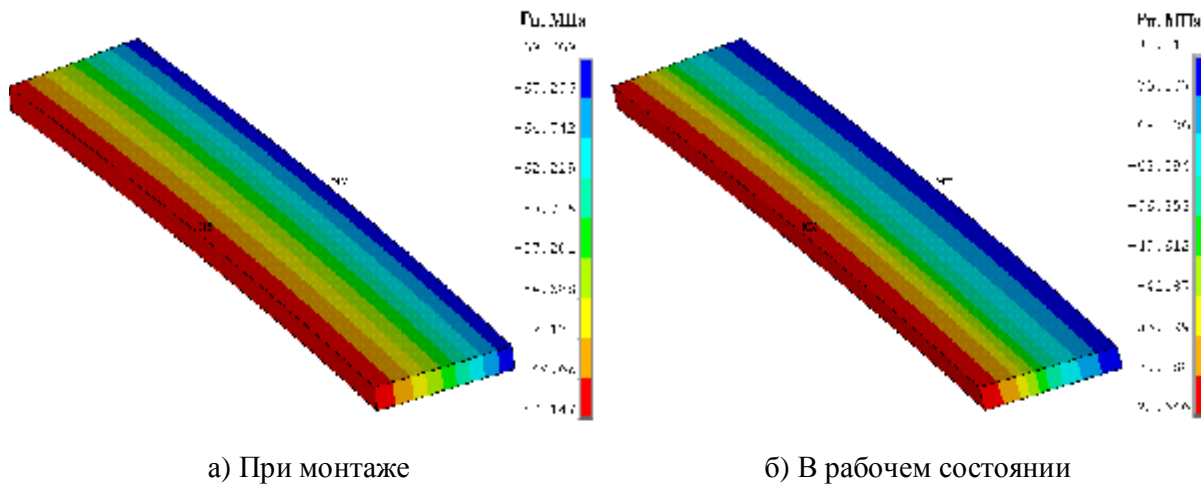


Рис. 5. Контактное давление на прокладки

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. Условие герметичности $q_n \geq 20,0 \text{ МПа}$ – для режима монтажа, $q_n \geq m \cdot p = 4,0 \text{ МПа}$ – в рабочих условиях выполняется по всей поверхности прокладки.

На рис. 6 и рис. 7 представлены диаграммы распределения окружных и осевых напряжений во фланцевом кольце в рабочем состоянии. Как видно из представленных результатов, максимальные окружные и осевые напряжения возникают в месте сопряжения конической втулки с эллиптическим днищем в сечении, проходящем через шпильки.

На рис. 8 и рис. 9 представлены диаграммы распределения напряжений среза в полукольце при монтаже и в рабочем состоянии.

Максимальные напряжения, как при монтаже, так и в рабочем режиме, возникают в области контакта трубной решетки с полукольцом.

На рис. 10 и рис. 11 показаны диаграммы распределения осевых напряжений в шпильке при монтаже и в рабочем состоянии. Как видно из результатов расчета в процессе эксплуатации шпилька подвергается значительному изгибу. Максимальные изгибные напряжения возникают в местах максимальных углов поворота – соединения шпильки с гайкой.

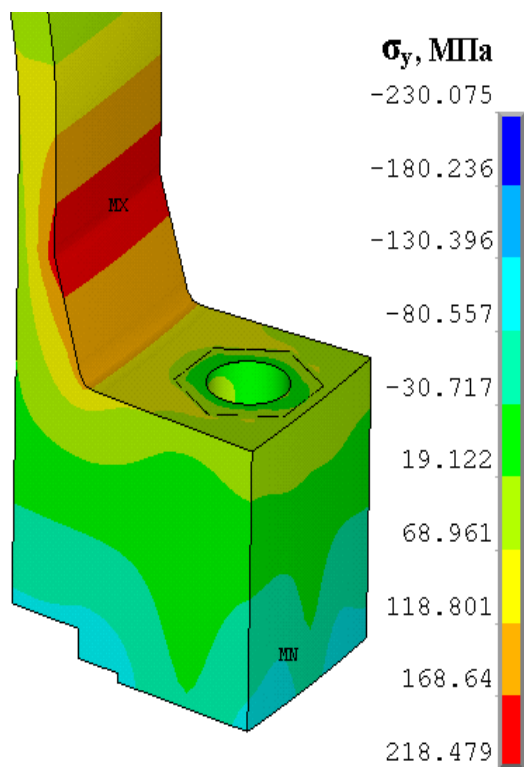


Рис. 6. Распределение окружных напряжений во фланцевом кольце в рабочем режиме

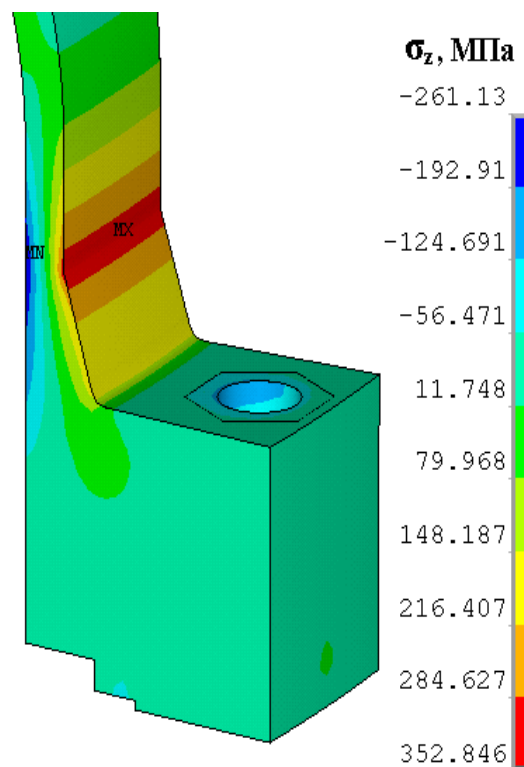


Рис. 7. Распределение осевых напряжений во фланцевом кольце в рабочем режиме

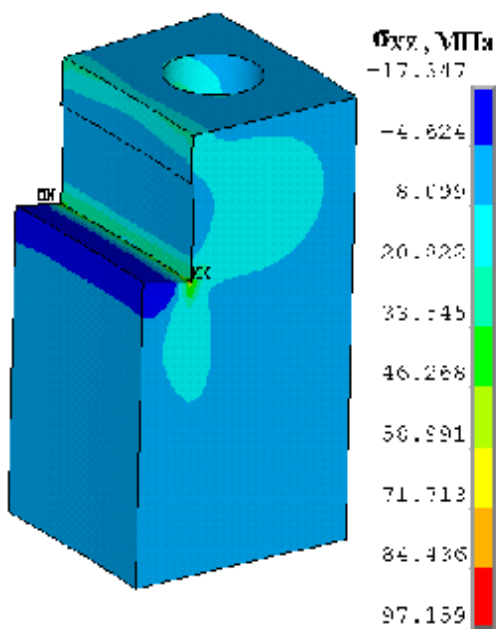


Рис. 8. Напряжения среза в полукольце при монтаже

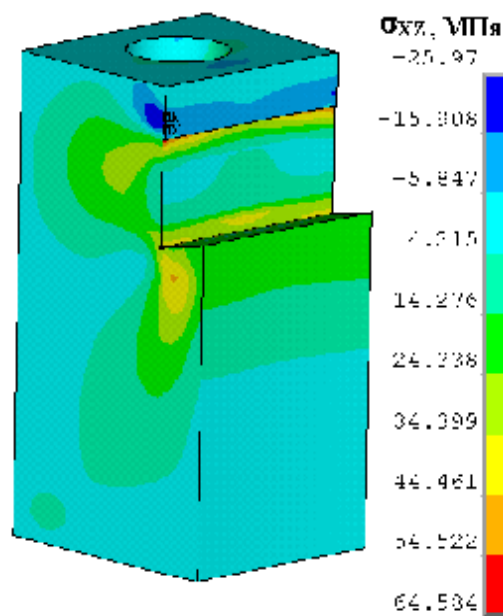


Рис. 9. Напряжения среза в полукольце. Рабочий режим

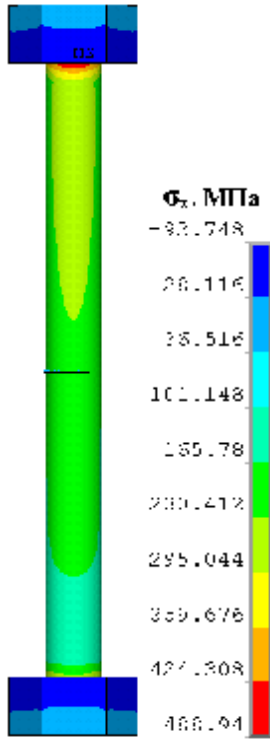


Рис. 10. Осевые напряжения в шпильке при монтаже

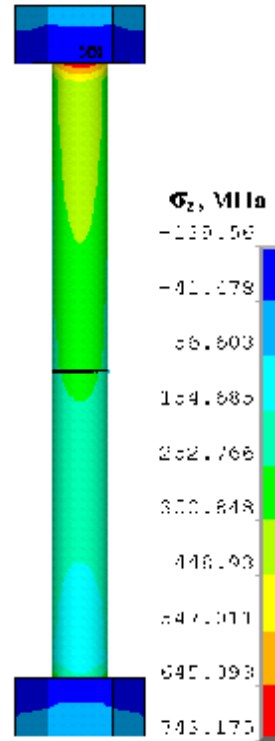


Рис. 11. Осевые напряжения в шпильке в рабочем режиме

В результате решения нескольких контактных пар было получено, что максимальное контактное давление между трубной решеткой и полукольцами составляет 425 МПа. Контактное давление между гайкой и фланцем показано на рис. 13 и рис. 14.

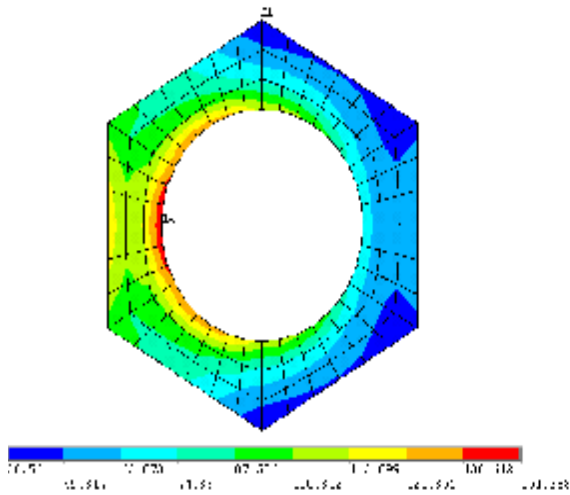


Рис. 13. Контактное давление между контактными парами

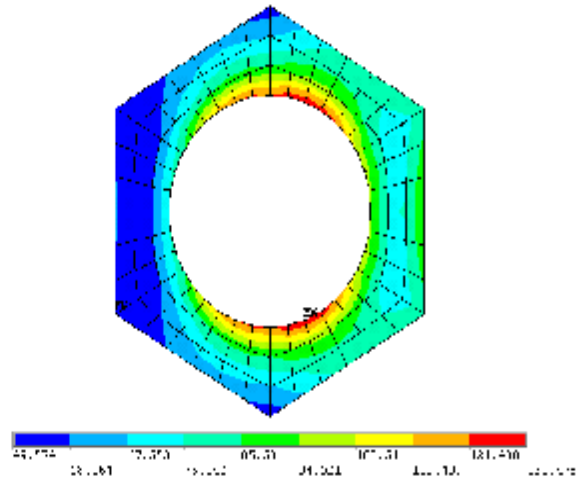


Рис. 14. Контактное давление между контактными парами

гайка – фланцевое кольцо

гайка – полукольцо

Характер распределения контактного давления подтверждает, что углы поворота фланца и шпильки отличаются друг от друга.

Выводы.

В результате расчета получены распределение контактного давления на прокладке, напряженное состояние фланцевого кольца, полукольца и шпилек, контактное давление между поверхностями гайки и фланца, а также трубной решетки и полукольца.

Список литературы: 1. Басовч К. ANSYS: справочник пользователя / [К. Басовч]. – М.: ДМК-Пресс, 2005. – 640 с. 2. Товажнянский Л.Л. Расчет и конструирование разъемных герметичных систем химической техники / Л.Л. Товажнянский, Л.П. Перцев. – Х.: НТУ «ХПИ», 2006. – 268 с. 3. 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. – 38 с. 4. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Теплообменные аппараты: ГОСТ Р 52857.7-2007. – [Введен в действие от 27.12.2007]. – М.: Стандартинформ, 2008. – 48 с

Поступила в редколлегию 25.03.10

УДК 621.129.12

В.М. ДОЛИНСКИЙ, канд. техн. наук,

М.В. КРАВЕЦ, ОАО "УкрНИИхиммаш", г. Харьков, Украина

РАСЧЕТ ПЛОСКИХ КРЫШЕК С ДОПУСКОМ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

Запропонована методика розрахунку плоских круглих днищ. Методика базується на деформаційній теорії пластичності, що дозволило повніше використати резерви міцності металу порівняно із застосуванням в нормативній документації методом граничної рівноваги. Подані приклади розрахунків, що показали ефективність запропонованої методики.

Предложена методика расчета плоских круглых днищ. Методика базируется на деформационной теории пластичности, что позволило более полно использовать резервы прочности металла по сравнению с использованным в нормативной документации методом предельного равновесия. Приведены примеры расчетов, которые доказали эффективность предложенной методики.

The method of calculating the flat round bottoms. The method is based on the deformation theory of plasticity, allowing fuller use of reserve strength of the metal, as used in the regulations limit equilibrium method. Examples of calculation, which showed the effectiveness of the proposed method.

Расчет плоских крышек сосудов и аппаратов производится в соответствии с ГОСТ [1].

Концепция расчета крышек осталась неизменной и в ГОСТ [2] и распространяется на ряд конструкций (рис. 1 рис. 2).

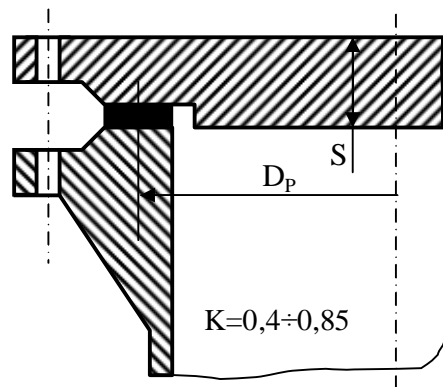


Рис. 1. Плоские круглые крышки с дополнительным краевым моментом.

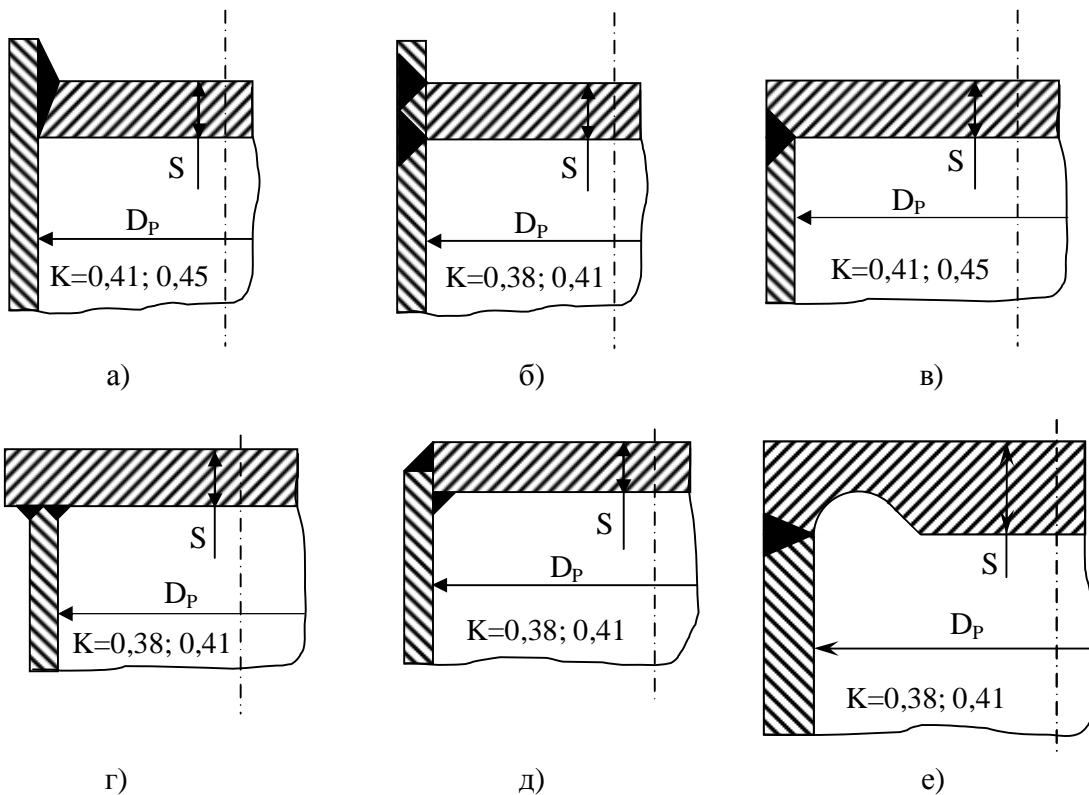


Рис. 2. Типовые конструкции сварных плоских днищ

Расчетные зависимости, приведенные в ГОСТ [1], базируются на теории предельного пластического течения, что не позволяет достаточно полно использовать резервы прочности металла. Основываясь на деформационной теории пластичности, получено решение [3], которое дает возможность построить расчетные зависимости, позволяющие более глубоко выявить несущую способность конструкции, а также снизить ее материалоемкость.

В формулах (1, 4) приведены расчетные зависимости ГОСТ [1] для определения расчетной толщины и допустимого давления для крышки, а в формулах (2, 3, 5, 6) зависимости для определения этих величин, предложенные нами.

$$S_{1P} = KD_P \sqrt{\frac{p}{[\sigma]}} \quad (1)$$

$$S_{1P} = \max(S_\varepsilon, S_v) \quad (2)$$

$$\begin{cases} S_\varepsilon = \frac{D_P}{2} \sqrt{\frac{\Phi p}{A} \left(\frac{28 - 16\psi}{[\varepsilon]} \right)^{n/2}} \\ S_v = \frac{D_P}{2} \left(\frac{\Phi p}{A} \right)^{1/2n+2} (11 - 8\psi)^{n/2n+2} \end{cases} \quad (3)$$

В формулах (1, 4) приведены расчетные зависимости ГОСТ [1] для определения расчетной толщины и допустимого давления для крышки, а в формулах (2, 3, 5, 6) зависимости для определения этих величин, предложенные нами.

$$[p] = \left(\frac{S}{KD_P} \right)^2 [\sigma] \quad (4)$$

$$[p] = \min(p_\varepsilon, p_v) \quad (5)$$

$$\begin{cases} p_\varepsilon = \frac{A}{\Phi \gamma^{n+2}} \left(\frac{\gamma [\varepsilon]}{28 - 16\psi} \right)^n \\ p_v = \frac{A}{\Phi \gamma^{n+2} 6 \gamma (11 - 8\psi)} \left(\frac{1}{\gamma} \right)^n \end{cases} \quad (6)$$

В формулах (1-6): S_{IP} – расчетная толщина крышки; K – коэффициент зависящий от конструкции крышки (см. рис. 1, 2); p – давление среды; $[\sigma]$ – допускаемые напряжения для материала крышки; D_p – расчетный диаметр крышки; S_ϵ, p_ϵ – расчетная толщина и допускаемое давление для крышки, определенные из условий прочности; S_v, p_v – расчетная толщина и допускаемое давление для крышки, определенные из условий жесткости; ψ – коэффициент зависящий от конструкции крышки, определяется по формуле

$$\psi = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{2\hat{E}^2} - 2 \ln \left(\frac{1}{\sqrt{6K}} \right) - 3 \right\};$$

$\gamma = D_p/(2S)$ – податливость крышки; S – фактическая толщина крышки; Φ – определяется по графику на рис. 3 или по формуле

$$\Phi = \frac{\frac{n+1}{3^2} \int_0^1 yx dx + \frac{\psi}{8} y'(1)}{\frac{1}{\int_0^1 |e|^{\frac{n+1}{2}} x dx}} = \frac{\frac{n+1}{3^2} (n+2) (2,5 - 4\psi + 2\psi^2)}{\frac{1}{\int_0^1 |e|^{\frac{n+1}{2}} x dx}},$$

где функции y и e

$$y = 11 - 14x^2 + 3x^4 - 8\psi(1 - x^2)$$

$$e = \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 + \frac{1}{x} \frac{dy}{dx} \frac{d^2 y}{dx^2} + \left(\frac{1}{x} \frac{dy}{dx} \right)^2;$$

A и n – характеристики материала

$$n = 0,75 \frac{\ln \left(\frac{R_m}{R_e} \right)}{\ln \left(\frac{E \epsilon_p}{R_e} \right)}$$

$$A = R_e^{1-n} E^n,$$

где R_m , R_e , E , ε_p – предел прочности, предел текучести, модуль упругости и деформация при разрыве материала крышки.

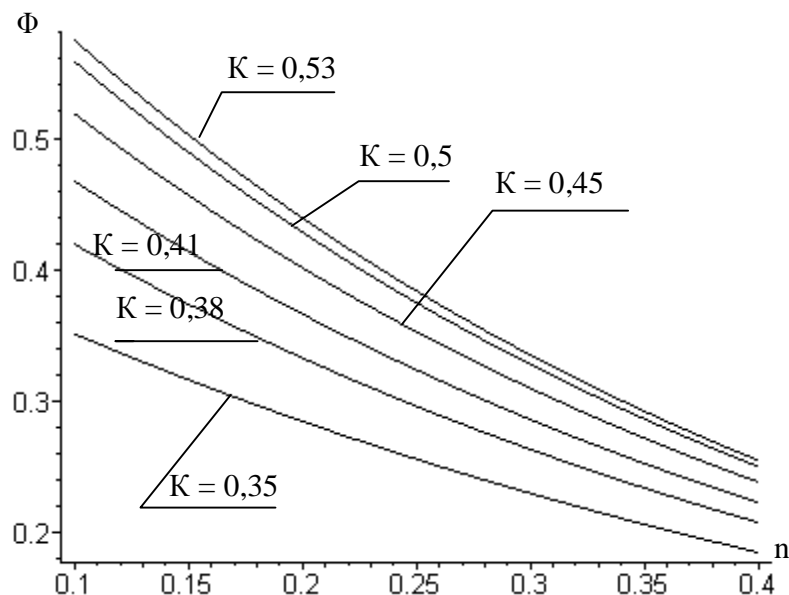


Рис. 3. Зависимость $\Phi(K, n)$.

Пример расчета.

Проиллюстрируем предложенную методику на примере оценки работоспособности днища холодильника воздуха, эксплуатируемого на АО «Черкасское химволокно».

Исходные данные: расчетное давление – $p = 2,0$ МПа; расчетная температура – 180 °С; толщина днища по результатам замеров – $S = 22,0$ мм; расчетный диаметр – $D_p = 414$ мм; материал днища – ВСт3; допускаемые напряжения – $[\sigma] = 128$ МПа [1]; $K = 0,45$ [1]; $A = 539,8$ МПа; $n = 0,18$; $[\varepsilon] = 1$ %.

Результаты расчета: по формулам (1, 4) $S_{IP} = 23,3$ мм, $[p] = 1,78$ МПа. Расчет по [1] показывает, что днище не удовлетворяет условиям прочности и должно быть отбраковано. По формулам (2, 5): $S_{IP} = 18,4$ мм, $[p] = 3,06$ МПа.

Расчет по деформационной теории показал, что днище имеет достаточные резервы прочности и может быть допущено к дальнейшей работе. Практика эксплуатации холодильника подтверждает сделанный вывод.

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. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность: ГОСТ Р 52857.2-2007. – [Дата введения 2008.04.01]. – М.: Стандартинформ, 2007. – 45 с. 3. Долинский В.М. О возможности продления ресурса теплообменных аппаратов с плоскими крышками при допуске ограниченных пластических деформаций

Поступила в редколлегию 25.03.10

УДК 696.41

Ю.Б. ДАНИЛОВ, докт. техн. наук, ОАО "УкрНИИхиммаш",
А.В. КОШЕЛЬНИК, канд. техн. наук,
Институт проблем машиностроения им. акад. А.Н. Подгорного, НАНУ,
А.Е. МОРОЗОВ, аспирант, НТУ «ХПИ», г. Харьков, Украина

ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИХ КОНСТРУКЦИЙ

В статті представлена історія виникнення пластинчастого теплообмінного устаткування, його розвитку і сфери застосування. Розглянуті потенційні перетини в міжпластинному просторі сітчасто-поточкового теплообмінника, які дозволяють знімати низькопотенційне тепло.

В статье представлена история возникновения пластинчатого теплообменного оборудования, его развития и области применения. Рассмотрены потенциальные сечения в межпластинном пространстве сетчато-поточного теплообменника, позволяющие снимать низкопотенциальное тепло.

In the article presented history of origin plate heat-exchange equipment, his development and application domain. Potential sections are considered in interhalf-moon space of reticulated-stream heat-exchange, allowing to take off a potential heat.

Пластинчатые теплообменные аппараты являются одной из новейших разновидностей поверхностных рекуперативных теплообменных аппаратов с поверхностью теплообмена, изготавливаемой из тонколистового проката.

Одним из полезных конструктивных признаков, по которым классифицируют пластинчатые теплообменники, является степень их разборности, то есть возможность доступа к поверхности теплообмена для осмотра, очистки и ремонта.

Как известно, пластинчатые теплообменники разделяются по исполнению на разборные, полуразборные и неразборные (сварные или формованные).

Наиболее широко применяются в промышленности (как наиболее универсальные) разборные теплообменники.

Они состоят из пакета пластин с прокладками и приспособлены, при необходимости для быстрой разборки и сборки.

Первые упоминания в литературе [1, 6] о принципах устройства пластинчатых теплообменных аппаратов для нагревания и охлаждения жидкостей в тонком слое и некоторые конструктивные решения были предложены Драхе (1878), Брейтвиш (1881) и Мальвезиным (1895).

В 1917 г. Гаррисоном предложена теплообменная пластина с четырьмя угловыми отверстиями и зигзагообразными каналами с обеих сторон.

Однако более широкое применение разработанных теплообменных аппаратов началось только после 1923 г. в результате усовершенствований, внесенных

Зелигманом, использовавшим при разработке конструкции разборного теплообменника идеи устройства рамного фильтр-пресса, в котором фильтровальные пластины имели фрезерованные каналы для потоков теплоносителей.

В 1932 – 1933 гг. в результате работ Фельдмейера и Зелингмана были предложены, а затем усовершенствованы штампованные пластины удлиненной формы с теплопередающей стенкой из тонкого волнистого листа.

Это была пластина нового типа, поверхность которой омывается потоком рабочей среды во всю ширину и позволяет повысить теплоотдачу по сравнению с трубчатыми в 2 ÷ 3 раза (при идентичных условиях работы).

Такие пластины можно считать прототипом современных, – в конструкциях которых теперь наблюдается большое разнообразие форм профилей рабочих поверхностей.

Преимущества пластинчатых теплообменников перед другими типами оказались весьма значительны, что дало возможность широко применять их в пищевой, химической, фармацевтической, гидролизной и металлургической

и других отраслях промышленности, а также на транспорте.

Последующий прогресс в совершенствовании конструкции пластин выразился в следующем:

- усовершенствовании профиля поверхностей пластин с целью повышения эффективности теплоотдачи и уменьшения гидравлических сопротивлений;

- повышении жесткости тонкой штампованной пластины и пакета в целом путем создания на поверхности элементов, обеспечивающих взаимную опору пластин по множеству равномерно распределенных точек контакта;

- повышение коррозионной стойкости и долговечности пластин и прокладок путем освоения штамповки из многих марок металлов и применения новых марок резин и иных прокладных материалов;

- повышение технологичности конструкций с последующим отказом от сварки и переходом на цельноштампованные конструкции из цельного листа;

Наиболее крупные фирмы, изготавливающие аппараты, размещены в Англии, Швеции, США, Германии, Франции, Японии, Италии и Дании.

На территории Советского Союза первые теплообменные пластинчатые теплообменники для пищевой промышленности были изготовлены в 1940 г. на Симферопольском машиностроительном заводе.

В 1939 г. Рамэн в Швеции предложил оригинальную конструкцию теплообменника, у которого гладкие пластины попарно сваривались, образуя плоские трубы.

Эти плоские трубы закреплялись в сварных трубных решетках и вставлялись в кожу с квадратным поперечным сечением.

Такой теплообменник называли ламельным (*lamelle* – пластина).

Эта конструкция теплообменника являлась переходной от кожухотрубчатого к пластинчатому.

Ламельные теплообменники нашли применение в целлюлозной промышленности, а также в химической и нефтехимической промышленности. Характерной особенностью конструкции является возможность механической очистки поверхности теплообменника только с наружной стороны пластин, для чего пучок пластин извлекают из кожуха.

В неразборных пластинчатых теплообменниках отдельные гофрированные пластины свариваются в блоки и получают две системы герметичных каналов для рабочих сред не дающих труднорастворимых загрязнений поверхности теплообменника, при использовании которых не требуется меха-

ническая очистка каналов, и можно ограничиться их промывкой с применением химических средств.

Промышленные пластинчатые теплообменники выпускают в США и Японии уже более 60 лет.

Первые их разработки были сделаны в Англии, Швеции, Германии и применены для охладителей и пастеризации молока.

За прошедшие годы наука и техника в области создания пластинчатых теплообменников [2, 3, 4] намного продвинулась вперед – от эмпирического к аналитическому и программному (в части расчетов) и от кустарного к высокотехнологичному производству.

Большой вклад в создание современных пластинчатых теплообменных аппаратов в мире внес концерн «Альфа-Лаваль» (Швеция), который и сегодня является лидером в этой области.

В СССР серийное производство пластинчатых теплообменников осуществлялось на заводе «Уралхиммаш» (в пятидесятые годы прошлого века) и высокотехнологическое специализированное производство в Украине на заводе «Павлоградхиммаш» (в шестидесятые годы прошлого века).

Научные и конструкторские разработки осуществляли Харьковский политехнический институт и Украинский научно-исследовательский и конструкторский институт химического машиностроения.

В процессе многолетних научных исследований пластинчатой теплообменной аппаратуры, как в мире, так и в Украине, построены полуэмпирические методы расчетов теплопередачи и гидросопротивлений, что позволило создать компьютерные программы оптимального конструирования и выбора энергоэкономичного оборудования.

Анализ показал [4, 5], что пластинчатые теплообменные аппараты с гофрированной поверхностью нагрева в виде прямолинейных наклонных каналов имеют значительно более высокую интенсивность теплоотдачи при тех же затратах энергии, чем трубчатые, спиральные и другие известные конструкции широкого промышленного применения.

Особо следует отметить эффективность и универсальность сетчатопоточных конструкций, представляющих собой, как известно, пакеты гофрированных пластин (иногда подобных печетным платам – при изготовлении, например, электрохимическим способом), имеющих прямолинейные наклонные каналы.

Этот вид конструкции (в аналитическом плане) интересен еще тем, что в

зависимости от значений конструктивных параметров он может представлять и характеризировать работу различных видов теплообменников.

Например, при:

- $\varphi_1 = \pi/2$, $\alpha_1 = \text{const}$ – ленточно-поточных теплообменников;

- $\varphi_1 = 0$, $\alpha_1 = 0$ – щелевых теплообменников с гладкими пластинами, ламельных и.т.п.;

- $\varphi_1 \neq 0$, $\varphi_1 \neq \pi/2$, $\alpha_1 = \text{const}$ – сетчато-поточных теплообменников и витых теплопередающих труб.

Здесь φ_1 – угол наклона гофры (канала) к продольной оси пластины; α_1 – угол наклона боковой стенки гофры к полости пластины.

В трубчатых и плоских щелевых каналах поток характеризуется одномерным движением, в ленточно-поточных двумерным – (в виде извилистой плоской ленты), в сетчато-поточном – трехмерным, – при котором поток обтекает по винтовым извилистым линиям опорные точки соприкасающихся вершинами гофр двух пластин.

Межпластинная полость образуется парой унифицированных пластин.

Продольные ряды точек контакта вершин гофр образуют границы элементарных каналов, в пределах которых, по условиям симметрии, движется теплоноситель.

Траектории движения потоков теплоносителя внутри этих каналов представляют собой винтовые линии, особенностями которых являются попеременные переходы теплоносителя (на продольных границах канала) с одной пластины на другую [3, 4].

Таким образом, рассматривая движение потока на участке прямолинейного наклона канала гофра одной из пластин в границах поступления на него теплоносителя, движение по гофру и схода на парную пластину у следующей границы симметрии потоков.

Продольных течений можно представить его в виде потенциального плоского потока, определяемого взаимодействием с источником и стоком, расположенными у границ рассматриваемого участка гофра.

Исследования позволили построить идентифицированную ячеечную структуру межпластинного пространства, образуемую контактирующими гофрами двух пластин, ограничивающих теплообменную полость.

Детальное изучение прочных поверхностей каждой ячейки и структур потоков, которые они образуют при течении жидкости, позволило привлечь к решению задач теорию потенциальных плоских течений.

Использование метода наложения известных потенциальных потоков: поступательного, плоско-параллельного, источника и стока позволило получить решение уравнение Лапласа, определяющее потенциал скоростей.

Функцию тока, абсолютное значение вектора скорости и его направление в любой точке скоростного поля проточной части ячейки, что, в свою очередь, при решении обратной задачи дает возможность сформировать поле скоростей под любую, заданную конструктором форму ячейки (что в особенности важно при вариационном машинном проектировании удобообтекаемых энергосберегающих теплопередающих поверхностей пластин).

Дальнейшее развитие метода позволяет производить расчеты теплоотдачи и гидросопротивлений, определяющее теплоэнергетическое совершенство конструкции.

Установлено что:

- вынужденное течение жидкости в межпластинном сетчато-поточном пространстве осуществляется в форме ряда продольных двухзаходных винтовых потоков, со взаимной подкруткой течений по разнонаправленным проточным частям ячейки;

- имеет место концептуальная общность полученных теоретических и инженерных решений гидродинамики и теплообмена сетчато-поточных пластинчатых теплообменников (с расчетами и конструированием трубчатых, лямельных, ленточно-поточных пластинчатых, щелевых с гладкими греющими поверхностями), являющихся частными случаями полученного общего решения при подстановке значений соответствующих конструктивных параметров;

- полученные теоретические и инженерные решения и теплообменники, апробированы в промышленности рекомендованы для изготовления;

- для увеличения среднего коэффициента теплоотдачи необходимо чтобы на распределительном участке сопротивление движению жидкости, как вдоль пластины, чего возможно достичь уменьшением угла ϕ_1 , и разрежением расположения гофр;

- радиус скругления гофры при вершине должен быть, по возможности максимально большим (из условия устойчивости формы пластины).

В настоящее время ведущими в Украине по научным и конструкторским разработкам является НТУ «ХПИ» и ОАО УкрНИИхиммаш, а по серийному и индивидуальному производству пластинчатого теплообменного оборудования ОАО «Павлоградхиммаш».

Изготавливается [6] широкая номенклатура пластинчатых теплообменников для химической, нефтегазоперерабатывающей и других отраслей промышленности, предназначенной для параметров и условий эксплуатации:

1. по давлениям:

- разборные – до 2,5 МПа;
- полуразборные – до 1,6 МПа;
- неразборные (сварные) – до 4,0 МПа.

2. по температурам:

- разборные – от – 20 до + 200 °С;
- полуразборные – от – 20 до + 200 °С;
- неразборные (сварные) – от – 100 до + 300 °С.

Список литературы: 1. Барановский Н.В. Пластинчатые и спиральные теплообменники / Н.В. Барановский, Л.М. Коваленко, А.Р. Ястребенецкий. – М.: Машгиз, 1973. – 285 с. 2. Товажнянский Л.Л. Пластинчатые теплообменники в промышленности / [Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин, О.П. Арсеньев]. – Харьков: НТУ ХПИ», 2004. – 232 с. 3. Товажнянский Л.Л. Гидросопротивления течению несжимаемой жидкости в межпластинной полости сетчатопоточного и пластинчатого теплообменника / [Л.Л. Товажнянский, Ю.Б. Данилов, Л.П. Перцев, А.Е. Морозов] // Интегровані технології та енергозбереження. – 2006. – № 3. – С. 36 – 42. 4. Товажнянский Л.Л. Теплоотдача несжимаемой вязкой жидкости при течении в межпластинной полости сетчатопоточного пластинчатого теплообменника / [Л.Л. Товажнянский, Ю.Б. Данилов, Л.П. Перцев, А.Е. Морозов] // Интегровані технології та енергозбереження. – 2007. – № 1. – С. 25 – 34. 5. Перцев Л.П. Теплообменная аппаратура для химических производств / Л.П. Перцев, О.А. Коробчанский, Л.М. Коваленко // Химическое и нефтяное машиностроение. – 1967. – № 10. – С. 9 – 14. 6. Коваленко Л.М. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи / Л.М. Коваленко, А.Ф. Глушков. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 238 с.

Поступила в редколлегию 25.03.10

В.М. ДОЛИНСКИЙ, канд. техн. наук,

Л.Д. МИЩЕНКО, канд. техн. наук,

В.Г. ИВАНОВ, ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕАКЦИОННЫХ ТРУБ ПЕЧИ РИФОРМИНГА ОДЕССКОГО ПРИПОРТОВОГО ЗАВОДА

Виконаний розрахунково-теоретичний аналіз дозволив визначити розподіл напружень по довжині труби і намітити зразки, на яких були виконані і металографічні дослідження і випробування металу на тривалу міцність.

Проведені випробування дозволили прогнозувати тимчасову експлуатацію печі риформінгу протягом 2-х років.

Выполненный расчетно-теоретический анализ позволил определить распределение напряжений по длине трубы и наметить образцы, на которых были выполнены и металлографические исследования и испытания металла на длительную прочность.

Проведенные испытания позволили прогнозировать временную эксплуатацию печи риформинга течение 2-х лет.

The carried out calculations and theoretical analysis allowed to determine the stress distribution along the pipe and to identify the samples, which were implemented and metallographic studies and tests of metal on the long-term strength.

The tests allowed to predict the temporary operation reforming furnace for 2 years.

Трубы устанавливаются в двенадцати лирах по 42 шт. в каждой и подвешиваются на пружинах (рис. 1).

Трубы подвергаются давлению газа $P = 3,84$ МПа при этом температура стенки меняется вдоль длины трубы (x) по экспериментально определенной зависимости (рис. 2). Трубы отработали гарантированный ресурс – около 10^5 часов. Трубы изготовлены из сплава Манурит ХМ, химический состав и механические свойства приведены в таблице 1 и таблице 2.

Таблица 1

Химический состав

Содержание химических элементов, %									
C	S	P	Cr	Ni	Si	Mn	Nb	Mo	Cu
0,40 – 0,45	≤ 0,03	≤ 0,03	23,0 – 27,0	32,0 – 35,0	≤ 2,0	≤ 1,5	≤ 1,0	≤ 0,5	≤ 0,25

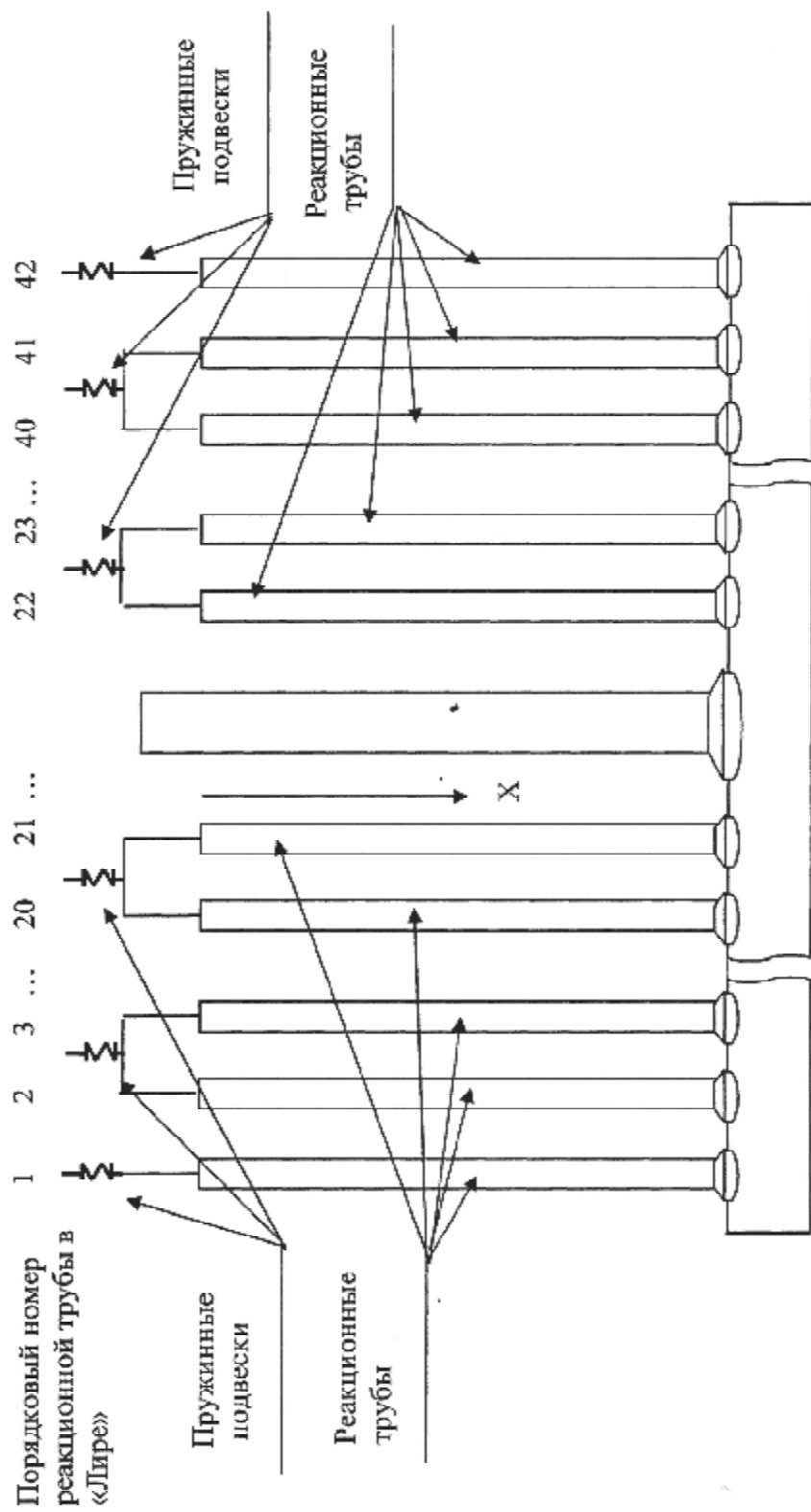


Рис. 1. Расположение реакционных труб в одной из «Лир»

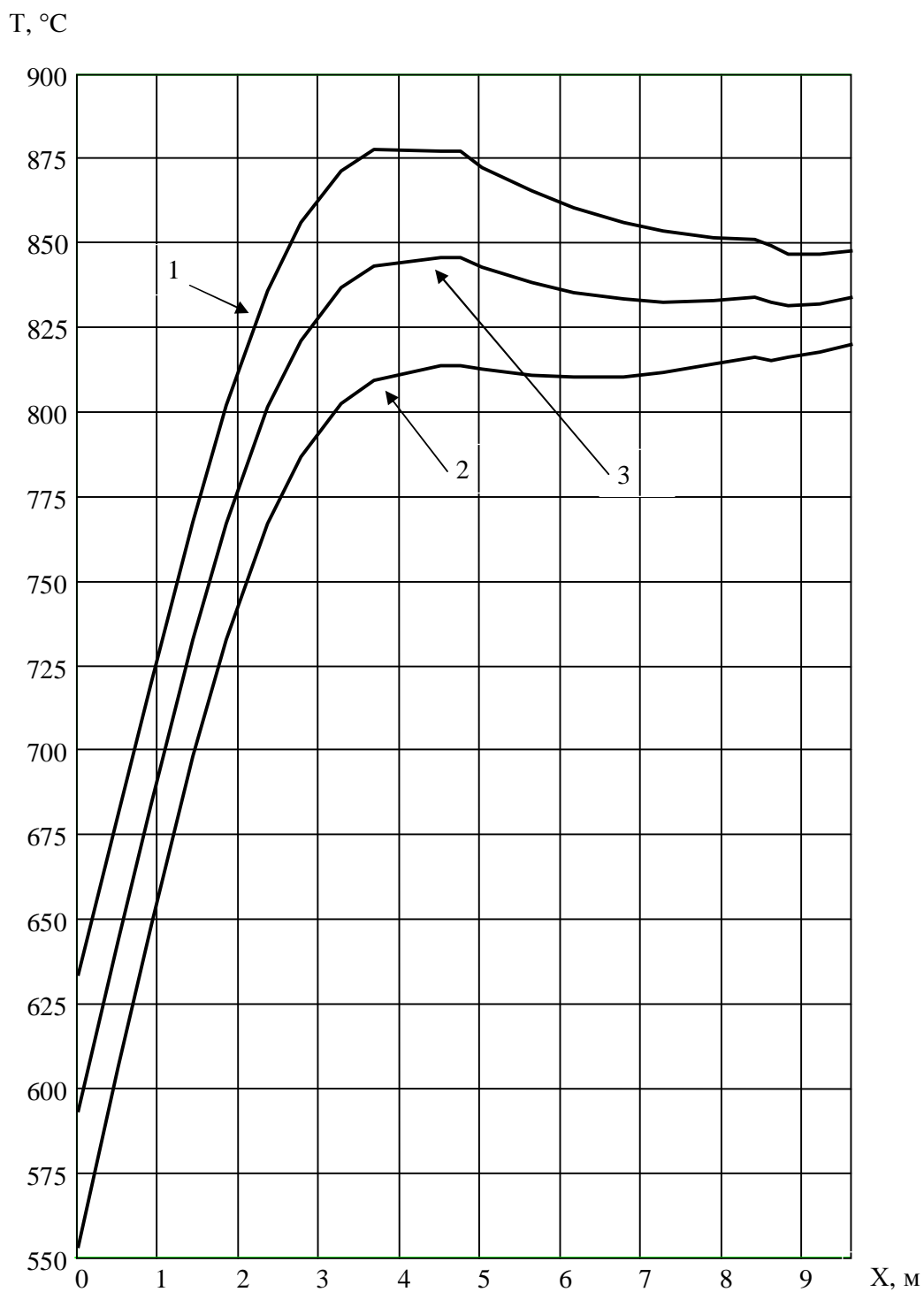


Рис. 2 Распределение температуры вдоль образующей на наружной (1), внутренней (2) поверхности реакционной трубы, средняя температура (3) по толщине трубы.

Результаты расчетного анализа позволили получить составляющие суммарных напряжений.

Механические свойства

Кратковременная прочность при 20 °С		Длительная прочность при 850 °С за 10 ⁴ час, МПа	
R _m , МПа	R _{0,2} , МПа	минимальная	Средняя
≥ 450	≥ 250	44,7	52,6

Напряжения от давления среды на внутренней поверхности:

$$S_{\theta p} = P \cdot \frac{r_6^2}{r_n^2 - r_6^2} \cdot \left[1 + \left(\frac{r_n}{r} \right)^2 \right]; \quad \sigma_{\theta p} = 10,4 \text{ МПа},$$

$$S_{rp} = P \cdot \frac{r_6^2}{r_n^2 - r_6^2} \cdot \left(1 - \frac{r_n^2}{r^2} \right); \quad \sigma_{rp} = -3,84 \text{ МПа},$$

$$S_{xp} = P \cdot \frac{r_6^2}{r_n^2 - r_6^2}; \quad \sigma_z = 3,4 \text{ МПа},$$

где: $\sigma_{\theta p}$, σ_{rp} , σ_{xp} – окружные, радиальные и осевые напряжения от давления среды; r_n , r_6 = 54 мм, 37 мм – наружный и внутренний радиусы трубы; r – текущий радиус трубы; P = 3,84 МПа – внутреннее давление среды.

Напряжения от теплоперепада по толщине [1].

$$\sigma_{\theta t} = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta t}{2 \cdot (1 - \mu) \cdot \ln \frac{r_n}{r_6}} \cdot \left[1 - \ln \frac{r_n}{r} - \frac{r_6^2}{r_n^2 - r_6^2} \cdot \left(1 - \frac{r_n^2}{r^2} \right) \cdot \ln \frac{r_n}{r_6} \right],$$

$$\sigma_{rt} = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta t}{2 \cdot (1 - \mu) \cdot \ln \frac{r_n}{r_6}} \cdot \left[\ln \frac{r_n}{r} + \frac{r_6^2}{r_n^2 - r_6^2} \cdot \left(1 - \frac{r_n^2}{r^2} \right) \cdot \ln \frac{r_n}{r_6} \right],$$

$$\sigma_{zt} = \frac{E \cdot \alpha \cdot \Delta t}{2 \cdot (1 - \mu) \cdot \ln \frac{r_2}{r_1}} \cdot \left[1 - 2 \ln \frac{r_2}{r} - 2 \frac{r_6^2}{r_n^2 - r_6^2} \cdot \ln \frac{r_n}{r_6} \right],$$

где: E , μ – модуль упругости и коэффициент Пуассона; Δt – разность температур наружной и внутренней стенки трубы; α – коэффициент линейного расширения.

Значения напряжений приведены на рис. 3.

Решающий вклад в суммарные напряжения вносят температурные напряжения, которые в условиях ползучести заметно релаксируют, при этом их уровень может значительно снизиться [2].

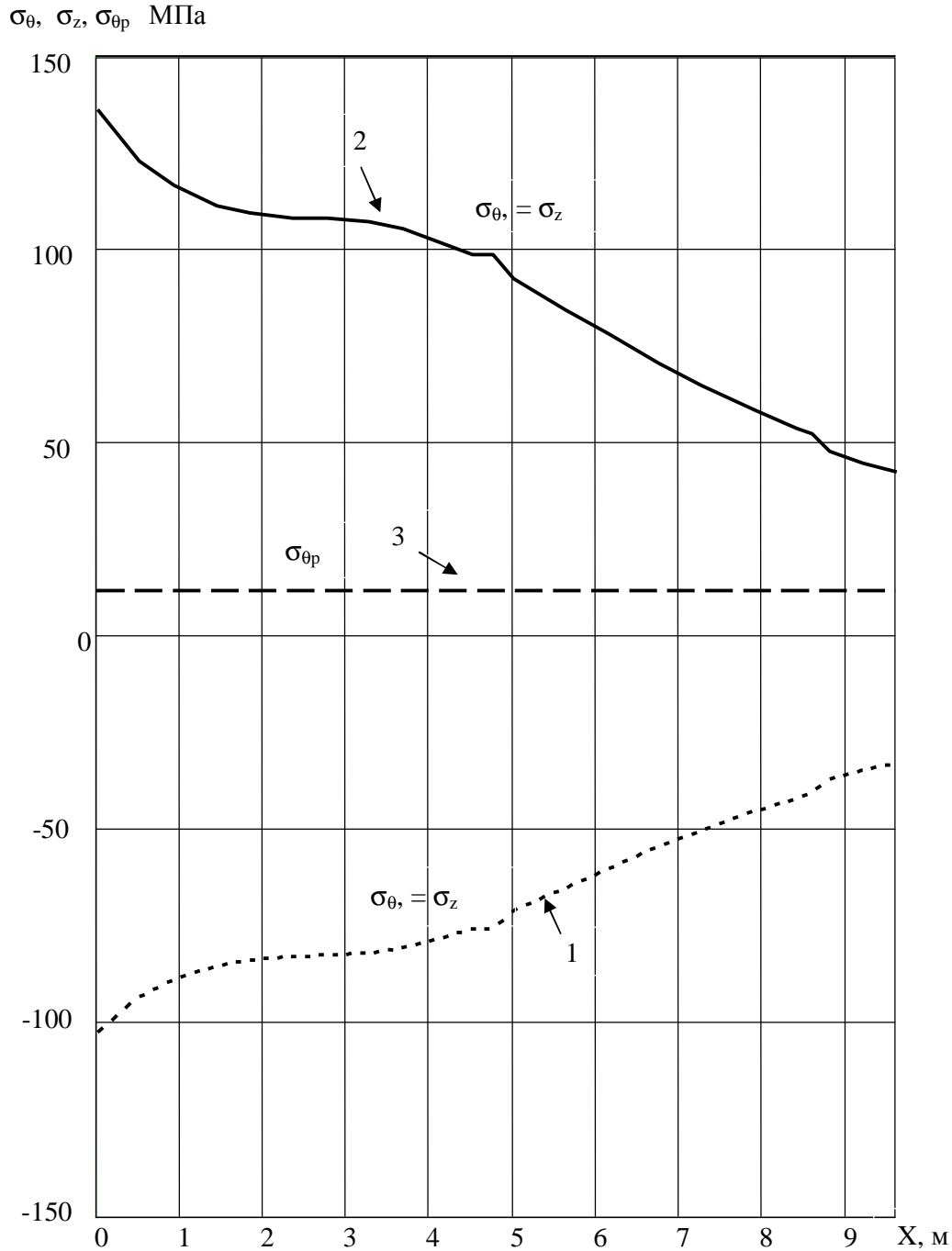


Рис. 3. Изменение кольцевых и осевых напряжений на наружной (1) и внутренней (2) поверхностях трубы от перепада температуры по толщине и от внутреннего давления (3)

Проведенные испытания на длительную прочность (рис. 4) дали относи-

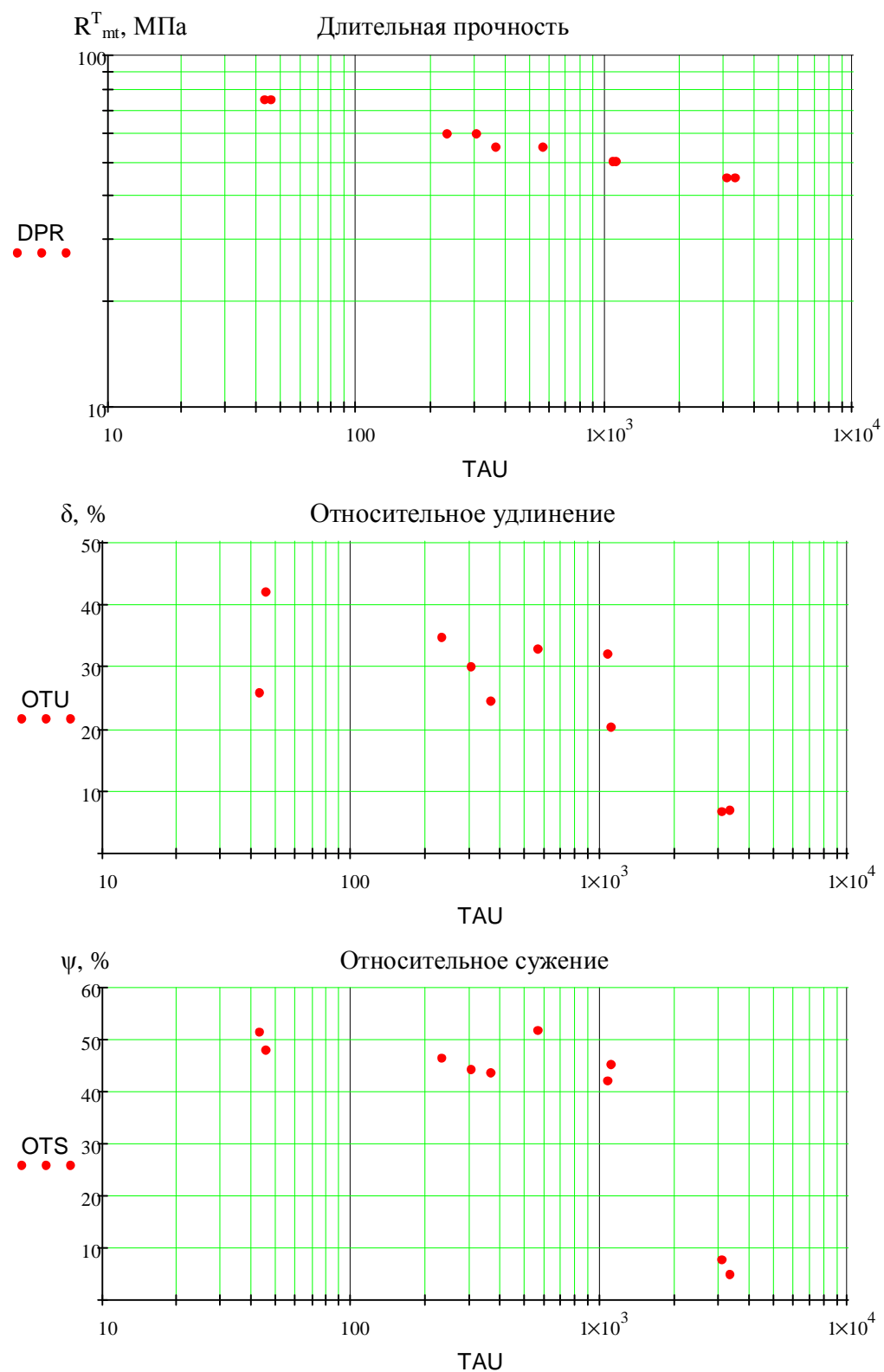


Рис. 4. Длительная прочность и длительная пластичность сплава Манурит ХМ при 850 °С

тельно высокие предварительные значения предела длительной прочности, однако уже при непродолжительных сроках испытания (порядка 3000 часов) проявилось резкое снижение пластичности металла.

При металлографических исследованиях были обнаружены микротрещины на внутренней поверхности трубы.

С учетом изложенного нами принято решение о возможности временной эксплуатации труб печи риформинга в течение двух лет с последующим анализом состояния и определением остаточного ресурса.

Список литературы: 1. Бояришинов С.В. Основы строительной механики машин / С.В. Бояришинов. – М.: Машиностроение, 1973. – 456 с. 2. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1968. – 400 с.

Поступила в редколлегию 25.03.10

УДК 620.16.001.24

В.М. ДОЛИНСКИЙ, канд. техн. наук,

В.И. ЧЕРЕМСКАЯ, ОАО «УкрНИИхиммаш», г.Харьков, Украина

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ СОСУДОВ, ОТРАБОТАВШИХ УСТАНОВЛЕННЫЙ РЕСУРС

Описані методи, що дозволяють оцінити роботоздатність посудин, які відпрацювали установлений ресурс та вміщують дефекти, що виникли і розвинулись в процесі експлуатації. Наведені приклади розрахунків посудин хімічних та нафтопереробних виробництв.

Описаны методы, позволяющие оценить работоспособность сосудов, отработавших установленный ресурс и содержащих дефекты, которые возникли и развились в процессе эксплуатации. Приведены примеры расчетов сосудов химических и нефтеперерабатывающих производств.

The methods are described, allowing to estimate serviceability of the vessels fulfilled the established resource and containing defects, arisen and developed while in service. Examples of calculations of vessels of chemical oil refining manufactures are resulted.

В соответствии с нормативными материалами [1, 2] продление ресурса требует обязательного расчета на прочность. В настоящее время отсутствует систематическая нормативная база по расчету на прочность оборудования,

отработавшего установленный ресурс. Имеющиеся нормативы не всегда применяются уместно, что приводит к появлению псевдокритериев работоспособности и к перебраковке работоспособных конструкций.

Существуют десятки псевдокритериев прочности, по которым «эксперты» Украины бракуют оборудование. Остановимся на некоторых из них.

Овальность обечайки не должна быть больше $1 \div 1,5 \%$.

Правила [3] устанавливают эту норму из соображений технологии изготовления и сборки. Неправильно распространять это требование на условия работоспособности конструкции.

Конечно отклонение от цилиндрической формы приводит к значительному изменению напряженного состояния овальной оболочки по сравнению с идеально круглой.

Однако, окончательный ответ может дать только расчет на прочность с учетом овальности обечайки.

Условная площадь дефекта сварного шва должна быть меньше предельной чувствительности некоей эталонной площади.

ГСТУ [4] устанавливает эту норму из соображений возможного качества сварки при соответствующем уровне производства.

Конечно принятые соображения никак не гарантируют работоспособность объекта.

Ответ на вопрос дает расчет на прочность сварных соединений с имеющимися дефектами. УкрНИИхиммаш выполнял расчеты сосудов, сварные соединения которых содержат «недопустимые дефекты».

Указанные сосуды успешно эксплуатируются два десятка лет на предприятиях химической и нефтеперерабатывающей промышленности.

Толщина стенки сосуда должна быть больше расчетной толщины.

Такое требование по [5] верно, если толщина стенки элемента сосуда примерно одинакова во всех точках.

Если же произошло локальное утонение в результате избирательной коррозии или эрозии, то вопрос о допустимости такого утонения решается специальными методами.

Рассмотрим детально некоторые специальные расчеты.

Овальная обечайка.

Предельное состояние конструкции наступит, когда образуются линии пластических шарниров в точках 1 и 2 (рис. 1).

Условие предельного состояния [6]:

$$(N_{1,2}/N_0)^2 + (M_{1,2}/M_0) = 1 \quad (1)$$

Условия равновесия:

$$N_1 = P \cdot a, \quad N_2 = P \cdot b, \quad M_2 = M_1 + P \cdot (a^2 + b^2)/2 - N_1 \cdot a \quad (2)$$

здесь $N_{1,2}$, $M_{1,2}$ – силы и изгибающие моменты; P – давление среды; N_0, M_0 – предельная сила и предельный момент:

$$N_0 = R_e \cdot S, \quad M_0 = R_e S^2/4, \quad (3)$$

где R_e – предел текучести; S – толщина стенки.

Решение системы уравнений (1), (2) с учетом (3) позволяет получить значения предельного давления (P_e) в функции овальности (δ) при различных параметрах оболочки (γ) (рис. 1):

$$P_{e0} = R_e/\gamma, \quad \gamma = D/(2 \cdot S), \quad \delta = 2 \cdot (D_{max} - D_{min}) / (D_{max} + D_{min}) \quad (4)$$

здесь P_{e0} – предельное давление для круглой обечайки; D_{max} , D_{min} , D – максимальный, минимальный и средний диаметры обечайки:

$$P/P_{e0} = [-\delta \cdot \gamma + (\delta^2 \cdot \gamma^2 + 1 + \delta^2/4)^{1/2}] / (1 + \delta^2/4) \quad (5)$$

Полученное решение показывает, что предельная нагрузка обечайки с ростом овальности падает и даже для допустимых овальностей 1 ÷ 1,5 % она снижается заметно.

Однако, дальнейший анализ показывает, что снижение предельной нагрузки при исходной овальности не уменьшает несущую способность обечайки в запредельной области, так данная конструкция имеет способность к геометрическому упрочнению – рихтовке.

На рис. 1 приведен пример, когда исходная конструкция имеет овальность 2 %.

Если рабочее давление в аппарате $P = 0,3 \cdot P_{e0}$ (рис. 1, точка 1), то обечайка ($\gamma = 50$) не деформируется.

Если рабочее давление $P = 0,6 \cdot P_{e0}$ (рис.1, точка 2), то обечайка ($\gamma = 50$) деформируется до нового равновесного состояния (рис. 1, точка 2¹).

При этом овальность уменьшается до 1,1 %, а несущая способность ее находится на требуемом уровне ($P = 0,6 \cdot P_{e0}$). Изменение овальности приводит к изменению радиусов кривизны в точках пластических шарниров.

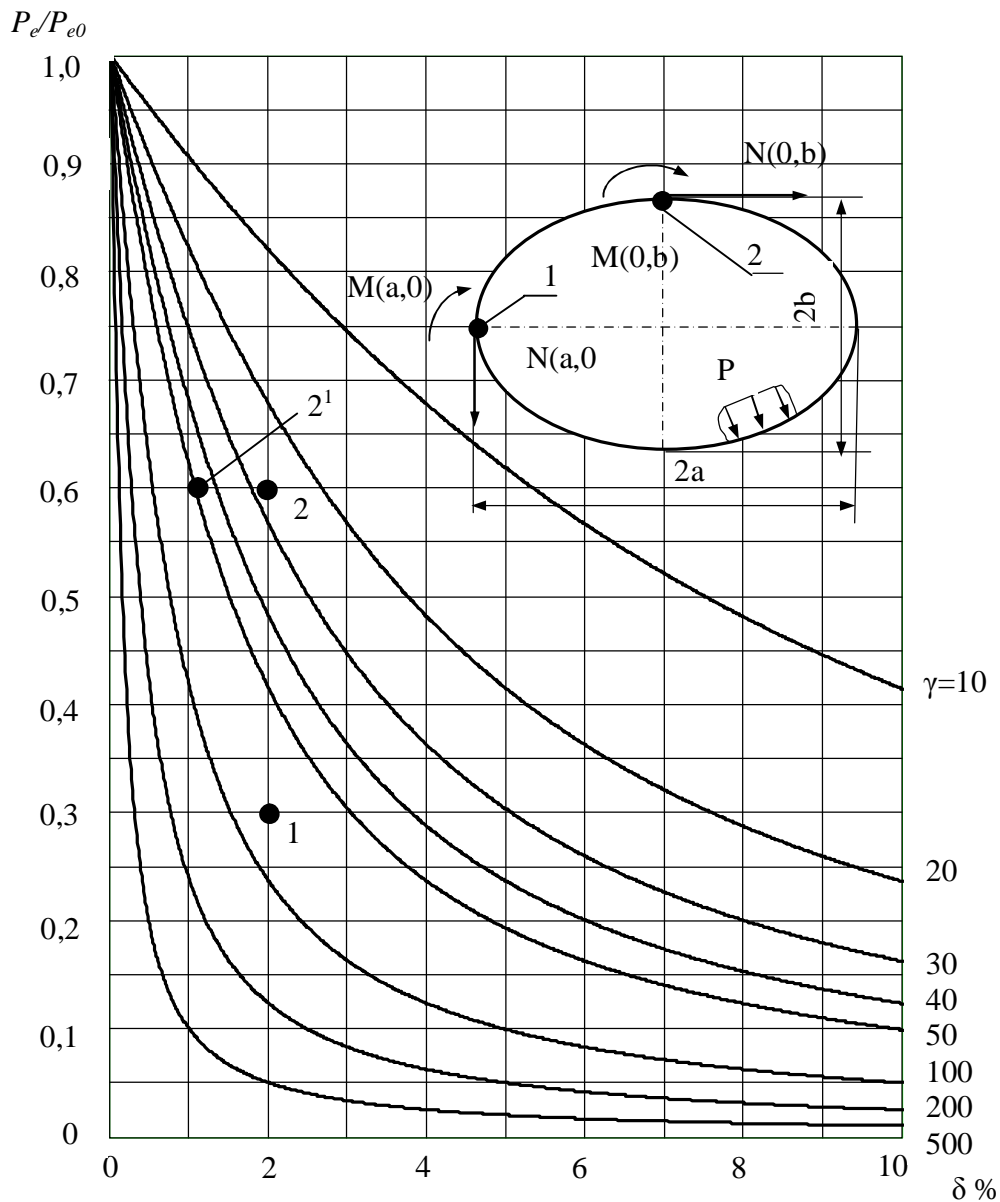


Рис. 1. Овальная обечайка

● – точки, соответствующие данным из примера расчета

Это следует учесть при определении циклической прочности. Размах напряжений при полной нагрузке составляет:

$$\sigma = (P/S) \cdot (D/2 + 6 \cdot \gamma \cdot b^2/S) \quad (6)$$

Значения коэффициентов $\gamma_l = \gamma_l(\delta)$ приведены в табл. 1, b – длина малой полуоси эллипса:

$$b = 0,5 \cdot D \cdot (1 - \delta/2) \quad (7)$$

Допускаемое число циклов нагружения $[N]$ определяют по [7] при амплитудных напряжениях $\sigma_A = \sigma/2$

Таблица 1

Коэффициенты $\gamma_l = \gamma_l(\delta)$

δ	γ_l	δ	γ_l	δ	γ_l
0	0	0,02	0,01024	0,07	0,03825
0,0025	0,00127	0,025	0,01291	0,08	0,04429
0,005	0,00251	0,03	0,01556	0,09	0,05043
0,0075	0,00379	0,04	0,02104	0,1	0,05679
0,01	0,00506	0,05	0,02662	–	–
0,015	0,00765	0,06	0,03236	–	–

В рассматриваемом примере $D=1000$ мм; $S = 10$ мм; $R_e = 250$ МПа; Ст. 3; $\gamma = 50$; $P_{e0} = 5,0$ МПа; $P = 0,6 \cdot P_{e0} = 3,0$ МПа; новое значение овальности $\delta = 0,011$ (рис. 1); $\gamma_l = 0,00558$ (табл. 1); $b = 497$ мм; $\sigma = 398$ МПа (формулы 6, 7); $[N] = 1,8 \cdot 10^4$ циклов [7].

Сосуд с вмятиной.

Если считать, что вмятина (рис. 2) вытянута вдоль образующей обечайки (консервативная оценка), то задача сводится к подобной задаче о предельном равновесии овальной обечайки.

Решение для предельных кривых представляется подобной зависимостью:

$$P_e/P_{e0} = [-A + (A^2 + 2 \cdot B)^{1/2}] / B \quad (8)$$

здесь

$$A = \eta \cdot (2 - \eta/\gamma); \quad B = \cos^2 \alpha + (1 - \eta/\gamma)^2; \quad \eta = h_0/S; \quad \gamma = (r/S) + 0,5 \quad (9)$$

При $P/P_{e0} > P_e/P_{e0}$ возможна рихтовка вмятины до глубины (h_0^*), определяемой по формуле:

$$h_0^* = \gamma \cdot S \cdot \{1 - [1 + A_1/B_1]^{1/2}\}, \quad (10)$$

где

$$\lambda_1 = P/P_{e0}; \quad A_1 = \lambda_1^2 \cdot (\cos^2 \alpha + 1) - 2; \quad \cos^2 \alpha = 1 - (L/2r)^2; \quad B_1 = \lambda_1 \cdot (2\gamma - \lambda_1) \quad (11)$$

На рис. 2 нанесены также результаты экспериментов, выполненных УкрНИИХиммашем при рихтовке сосудов внутренним давлением (P).

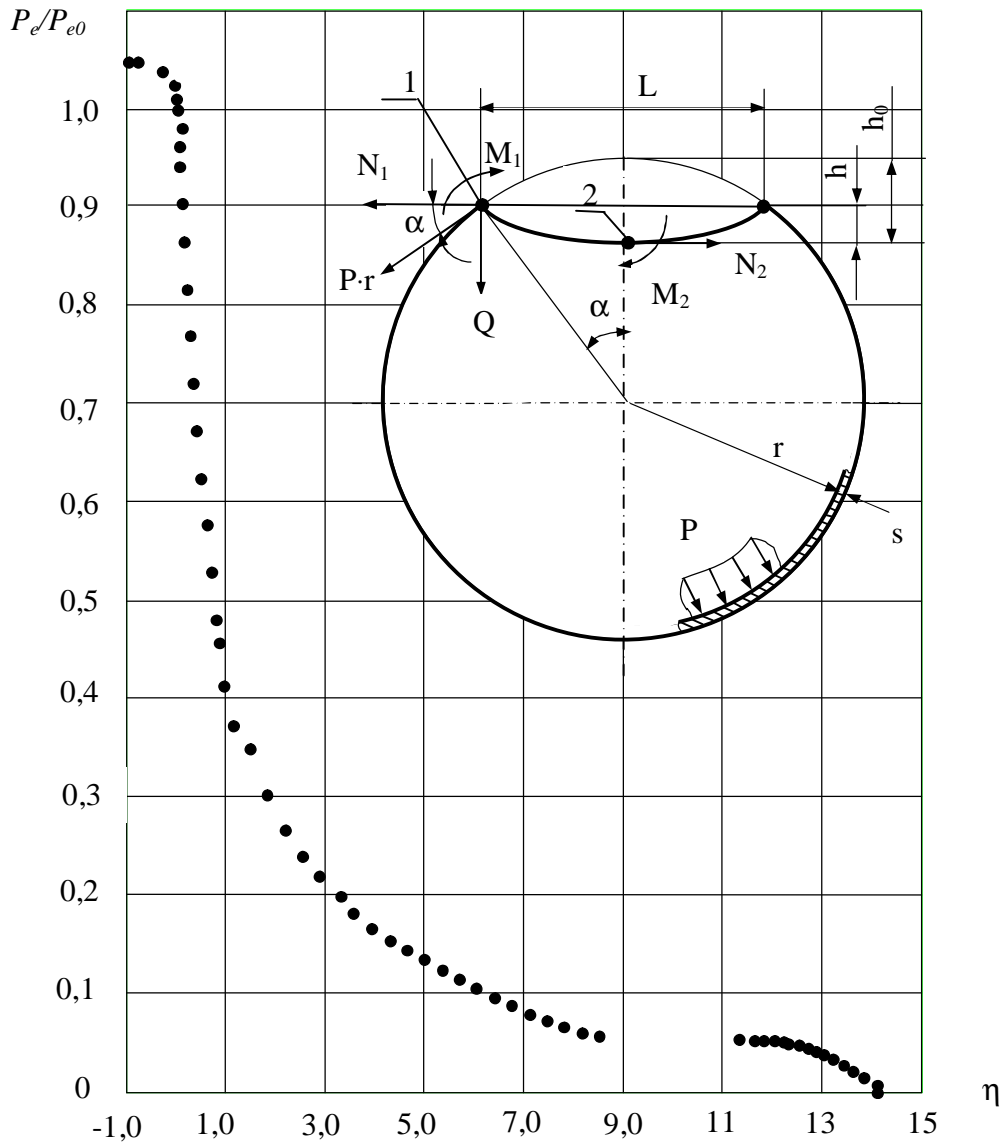


Рис. 2. Обечайка с вмятиной

— — теоретическая зависимость

● — экспериментальные точки

Результаты экспериментов удовлетворительно подтверждают теоретическую зависимость.

По описанной методике выполнены расчеты для ряда промышленных аппаратов.

Пример расчета обечайки колонны К-5, установленной на АО «Укртатнафта», имеющей вмятину глубиной $h_0 = 50,5$ мм и шириной $L = 1000$ мм (рис. 2).

Обечайка имеет такие исходные параметры: среда – нефтепродукты; расчетные параметры: давление $P = 0,2$ МПа; температура 360 °С; внутренний радиус $r = 2500$ мм; толщина стенки $S = 14,6$ мм; предел текучести материала $R_e = 206$ МПа; материал – сталь Ст. 3.

Результаты расчета (формулы 8 – 11): $P_{e0} = 1,2$; $\gamma = 172$; $\eta = 3,46$; $A = 6,85$; $B = 1,92$; $P_e/P_{e0} = 0,143$; $P/P_{e0} = 0,167$; при $P/P_{e0} > P_e/P_{e0}$; $0,167 > 0,143$ – возможна рихтовка вмятины до глубины $h_0^* = 43,0$ мм

Вмятина, как и следовало ожидать, не снижает несущую способность сосуда, однако следует проверить также малоцикловую прочность по [7].

Для этого необходимо выполнить расчеты с учетом измерений кривизны сосуда в местах вмятины

Локальное утонение стенки сосуда.

Локальное утонение стенки сосуда (рис. 3) появляется при местной эрозии, избирательной коррозии или при расслоении стенки при водородной и сероводородной коррозии.

Очевидно, что ослабленный участок обечайки потеряет несущую способность раньше остальной обечайки.

При этом ослабленный участок выпучивается, что приводит к перераспределению напряжений.

Происходят процессы упрочнения за счет местного увеличения кривизны оболочки и процессы разупрочнения за счет увеличения диаметра ослабленного места.

Показано, что геометрическое разупрочнение преобладает, если длина повреждения ($2l$) превышает диаметр сосуда.

В остальных случаях при допуске выпучивания (W) в пределах толщины стенки возможно упрочнение ослабленного участка.

Рассматривая предельное равновесие ослабленного участка с учетом предельного шестиугольника Треска-Сен-Венана, удалось получить предель-

ную зависимость:

$$\lambda \leq [\lambda] = \{[(1 - \theta)2 \cdot (2 - \theta) + \gamma \cdot (1 - \theta)] / 2 \cdot (1 - \theta + \gamma \cdot \theta)\} l / 2 \quad (12)$$

здесь

$$\lambda = l / (D \cdot S_p)^{1/2}; \quad \theta = (S_p - S_l) / S_p; \quad \gamma = D / (2 \cdot S_p) \quad (13)$$

S_p – расчетная толщина стенки; α – угловая координата повреждения.

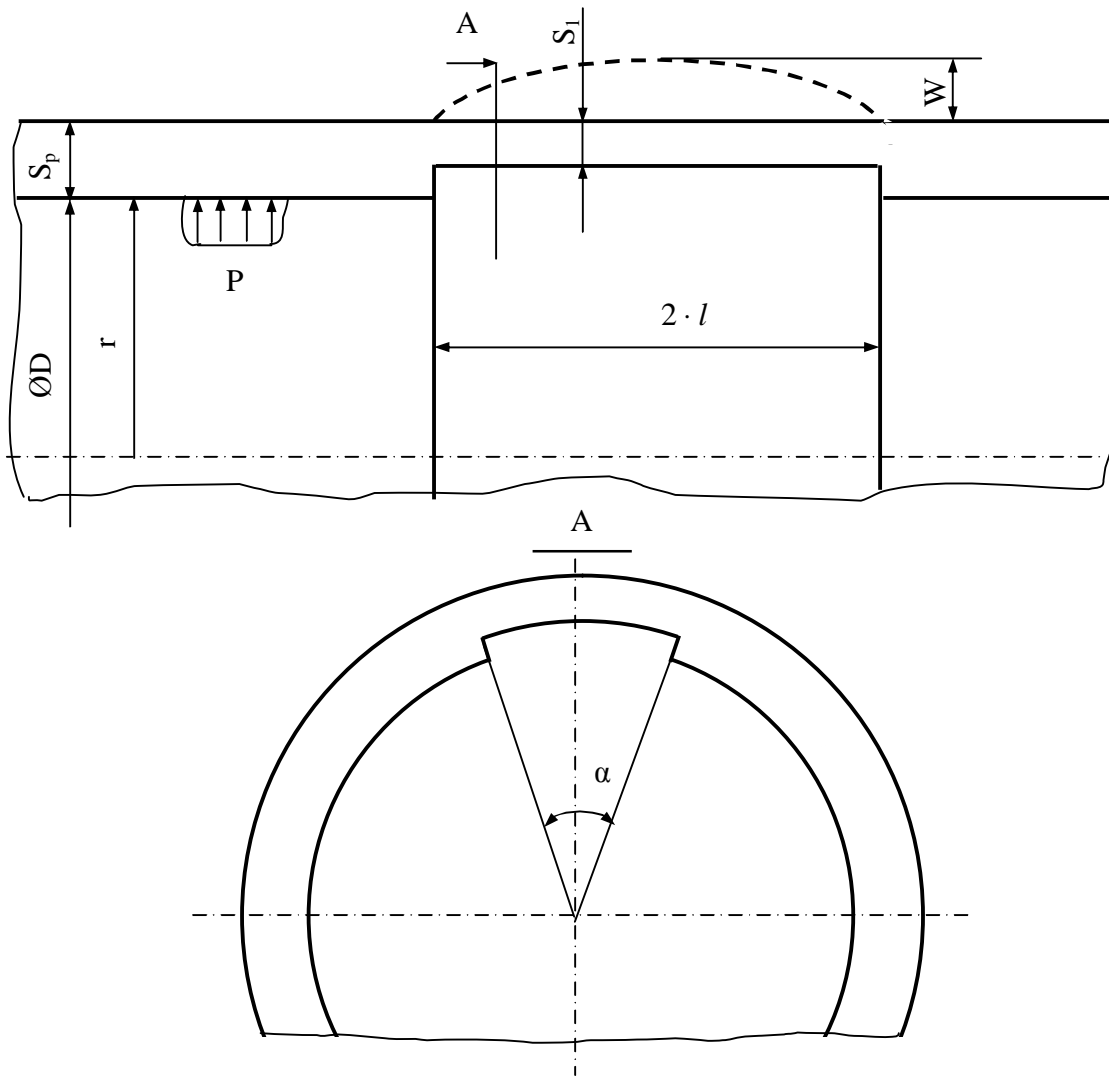


Рис. 3. Обечайка с поврежденной стенкой

Допускаемый угол повреждения $[\alpha]$ определяется из условия:

$$2 \cdot \cos\{([\alpha] \cdot \theta + \pi) / 4\} = \theta \cdot \sin\{[\alpha] / 2\} \quad (14)$$

Полученные зависимости представлены на рис. 4, где пунктирной линией показана эмпирическая кривая [8], полученная при обработке 260 лабораторных и промышленных испытаний труб с параметром (γ) в пределах от 4,5 до 70.

Полученные результаты достаточно хорошо совпадают.

Отличие наблюдается при больших значениях (γ), характерных для обечаек сосудов.

Далее приведены расчеты двух промышленных аппаратов.

Пример № 1.

Ресивер аммиака поз. D-4С установлен на Одесском припортовом заводе.

Исходные данные: среда – аммиак; расчетные параметры: $P = 2,0$ МПа; $t = 51,7$ °С; материал – сталь SA516Gr70 (отечественный аналог – сталь 30); $D = 1524$ мм; $S_p = 13,0$ мм; $2l = 150$ мм; $S_1 = 11,2$ мм; $\alpha = 37,6$ град (рис. 3) .

Результаты расчета.

Параметры: $\gamma = 58,6$; $\lambda = 0,533$; $\theta = 0,138$; $[\lambda] = 1,70$; $[\alpha] = 360$ град; $\lambda < [\lambda]$, $0,533 < 1,70$; $\alpha < [\alpha]$; $37,6$ град < 360 град – рассматриваемый дефект является допусковым.

Пример №2.

Холодильник X-401, установлен на АО «Укртатнафта».

Исходные данные: среда фракция пентана; расчетные параметры: $P = 3,3$ МПа; $t = 100$ °С; материал – сталь 16ГС; $D = 500$ мм; $S_p = 5,7$ мм; $2l = 780$ мм; $S_1 = 4,4$ мм; $\alpha = 68,8$ град (рис. 3)

Результаты расчета.

Параметры: $\gamma = 43,9$; $\lambda = 7,3$; $\theta = 0,228$; $[\lambda] = 1,27$; $[\alpha] = 360$ град; $\alpha < [\alpha]$; $68,8$ град < 360 град; $\lambda > [\lambda]$, $7,3 > 1,27$ – рассматриваемый дефект является недопусковым.

На рис. 4 нанесены результаты расчета двух промышленных аппаратов (примеры № 1, № 2).

Каждый из сосудов характеризуется отрезком прямой.

Если отрезок лежит внутри области, ограниченной кривыми $[\lambda](\theta)$, $[\alpha](\theta)$, то дефект является допусковым (пример № 1), в противном случае дефект является недопусковым, требуется ремонт (пример № 2).

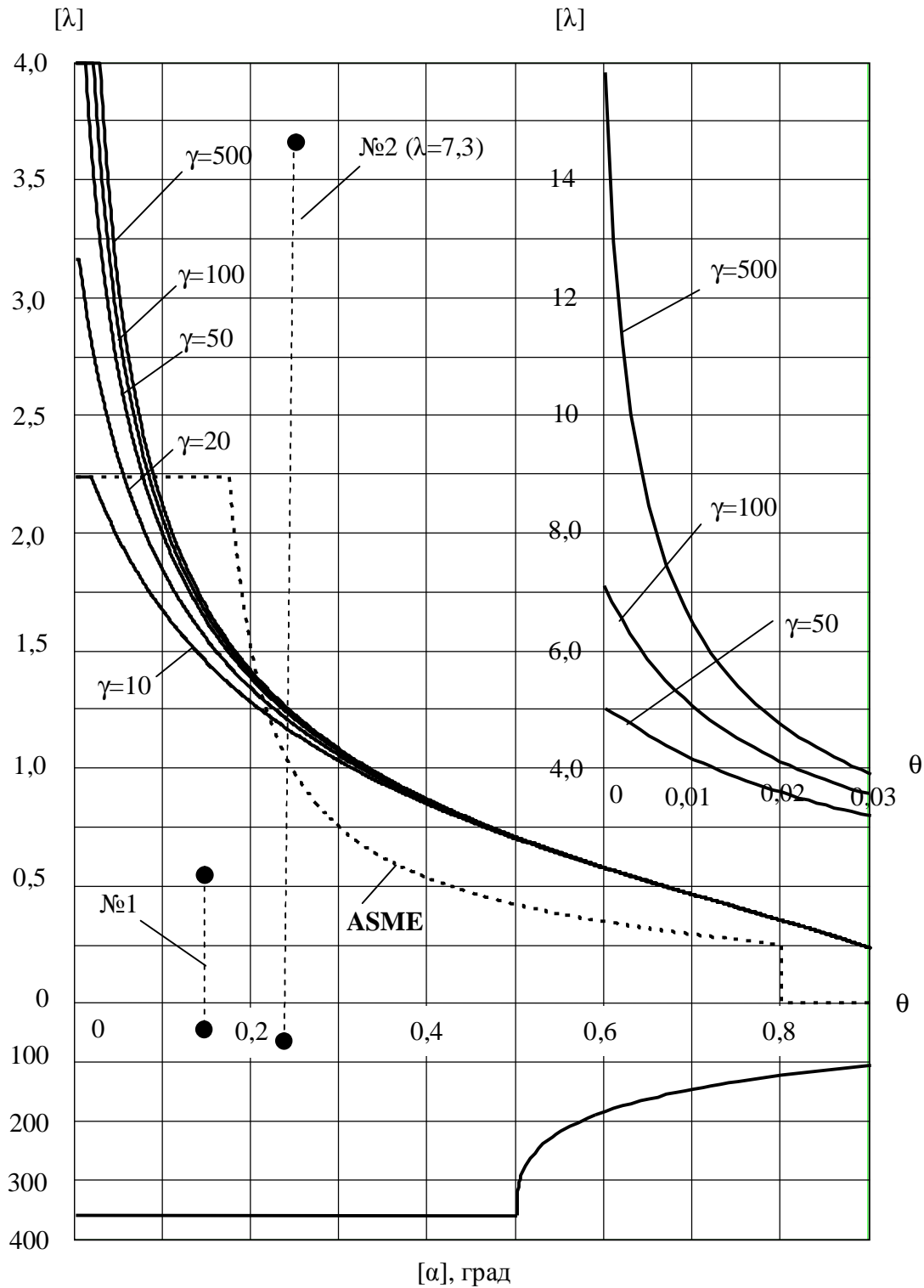
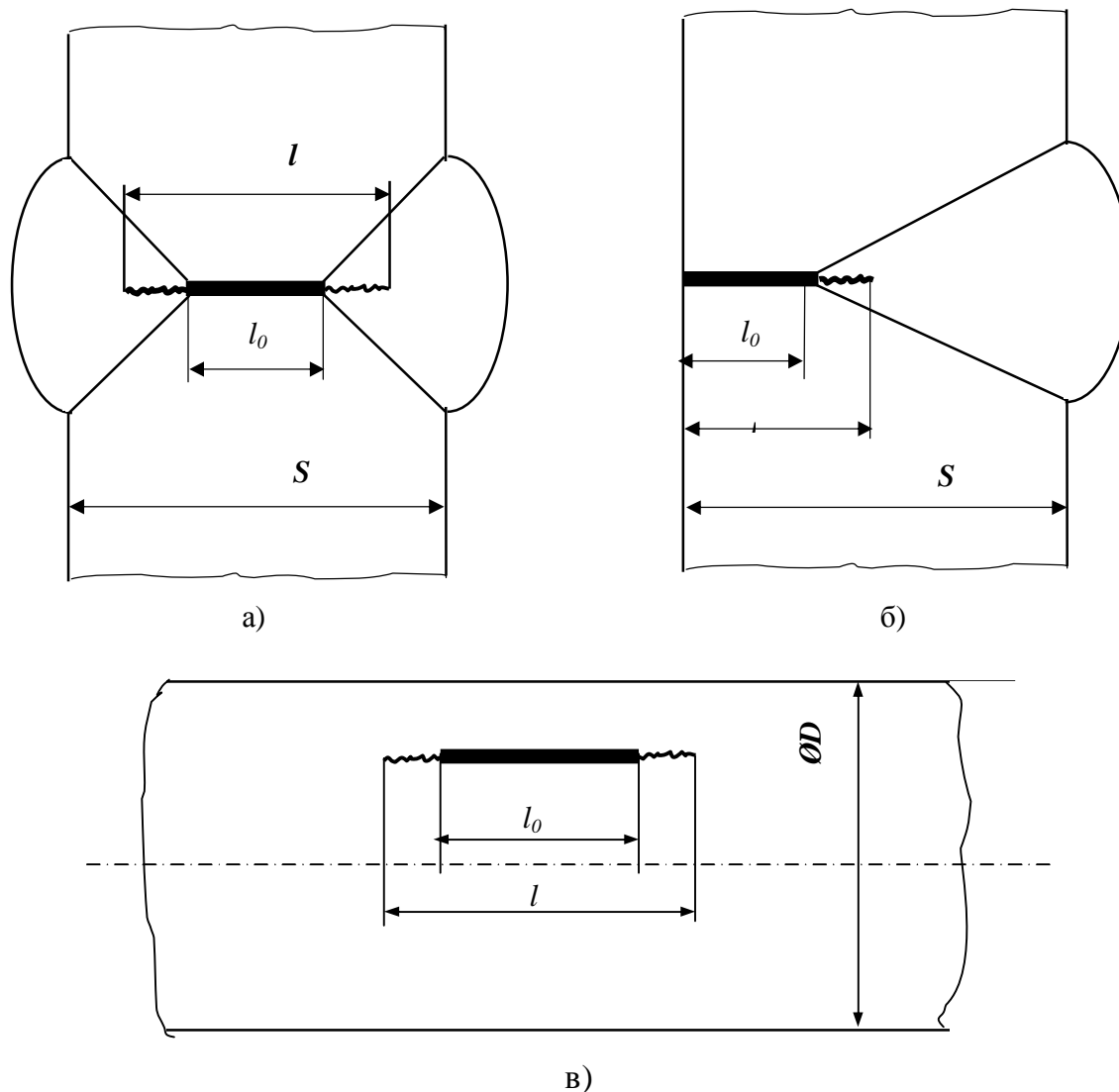


Рис. 4. Допускаемые параметры повреждения стенки сосуда:
 – зависимость ОАО «УкрНИИХиммаш»; – зависимость ASME

Трещины и трещиноподобные дефекты.

Непровары и несплавления являются типовыми примерами трещиноподобных дефектов. В редких случаях встречается необходимость эксплуатации сосудов и трубопроводов со сквозными дефектами. Основные случаи возможных дефектов представлены на рис. 5.



а)

б)

в)

Рис. 5. Дефекты:

а) внутренний непровар; б) поверхностная трещина;

в) сквозная трещина вдоль образующей обечайки.

Расчеты конструкций с трещинами выполняются с применением механики разрушения [9]. При этом возможны различные механизмы разрушения: хрупкий, вязкий и квазихрупкий. Случай сквозной трещины предусмат-

ривает хрупкое или квазихрупкое разрушения – в этом случае применима линейная механика разрушения.

В случаях непровара возможны как хрупкий так и вязкий механизмы разрушения.

В последнем случае необходимо пользоваться нелинейной механикой разрушения.

Воспользовавшись критерием Ирвина-Орована можно установить область вязкого разрушения:

$$S < \beta \cdot \{K_{Ic}(K_{Isc}/R_e)\}^2 \quad (14)$$

здесь K_{Ic} , K_{Isc} – вязкость разрушения в нейтральной и агрессивных средах; β – параметр зоны пластичности.

Если ограничиться нейтральной средой, то для основных ходовых сталей можно установить предельные значения, при которых разрушение будет вязким (табл. 2).

Таблица 2

Предельные значения толщин

Марка стали	Ст3	09Г2С	12Х18Н10Т
K_{Ic} , МПа·м ^{1/2}	36,5÷48,5	45,6÷48,3	30,0÷40,3
R_e , МПа	264	355	280
β	2,5	2,5	5,0
S , мм	47,9÷84,4	41,3÷46,3	57,5÷104

Расчеты в рамках линейной теории разрушения.

Статическая прочность определяется условием:

$$K \leq K_{Ic}(K_{Isc}) / [n_k] \quad (15)$$

здесь K – коэффициент интенсивности напряжений (*КИН*); $[n_k]$ – допустимый запас трещиностойкости.

КИН определяют по формуле:

$$K = Y \cdot \sigma_n \cdot (\pi \cdot l) \quad (16)$$

здесь σ_n – номинальные нормальные напряжения; l – линейный размер тре-

щины; Y – фактор формы, определяется геометрией конструкции и положением трещины.

Значения Y для трех, указанных на рис. 5 случаев следующие:

- внутренний непровар (рис. 5 а)

$$Y = \{ [S/(\pi \cdot l)] \cdot \operatorname{tg}[\pi \cdot l / (2 \cdot S)] \}^{1/2} \quad (17)$$

- поверхностная трещина (рис. 5 б)

$$Y = [1,11 + 5 \cdot (l/S)^4] / (1 - l/S) \quad (18)$$

- сквозная трещина вдоль образующей обечайки (рис. 5 в)

$$Y = \{ 1/2 + 1,61 \cdot l^2 / (4 \cdot D \cdot S) \}^{1/2} \quad (19)$$

Скорость роста трещины:

$$dl/dN = C \cdot (\Delta K)^m \quad (20)$$

здесь l – длина трещины; N – число циклов нагружения; ΔK – размах K_{IIN} ; C и m – параметры Париса.

В рамках нелинейной теории разрушения статическая прочность определяется условием:

$$\sigma \leq R_m / [n_m] \quad (21)$$

здесь R_m – предел прочности; $[n_m]$ – допустимый запас прочности.

Скорость роста трещины в этом случае определена в результате обработки большого числа экспериментальных исследований УкрНИИхиммаша на ходовых сталях и представляется зависимостью:

$$dl/dN = A \cdot (\Delta \sigma - \sigma_0)^2 \quad (22)$$

здесь σ_0 – пороговое напряжение, ниже которого трещина не растет; $\Delta \sigma$ – размах напряжений; A – параметр, представленный в табл. 3

Значения скорости могут быть также получены из табл. 4 в зависимости от напряжений в ослабленном сечении и с учетом коэффициентов стеснения

деформаций (K_{Σ}) и температурного коэффициента (K_t):

$$K_{\Sigma} = 1 + (1 - \mu^2)^{-m/2}; \quad K_t = 1 + (t - 20)/330 \quad (23)$$

здесь $\mu \leq 0,5$ – коэффициент Пуассона; t – расчетная температура.

По предложенной методике выполнены расчеты аппаратов.

Таблица 3

Параметры A и σ_0

Марка стали	Трещина внутренняя		Трещина краевая	
	$A, \text{мм} \cdot \text{МПа}^2/\text{цикл}$	$\sigma_0, \text{МПа}$	$A, \text{мм} \cdot \text{МПа}^2/\text{цикл}$	$\sigma_0, \text{МПа}$
Ст3	$0,176 \cdot 10^{-7}$	75	$0,675 \cdot 10^{-7}$	60
09Г2С	$0,242 \cdot 10^{-7}$	90	$0,692 \cdot 10^{-7}$	45
12Х18Н10Т	$0,608 \cdot 10^{-7}$	70	$0,722 \cdot 10^{-7}$	30

Таблица 4

Скорость роста трещины $10^3 \cdot V, \text{мм}/\text{цикл}$

$\sigma, \text{МПа}$	Трещина внутренняя			Трещина краевая		
	Материал – сталь			Материал – сталь		
	Ст3	12Х18Н10Т	09Г2С	Ст3	12Х18Н10-Т	09Г2С
450÷400	9,3	28,1	9,36	–	–	–
400÷350	5,13	17,8	7,40	–	–	–
350÷300	3,66	15,2	4,70	17,9	21,4	19,3
300÷250	2,19	9,15	2,01	11,3	9,50	14,9
250÷200	1,12	3,06	1,25	8,37	7,30	10,3
200÷150	0,930	1,42	0,481	3,25	4,34	5,73
150÷ σ_0	0,465	0,356	0,295	1,12	3,03	2,14
$\leq \sigma_0$ (табл. 3)	0	0	0	0	0	0

Пример № 1.

Расчет на статическую прочность трубопровода Одесского припортового завода, имеющего сквозную трещину в осевом направлении длиной $l = 60$ мм.

Исходные данные: рабочая среда – конвертированный газ; расчетные параметры: $P = 3,04$ МПа; $t = 482$ °С; наружный диаметр трубы $D_n = 609,6$ мм; толщина стенки по результатам измерений $S_n = 12,3$ мм; прибавка на коррозию $C = 0,16$ мм; вязкость разрушения $K_{Ic} = 2,0$ кН/мм^{3/2}; коэф-

коэффициент запаса трещиностойкости $[n_k] = 1,75$; материал – сталь +Sa155GrCM70 (отечественный аналог – сталь 15ХМ).

Результаты расчета (формулы 15, 16, 19).

Прогноз возможного вида разрушения – возможно квазихрупкое разрушение.

$\sigma_n = 75,0$ МПа; $Y = 0,837$; $K = 0,862$ кН/мм^{3/2}; $[K_{Ic}] = 1,143$ кН/мм^{3/2}; $K < K_{Ic}$; $0,862$ кН/мм^{3/2} $< 1,143$ кН/мм^{3/2}; допускаемая длина трещины при $K = [K_{Ic}] = 1,143$ кН/мм^{3/2} не должна превышать величины $[l] = 83,3$ мм

Пример № 2.

Расчет на циклическую прочность обечайки маслоотделителя с внутренним непроваром ($l = 3,0$ мм) в продольном сварном шве.

Исходные данные: рабочая среда – пропан; расчетные параметры: давление $P = 2,5$ МПа; температура $t = 167$ °С; размах колебания давления $\Delta P = 2,5$ МПа; число нагружений в год $n = 4$; внутренний диаметр сосуда $D = 606$ мм; толщина стенки по результатам измерений $S_u = 10,6$ мм; прибавка на коррозию $C = 0,6$ мм; вязкость разрушения $K_{Ic} = 22,0$ МПа·м^{1/2}; предел текучести материала при нормальной температуре $R_e^{20} = 224$ МПа; временное сопротивление материала при расчетной температуре $R_m^t = 425$ МПа; материал – сталь Ст. 3; $\beta = 2,5$; назначенный срок службы $\tau_n = 6,0$ лет.

Результаты расчета.

$[S] = 24,1$ (формула 14); $S_u - C < [S]$; $10,0$ мм $< 24,1$ мм – возможно вязкое разрушение; $\sigma_n = 110$ МПа [5] – в сечении, ослабленном дефектом; скорость роста дефекта (табл. 4) – $V = 0,000465$ мм/цикл.

Приращение внутреннего дефекта в течении назначенного срока службы незначительно ($0,022$ мм); $\sigma_n < R_m^t$; 110 МПа < 425 МПа – условие циклической прочности выполнено.

Выводы.

На основании выполненных расчетов сотни аппаратов в химической и нефтеперерабатывающей промышленности успешно работают с так называемыми «недопустимыми» дефектами.

Постоянный периодический контроль показал практическую доброкачественность предложенной методики.

Описанные в данной статье методы могут быть применены для обоснованной оценки работоспособности сосудов с дефектами.

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.** 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.** Правила будови та безпечної експлуатації посудин, що працюють під тиском; НПАОП 0.00-1.07-94. – [Затверджено 18.10.94. №104]. – К.: Держнаглядохоронпраці, 1998. – 373 с. **4.** Посудини та апарати, що працюють під тиском. Методика ультразвукового контролю зварних з'єднань; ДСТУ 3-037-2003. – [Чинний від 2004-01-2001]. – К.: Мінпромполітики України, 2003. – 104 с. **5.** Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность; ГОСТ 14249-89. – [Дата введения 01.01.1990]. – Издательство стандартов, 1989. – 79 с. **6.** Прикладная теория пластичности и ползучести / *Н.Н. Малинин*. – М.: «Машиностроение», 1968. – 400 с. **7.** Сосуды и аппараты стальные. Нормы и методы расчета на прочность при малоцикловых нагрузках; ГОСТ 25859-83. – [Дата введения 01.07.1984]. – М.: Издательство стандартов, 1983. – 30 с. **8.** Инструкция для трубопроводов под давлением. Американский национальный стандарт. Руководство для определения остаточной прочности трубопроводов, подвергшихся коррозии; ASME B31G-1991. – Американское общество инженеров-механиков. **9.** Методика расчета сварных соединений сосудов, содержащих дефекты. – Харьков: ОАО «УкрНИИхиммаш», 2004.

Поступила в редколлегию 25.03.10

В.А. КАЧАНОВ, канд. хим. наук, **Ю.Б. ДАНИЛОВ**, докт. техн. наук,
Т.Э. ШЕПИЛЬ, **Т.А. БАЛАК**, **Е.К. ГВОЗДИКОВА**, **В.Ю. КОЗИН**,
Н.А. КОНДАКОВА, ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина

ПРИЧИНА РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТОГО РАЗБОРНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ИЗ СТАЛИ 316L В НАСЫЩЕННОМ РАСТВОРЕ МЭА БАГЛЕЙСКОГО КХЗ

В статті наведені результати дослідження причин руйнування пластичного теплообмінника із сталі 316L, який експлуатувався в насиченому розчині моноетаноламіну. Показано, що основною причиною руйнування є присутність в робочому середовищі сірководню, роданіду, форміату та інших домішок.

В статье приведены результаты исследования причин разрушения пластичного теплообменника из стали 316L, который эксплуатировался в насыщенном растворе моноэтаноламина. Показано, что основной причиной руйнування является присутствие в рабочей среде сероводорода, роданиду, формиат и других примесей.

The article presents the results of the causes of destruction of plastic exchanger steel 316L, which in yekspluatuvavsya nasychonomu monoyetanolaminu solution. Shown that the main reason is ruynuannya presence of hydrogen sulfide in the working environment, rodanidu, formiatu and other impurities.

Решаемые проблемы:

Впервые для подогрева насыщенного сероводородом раствора МЭА очистки коксового газа коксохимического завода применили пластинчатые теплообменники с толщиной пластин 0,6 мм.

Теплообменник разрушился после двух лет эксплуатации и была проведена работа по выяснению причины разрушения указанного теплообменника.

Постановка задачи:

Для исследования причин выхода из строя пластинчатого теплообменника были проведены химический анализ рабочих сред и металла, из которого был изготовлен теплообменник, металлографические исследования и исследования коррозионно-электрохимического поведения конструкционных материалов в рабочих растворах действующей установки.

По паспортным данным материал теплообменника соответствует импортной стали AISI 316L, близким аналогом которой является отечественная сталь 03X17H14M3.

Рабочие среды в теплообменнике:

- подогреваемая среда – насыщенный раствор МЭА, температура – 40 – 100 °С;

- охлаждаемая среда – регенерированный раствор МЭА, температура – 120 – 60 °С.

Насыщенный 15 % раствор МЭА после очистки коксового газа содержит сероводород, формиаты, роданиды и другие примеси.

В растворе определяли содержание сероводорода комплексометрическим методом титрованием раствором гексацианоферрата (111) при pH = 9.

Содержание сероводорода в насыщенном растворе МЭА составило 25,5 г/л, в регенерированном растворе – 1,93г/л.

Содержание формиатов определяли методом пермангонатометрии в подкисленном до pH = 2 растворе.

Содержание формиатов составило 113 г/л.

В растворе также присутствуют роданид-ионы в количестве 97г/л.

Таким образом, исследуемый раствор обладает высокой агрессивностью за счёт присутствия большого количества сероводорода, формиат-ионов и роданид ионов [1].

При повышении температуры до 90 °С и более в парогазовой фазе, возможна диссоциация формиатов с образованием муравьиной кислоты, что делает рабочую среду ещё более агрессивной.

После 2,5 месяцев эксплуатации в теплообменнике обнаружена интенсивная равномерная коррозия в области коллекторного отверстия (рис. 1).

Металл пластины существенно утоняется к коллекторному отверстию (рис. 1 и рис. 2), характер коррозии – равномерный.

Скорость коррозии увеличивается по мере приближения к коллекторному окну.

Проведенный спектральный анализ стали показал, что по химическому составу металл пластины соответствует стали AISI 316L (табл. 1).

Микроструктура металла изучалась на образцах, вырезанных непосредственно в зоне интенсивного разрушения до и после травления при увеличениях $\times 70$, $\times 100$, $\times 200$, $\times 450$.



Рис. 1. Интенсивная равномерная коррозия на участке, входа в коллекторное окно пластины теплообменника

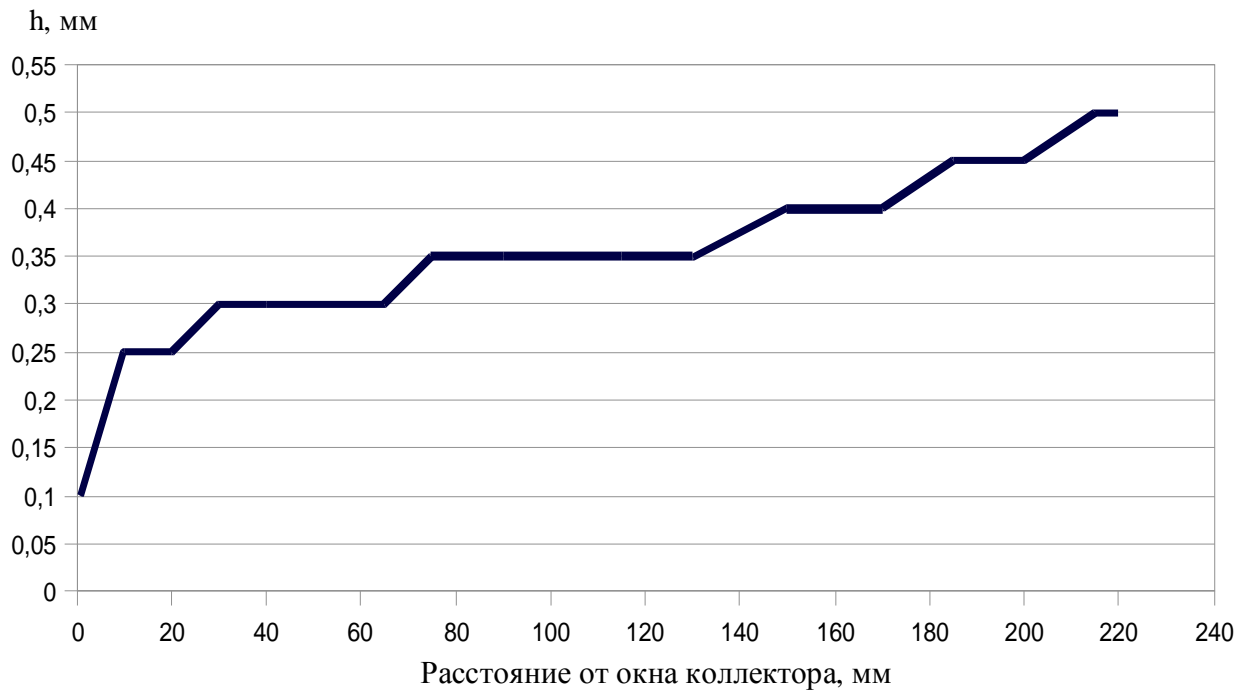


Рис. 2. Изменение толщины пластины теплообменника (h) в зависимости от расстояния от окна коллектора

Таблица 1

Результаты спектрального анализа металла пластины теплообменника из стали AISI 316

Элемент	C	Ni	Cr	Si	Mn	Mo	Ti
Содержание, %	0,04	11,5	16,0	0,38	0,75	2,38	-

Структура основного металла состоит из мелких зёрен аустенита (балл 11), вытянутых вдоль проката, и карбидных включений (рис. 3).

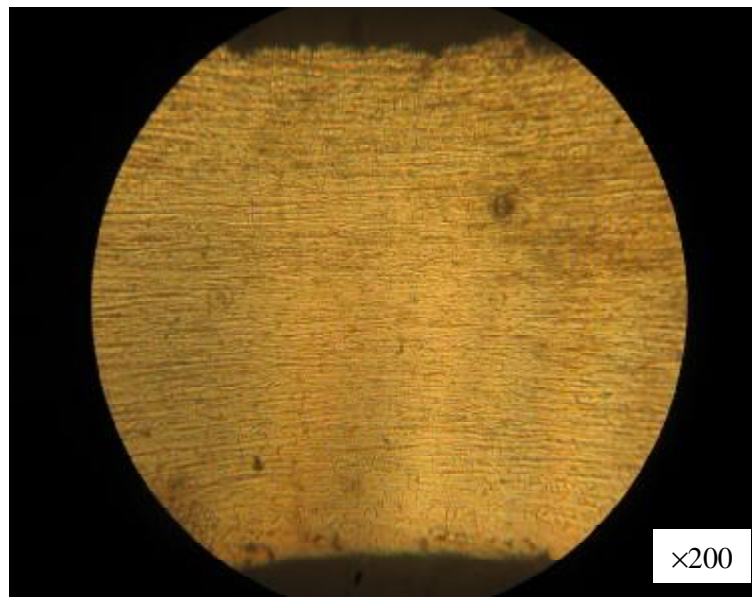


Рис. 3. Структура металла пластины в зоне разрушений

Язв и других локальных разрушений не выявлено.

Коррозионную стойкость стали определяли электрохимическим методом с помощью потенциостата П5827М в рабочих растворах МЭА в зависимости от температуры.

Рабочим электродом служила пластина, вырезанная из разрушившегося теплообменника.

Электродом сравнения служил насыщенный хлорсеребряный электрод, вспомогательный электрод – платина.

На рис. 4. представлены анодные потенциодинамические кривые, снятые в насыщенном растворе МЭА, при температурах 60 и 90 °С.

На кривых наблюдаются значительные анодные токи. При температуре 60 °С сталь корродирует в пассивном состоянии.

Повышение температуры до 90 °С приводит к появлению области активного растворения при потенциале минус 0,3 В.

Анодная кривая, снятая на платине в этом же растворе при температуре 60 °С (рис. 5) показала, что при анодной поляризации наблюдаются токи, близкие по значению к токам при поляризации стали AISI 316L, что, вероятно, связано с окислением компонентов раствора на платине.

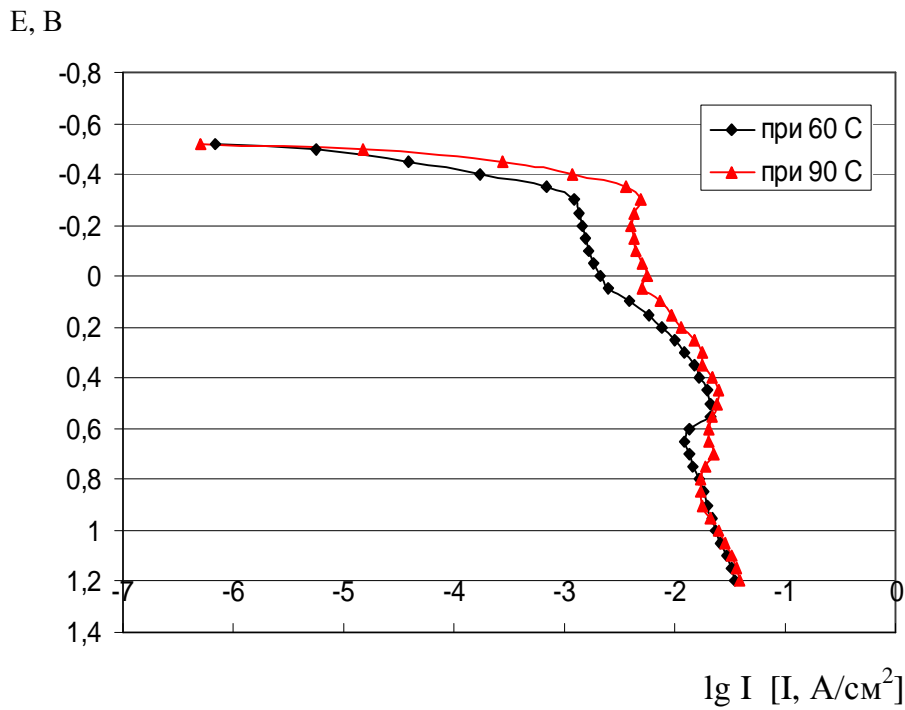


Рис. 4. Анодные потенциодинамические кривые, снятые на образцах, вырезанных из разрушившейся пластины теплообменника, в насыщенном растворе МЭА.

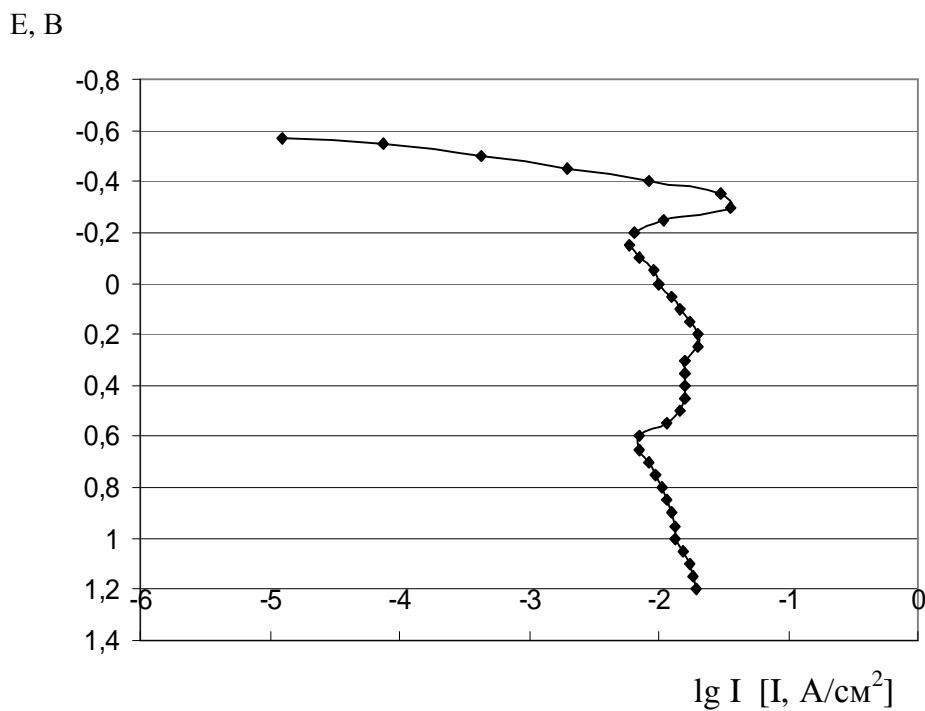


Рис. 5. Анодная потенциодинамическая кривая, снятая на платине в насыщенном растворе МЭА при температуре 60 °С

Для определения скорости анодного растворения стали в области активного растворения, при потенциале минус 0,3 В и температуре 70 °С, была снята зависимость скорости коррозии от заданного потенциала во времени.

Исследования показали, что в первый момент времени при заданном потенциале ток растворения составил 4,7 мА/см².

В первые 2 часа наблюдается рост тока до 11,7 мА/см², затем ток снижается практически до 0.

Возможно, это связано с окислением рабочего раствора при анодной поляризации.

Скорость коррозии после поляризации в течение 4,5 часов при $\varphi = -0,3$ В составила 0,5 г/м²час.

При потенциале свободной коррозии ($\varphi_{с.к.}$) были проведены лабораторные коррозионные испытания в насыщенном растворе МЭА, которые приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты лабораторных коррозионных испытаний на пластинах, вырезанных из разрушившегося теплообменника, в насыщенном растворе моноэтаноламина

Температура, °С	Продолжительность испытаний, час	Скорость коррозии, г/м ² час	Значение потенциала свободной коррозии, $\varphi_{с.к.}$	Примечание
90	13,5	0,36	- 0,53	1 раствор*)
90	14	0,1	- 0,42	2 раствор***)
80	19	0,1	- 0,33	2 раствор***)

Из таблицы 2 видно, что при одной и той же температуре (90 °С) в насыщенном растворе МЭА, в растворах, отобранных в разное время, значения потенциала свободной коррозии отличаются на 100 мВ.

Соответственно и скорость коррозии снижается от 0,36 г/м²час в первом растворе до 0,1 г/м²час во втором растворе.

Снижение температуры с 90 °С до 80 °С приводит к облагораживанию потенциала свободной коррозии до минус 0,33 В.

Скорость коррозии при этом, практически, не изменилась и достигает 0,1 г/м²час.

На промышленные коррозионные испытания в рабочих условиях насыщенного МЭА раствора при температуре равной 80 – 90 °С установки МЭА очистки коксового газа Баглейского коксохимического завода были постав-

лены образцы, вырезанные из участка пластины, не подвергшегося разрушению.

Результаты промышленных испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты промышленных испытаний фрагментов пластины теплообменника из стали 316L после 1008 часов

№ образца	Размеры образца, мм	К, г/м ² ·час	П, мм/год
1	9,5x2,5x0,5	0,3365	0,3667
2	9,9x2,3x0,5	0,2878	0,3137
3	9,9x2,3x0,5	0,4295	0,4682
4	9,4x2,9x0,5	0,3300	0,3597
5	10,0x2,5x0,5	0,3268	0,3562
11	9,2x6,0x0,5	0,3649	0,3978
13	9,5x4,9x0,5	0,3651	0,3980

Из результатов промышленных испытаний видно, что средняя скорость коррозии составляет 0,35 г/м²·час., что достаточно хорошо коррелируется с результатами лабораторных коррозионно-электро-химических исследований.

Выводы:

1. Металл пластины соответствует стали AISI 316L (отечественный аналог – сталь 19Х17Н13М2Т).

2. Характер коррозии стали равномерный, скорость коррозии до 0,5 мм/год. Металлографическими исследованиями локальных разрушений на пластине, подвергшейся разрушению, не выявлено.

3. Интенсивное растворение стали на участке, прилегающем к коллекторному отверстию пластины теплообменника, по-видимому, связано с высокой температурой насыщенного раствора МЭА, поступающего через коллектор, при которой возможно образование муравьиной кислоты.

Список литературы: 1. Коуль А. Очистка газов / А. Коуль, Ф. Ризенфельд. – М.: ГНТИ нефтяной и горно-топливной л-ры, 1962. – 395 с.

Поступила в редколлегию 25.03.10

Т.Э. ШЕПИЛЬ, В.А. КАЧАНОВ, канд. техн. наук,
Ю.Б. ДАНИЛОВ, докт. техн. наук,
В.Ю. КОЗИН, ОАО УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина,
К.А. ЮЩЕНКО, академик НАНУ, **В.С. САВЧЕНКО**, докт. техн. наук,
ИЭС им. Е.О. Патона, г. Харьков, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ТРУБ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ В ПЕЧИ РИФОРМИНГА В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛУЧЕНИЯ АММИАКА НА РОВЕНСКОМ ОАО «АЗОТ»

Проведений комплекс фізико-механічних, металографічних та електронно-мікроскопічних досліджень дозволив виявити основні причини руйнування високолегованих труб центробіжного лиття вітчизняного виробництва при їх експлуатації в печі риформинга виробництва аміаку.

Проведенный комплекс физико-механических, металлографических и электронно-микроскопических исследований позволил выявить основные причины разрушения высоколегированных труб центробежного литья отечественного производства при их эксплуатации в печи риформинга производства аммиака.

The complex of physical, mechanical, metallographic and electron microscopic studies revealed the main reasons for destruction of high centrifugal casting pipes domestic production in their operation in the furnace ryformynha ammonia production.

Решаемая проблема.

При модернизации печи риформинга применены высоколегированные жаропрочные трубы центробежного литья отечественного производства, которые в течение года эксплуатации начали подвергаться разрушению.

«УкрНИИхиммаш» совместно с ИЭС им. Е.О. Патона проведены исследования по выяснению причин разрушения труб печей риформинга для одного из производств аммиака.

Трубчатые печи парового риформинга – весьма крупные и дорогостоящие агрегаты, и разрушение хотя бы одной трубы приводит к полной остановке агрегата синтеза аммиака и соответствующему недополучению целевого продукта.

Для изготовления труб паровых риформингов используются высоколегированные сплавы с повышенным содержанием углерода 0,4 % и выше, ко-

торые не являются ковкими и поэтому их изготавливают на установках центробежного литья.

Стоимость одной трубы на европейском рынке достигает 10000 Евро.

В мире имеется несколько заводов, производящих качественные трубы для печей риформинга.

В числе причин ускоренного разрушения труб может быть как перегрев со стороны горелок с наружной стороны, так и с внутренней.

Благодаря закоксованию катализатора, снижается теплоотвод, что приводит к интенсивному окислению и трещинообразованию с внутренней поверхности трубы.

Основной механизм повреждения труб риформинга – комбинация термических напряжений, направленных перпендикулярно стенке трубы, напряжений, порождаемых высоким давлением внутри трубы и окислением при закоксовании катализатора [1].

Постановка задачи: исследование причин разрушения трубы печи риформинга после года эксплуатации показало, что фактическая толщина стенки трубы, подвергшейся разрушению, – 17,35 мм; близлежащей трубы, не подвергшейся разрушению, – 15,7 мм.

Внутренняя поверхность разрушенной трубы покрыта темным неоднородным слоем на глубину до 1,35 мм.

Морфология излома (рис. 1) показала, что разрушение берет начало с внутренней поверхности трубы от темного слоя и носит хрупкий характер.

Концентраторами напряжений являются стыки зерен, и разрушение происходит путем скольжения по границам зерен.

Из рисунка видно, на изломе ярко выраженная площадка сдвиговой деформации, берущая начало от внутренней поверхности окисленной трубы.

На внутренней поверхности не разрушенного участка трубы окалина отсутствует, отчетливо просматриваются следы механической обработки трубы после литья.

Измерения твердости по сечению стенки трубы, подвергшейся разрушению, показали, что твердость внутренней поверхности, покрытой окалиной, составляет 380 НВ, в среднем сечении – 260 НВ и вблизи наружной поверхности – 250 НВ.

Неоднородность изменения твердости по сечению трубы свидетельствует о значительных внутренних напряжениях в металле и снижении сопротив-

ления ползучести.



Рис. 1. Морфология излома

Проведенный общий химический анализ металла труб представлен в таблице 1.

Таблица 1

Труба	C	Cr	Ni	Si	Mn	Nb	Cu	Mo
Не бывшая в работе	-	24,0	18,0	1,23	0,50	-	-	-
Разрушившаяся	0,58	26,34	19,3	1,07	1,33	1,14	0,04	0,32
Не разрушившаяся	0,52	24,6	18,4	1,77	1,85	0,31	0,09	0,31

Сопоставляя данный химический состав металла труб с данными жаропрочных сталей для центробежнолитых труб, приведенных в ТУ26-02-5475-94, можно сделать вывод, что материал исследуемых труб не соответствует маркам сталей данного ТУ.

Близкой по химсоставу, согласно ТУ26-02-5475-94 является сталь 45Х25Н20С.

Контроль механических свойств разрушившейся трубы производили в соответствии с ГОСТ 6996-66 и ГОСТ 9454-78 на продольных образцах.

Изготовленных из сегмента трубы.

Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 2

Материал	Предел прочности, Н/мм ²	Предел текучести, Н/мм ²	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %	Ударная вязкость КСУ, Дж/см ²
Исследуемый образец	440	374	1	0	2,45
45Х25Н20С по данным ТУ 26-02-5475-94	441	245	10	10	-

Результаты механических испытаний (таблица 2) показали:

- завышенное значение предела текучести;
- очень низкие значения относительного удлинения и относительного сужения;
- низкое значение ударной вязкости ($2,45 \text{ Дж/см}^2$) свидетельствует о хрупком состоянии материала.

Характер разрушения внутренней поверхности сплава трубы изучали на сканирующем электронном микроскопе Samskan-4.

В результате исследований в поверхностном слое выявлены трещины (рис. 2).

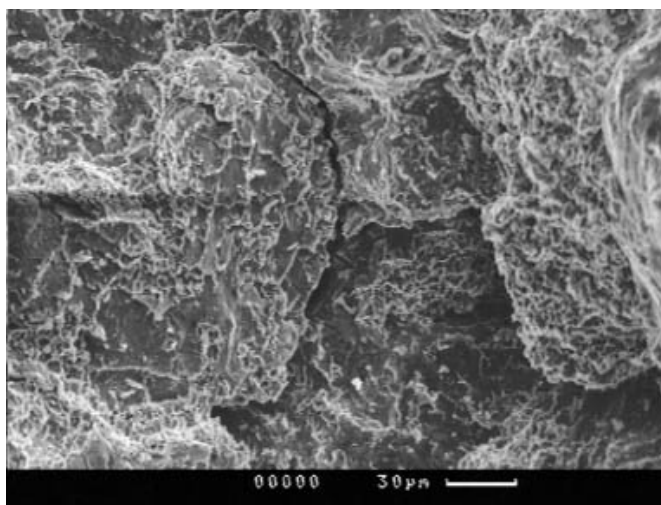


Рис. 2. Фрактография слоя внутренней поверхности трубы

Обнаруженные трещины создают пути проникновения рабочей среды вглубь металла.

Для изучения распределения элементов по сечению толщины стенки разрушившейся трубы был использован метод микрорентгеноспектрального анализа (рис. 3).

Результаты анализа свидетельствуют, что темный слой разрушившейся трубы Spektrum 4 и Spektrum 3 представляют собой:

- окисел никеля NiO , который в данных сплавах образуется путем быстрого беспорядочного роста на ранней стадии окисления;
- окисел хрома типа Cr_2O_3 , который в данных сплавах должен выполнять защитные функции и чей медленный рост замедляет скорость окисления;
- промежуточный слой шпинелей типа NiCr_2O_4 , где никель может находиться в свободном состоянии в виде включений.

Sample: X25H20										
Processing option : All elements analysed (Normalised)										
All results in weight%										
Spectrum	C	O	Si	Cr	Mn	Fe	Ni	Nb	Mo	Total
Spectrum 1	3,78		2,02	27,2	0,86	47,73	17,32	0,53	0,56	100
Spectrum 2	5,97		1,78	25,22	0,85	48,29	17,33	0,31	0,24	100
Spectrum 3	2,61	17,5	3,02	24,78	1,21	36,84	13,22	0,38	0,43	100
Spectrum 4	0,74	24,93	1,87	24,08	0,95	34,64	12,21	0,19	0,39	100
Max.	5,97	24,93	3,02	27,2	1,21	48,29	17,33	0,53	0,56	
Min.	0,74	0	1,78	24,08	0,85	34,64	12,21	0,19	0,24	

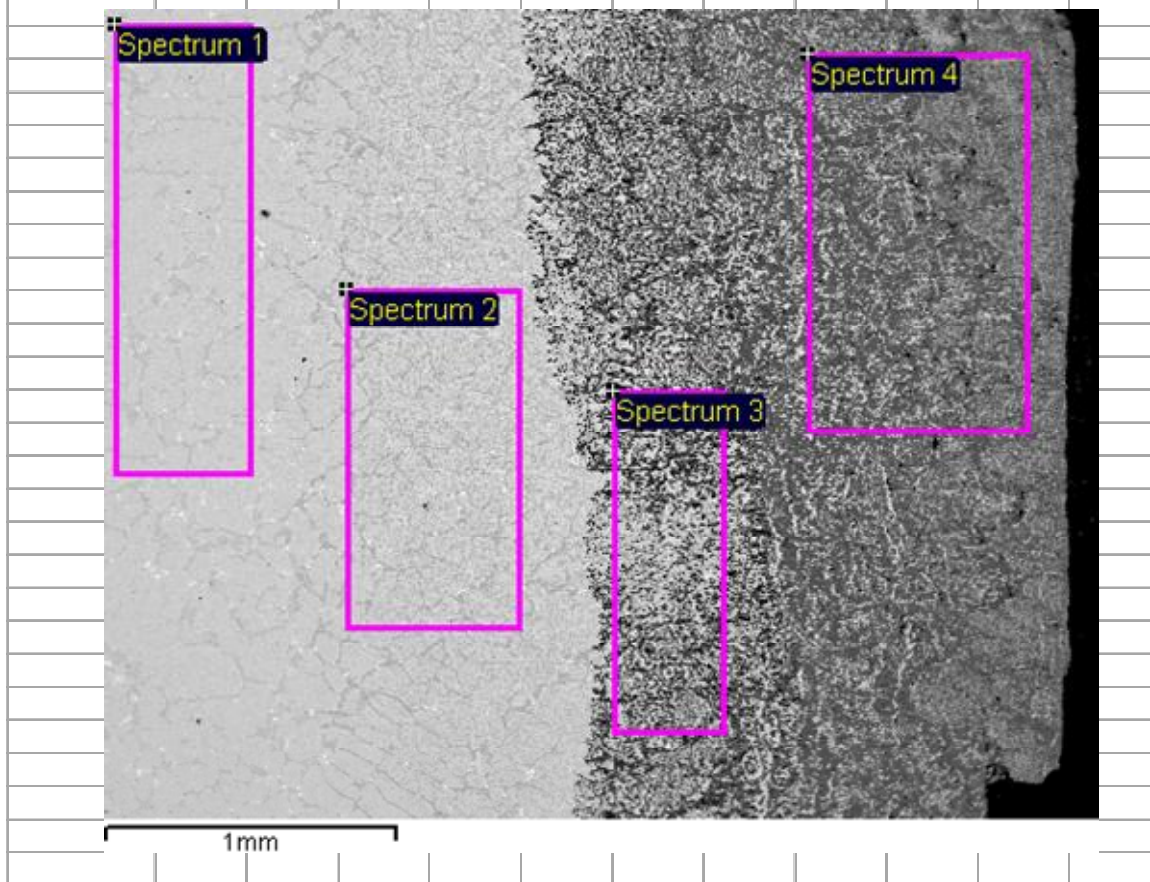


Рис. 3. Послойный микрорентгеноспектральный анализ по толщине стенки разрушившейся трубы

Однако, по мере образования защитной окисной пленки Cr_2O_3 при определенном температурном режиме в металле трубы может уменьшаться количество хрома, и окалина начинает глубоко распространяться в металл, производя большие изменения в его поверхностном слое (рис. 4).

Опасность такого обеднения заключена в чувствительности этой «обедненной» области металла к внутреннему окислению [2], что, по-видимому, и отразилось на катастрофическом снижении ресурса работы трубы до 1 года эксплуатации.

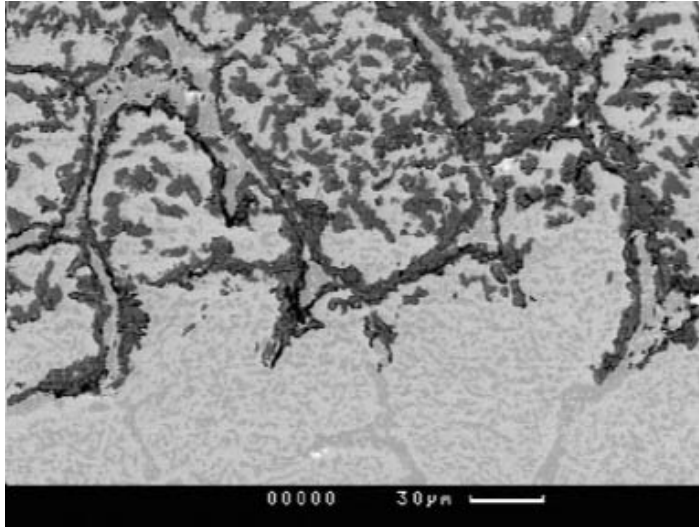


Рис. 4. Проникновение окалины в поверхностный слой металла

Кроме карбидов в теле зерна аустенита выявлены интерметаллидные соединения типа FeCr, представляющие σ -фазу (рис. 5).

Микрорентгеноспектральный анализ выявил наличие микродобавок вольфрама и титана в металле трубы.

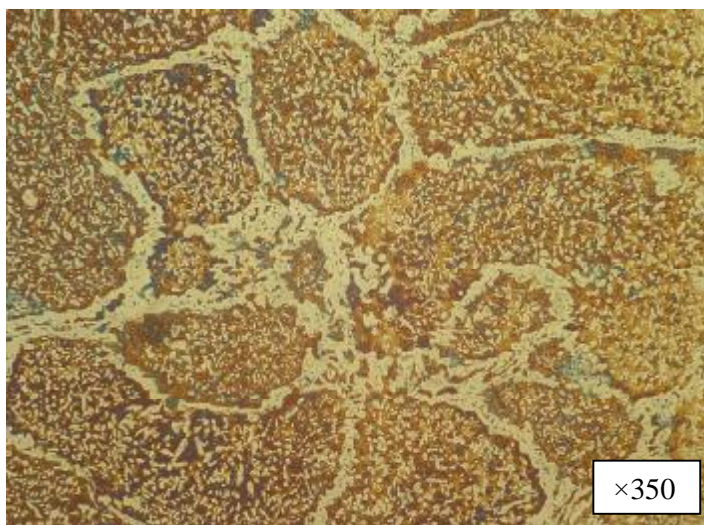


Рис. 5 . Микроструктура металла разрушившейся трубы на глубине 2,6 мм от внутренней стенки

В металле стенки трубы, непосредственно под темным слоем наблюдается ликвация по углероду (от 2,46 % до 17,95 %).

Проникновение в металл такого количества углерода, по-видимому, связано с образованием углерода (сажи) на катализаторе и последующей его диффузией через образовавшуюся окалину в металл в результате локального перегрева внутренней стенки трубы.

В соответствии с ТУ 26-02-5475-1085-88 глубина пористого слоя с внутренней стороны трубы не должна превышать $2/3$ припуска на механическую обработку.

По-видимому, полностью дефектный слой не был удален при механической обработке, что и привело к заметному зазору между стенкой трубы и катализатором за счет вскрытых пор в дефектном слое, а это, в свою очередь, привело к локальному перегреву внутренней поверхности трубы, образованию углерода на катализаторе и активации поверхности металла с образованием окалины на внутренней стенке трубы толщиной 1,35 мм и твердостью 380 НВ.

Перегрев внутренней стенки трубы с последующей диффузией углерода, образовавшегося на поверхности катализатора, вызвали ряд структурных изменений в металле:

- разрушение стабилизирующей сетки мелкодисперсных вторичных карбидов в аустенитной матрице, что резко снизило устойчивость к ползучести и зарождению микротрещин по границам зерен;
- образование большого количества первичных игольчатых карбидов хрома по границам зерен аустенита с возникновением высоких неоднородных внутренних напряжений, а также появление охрупчивающей σ -фазы внутри зерен послужило основной причиной коррозионного растрескивания металла трубы.

Выводы.

Проведенный комплекс физико-механических металлографических и электронно-микроскопических исследований показали:

- в макроструктуре разрушившейся трубы не обнаружены столбчатые кристаллы дендритов, которых согласно ТУ 26-02-5475-1085-88 должно быть до 50% по толщине трубы;
- разрушение стабилизирующей сетки мелкодисперсных вторичных карбидов резко снизило устойчивость к ползучести стали и зарождению микро-

трещин по границам зёрен;

- образование окалины на внутренней стенке трубы с твёрдостью 380НВ привело к значительным внутренним напряжениям.

Список литературы: 1. *Брайтлинг Д.Р.* Трубы парового риформинга – мониторинг, конструкция и особенности эксплуатации / *Д.Р. Брайтлинг, В.Б. Кузнецов, Б.Р. Фишер* // Химическая техника. – 2006. – № 5. – С. 10 – 20. 2. *Симс Ч.* Жаропрочные сплавы / *Ч. Симс, В. Хагель*. – М.: «Металлургия», 1976. – 568 с.

Поступила в редколлегию 25.03.10

УДК 620.193.4

Д.В. БОБКОВ, канд. техн. наук, **В.А. КАЧАНОВ**, канд. хим. наук,
Ю.Б. ДАНИЛОВ, докт. техн. наук, **Е.К. ГВОЗДИКОВА**,
Т.Э. ШЕПИЛЬ, **Т.А. БАЛАК**,
В.Ю. КОЗИН, ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина

ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ НОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СРЕДАХ ЭКСТРАКЦИОННОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ

Для визначення корозійної стійкості нових вітчизняних та іноземних сталей і сплавів були проведені промислові корозійні дослідження зразків конструкційних матеріалів та їх зварних з'єднань в екстракційній фосфорній кислоті, металографічні та електрохімічні дослідження. На підставі проведених досліджень розроблені рекомендації на конструкційні матеріали для розробки реактора екстракційної фосфорної кислоти.

Для определения коррозионной стойкости новых отечественных и импортных сталей и сплавов были проведены промышленные коррозионные испытания образцов конструкционных материалов и их сварных соединений в экстракционной фосфорной кислоте, металлографические и электрохимические исследования. На основании проведенных исследований разработаны рекомендации на конструкционные материалы для разработки реактора экстракционной фосфорной кислоты.

To determine the corrosion resistance of new domestic and foreign steels and alloys were conducted industrial corrosive samples of construction materials and their welded joints in extraction phosphoric acid, metallographic and electrochemical study. Based on research developed-driven recommendations for structural materials development for reactor extractive phosphoric acid.

Решаемые проблемы.

Экстракционная фосфорная кислота (ЭФК) является одним из основных исходных компонентов для получения сложных минеральных удобрений.

Изучение процесса коррозии материалов в производстве ЭФК является сложной и серьезной проблемой.

В связи с высокотемпературным режимом производства ЭФК и наличием в ней агрессивных примесей и твердой фазы, конструкционные материалы, применяемые для изготовления технологического оборудования, должны обладать высокими показателями, как коррозионной стойкости, так и сопротивления абразивному износу.

Таким образом учитывая высокую агрессивность среды для проведения коррозионных и электрохимических исследований, были выбраны следующие материалы: стали 08X21H6M2T, 10X17H13M2T, 10X17H13M3T и сплавы 06XH28MДТ, ЭК-5, ЭК-77, ЭП-758, а также сплавы фирмы «ТиссенКрупп ВДМ» 59, 31, 33.

Испытаниям подвергались образцы, как в состоянии поставки, так и их сварные соединения.

Также в промышленных условиях были проведены коррозионные испытания образцов L15, L25 представленных заказчиком.

Постановка задачи.

Целью данной работы является определение коррозионной стойкости новых отечественных и импортных коррозионностойких сталей и сплавов в растворах производства экстракционной фосфорной кислоты и в концентрированной серной кислоте.

Методика проведения работ.

Промышленные коррозионные испытания проводили в среде экстракционной фосфорной кислоты.

Продолжительность испытаний составляла 2040 часов.

Испытания проводили в действующих аппаратах ОАО «Сумыхимпром».

Испытаниям подвергались образцы основного металла и сварных соединений размером 20×80×6 мм с поперечным сварным швом.

Оценка коррозионной стойкости проводилась на основании визуального осмотра образцов, определения характера разрушений и скорости коррозии гравиметрическим методом [1].

А так же проведены металлографические исследования [2].

Загиб образцов на 90° проводили с помощью испытательной машины VRM-30.

Для металлографических исследований вырезали шлифы из образцов после промышленных испытаний.

Макроструктуру изучали на шлифах при увеличении до $\times 20$.

Микроструктуру исследовали на полированных шлифах, травленных электролитически в 10 %-ном водном растворе щавелевой кислоты.

Металлографические исследования проводили на оптическом микроскопе МИМ-7 при увеличении $\times 200$.

Электрохимические исследования проводили на потенциостате П-5826-М во фторопластовой ячейке с разделением анодного и катодного пространства диафрагмой из пористого фторопласта.

Измеряли потенциалы свободной коррозии исследуемых материалов в экстракционной фосфорной кислоте при температуре 80 °С.

Время до установления постоянного значения E_k 30 – 45 мин.

Потенциодинамические кривые снимали со скоростью изменения потенциала 1,8 В/час.

В качестве электрода сравнения применяли насыщенный хлорсеребряный электрод, вспомогательный электрод – платина.

Экспериментальная часть.

Промышленные коррозионные испытания исследованных материалов проводили в среде экстракционной фосфорной кислоты в действующих аппаратах ОАО «Сумыхимпром».

Продолжительность испытаний составляла 2040 часов.

Результаты проведенных промышленных коррозионных испытаний представлены в табл. 1.

Как видно из таблицы, проведенные коррозионные исследования в условиях экстрактора фосфорной кислоты показали, что при температуре 75 – 80 °С сплавы 06ХН28МДТ, 02Х21Н25М5ДБ, ХН60МБ наименее стойки и корродируют со скоростью до 0,1 мм/год при средней скорости коррозии 0,07 мм/год.

Российский сплав ХН30МДБ и сплавы 31, 33, 59 фирмы «ТиссенКрупп ВДМ» обладают высокой коррозионной стойкостью, скорость коррозии сплавов не превышает 0,005 мм/год при равномерном характере коррозии.

После испытания на изгиб образцов, прошедших промышленные испытания, расслоения, надрывов и трещин не выявлено.

Таблица 1

Результаты промышленных коррозионных испытаний конструкционных материалов в средах экстракционной фосфорной кислоты на ОАО "Сумыхимпром".

Экстракционная фосфорная кислота 25%, пульпа, 2040 часов.

Сплав	Средняя скорость коррозии, мм/год (t = 75 – 80 °С)	Средняя скорость коррозии, мм/год (t = 72 – 74 °С)
Сплав 31	0,038	0,016
Сплав 33	0,046	0,011
Сплав 59	0,0440	0,0160
ЭИ-943 (06ХН28МДТ)	0,0720	0,0240
ЭП-758 (ХН60МБ)	0,0640	0,0340
ЭК-5 (02Х21Н25М5ДБ)	0,0760	
ЭК-77 (ХН30МДБ)	0,0200	
L-15	0,1640	
L-25	0,021	
ЭК5 (02Х21Н25М5ДБ)		0,0460
ЭП 54 (08Х21Н6М2Т)		0,0018
ЭИ 432 (10Х17Н13М3Т)		0,0080
ЭИ 448 (10Х17Н13М2Т)		0,0120

Металлографическими исследованиями образцов сварных соединений сплавов 31, 33 и 59 структурных изменений и локальных разрушений не выявлено.

В условиях экстракции фосфорной кислоты при температуре $t = 72 - 74$ °С все исследованные материалы корродируют со скоростью коррозии менее 0,05 мм/год.

Наибольшей коррозионной стойкостью обладают сплавы 31, 33 и 59, скорость коррозии которых менее 0,002 мм/год.

После испытания на изгиб образцов, прошедших промышленные испытания склонности к межкристаллитной коррозии не выявлено.

На образцах стали 10Х17Н13М3Т и сплава ХН60МБ выявлены надрывы в сварных швах, что указывает на снижение пластичности металла, в процессе коррозионных испытаний может привести к локальным разрушениям.

Проведенные металлографические исследования сварного соединения сплава ХН60МБ показали на поверхности основного металла наличие мелких пузырьков (рис. 1), что может быть связано с диффузией водорода, образующегося при коррозии сплава, под поверхность металла и может привести к локальным разрушениям.



Рис. 1. Внешний вид образца сплава ХН60МБ после промышленных испытаний

Исследованиями микроструктуры выявлена ее неоднородность в виде полосчатости и хаотичным расположением карбидов (рис. 2).

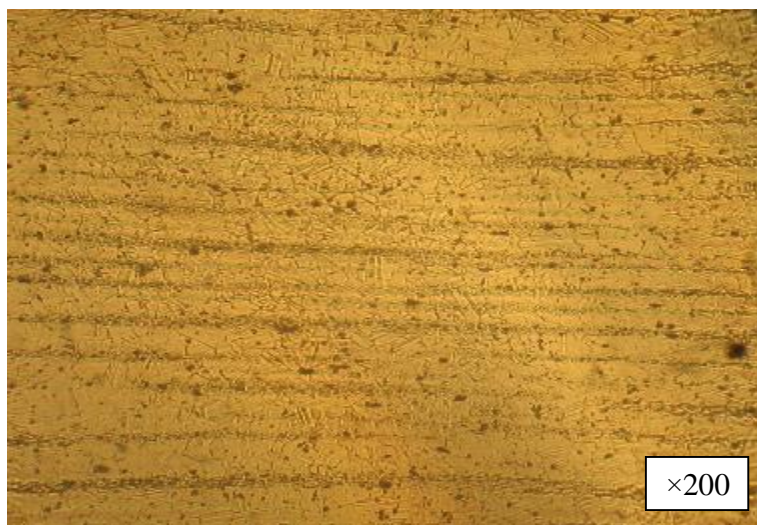


Рис. 2. Микроструктура сплава ХН60МБ после промышленных испытаний.

Образцы L-15 и L-25 корродируют в растворе экстракционной фосфорной кислоты со скоростью 0,016 и 0,021 мм/год соответственно.

Коррозия носит равномерный характер.

Электрохимические исследования, проведенные в растворе экстракционной фосфорной кислоты при температуре 80 °С, показали, что все исследованные материалы корродируют из пассивного состояния за исключением сталей 10X17H13M2T и 10X17H13M3T, где наблюдаются небольшие области активного состояния (рис. 3 и рис. 4).

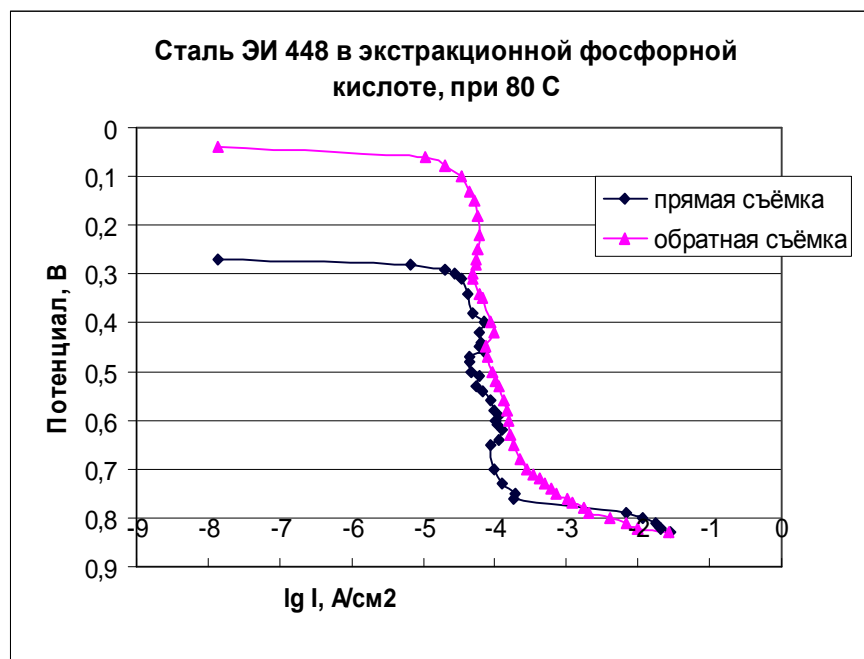


Рис. 3. Сталь ЭИ 448 в экстракционной фосфорной кислоте, при 80 °С

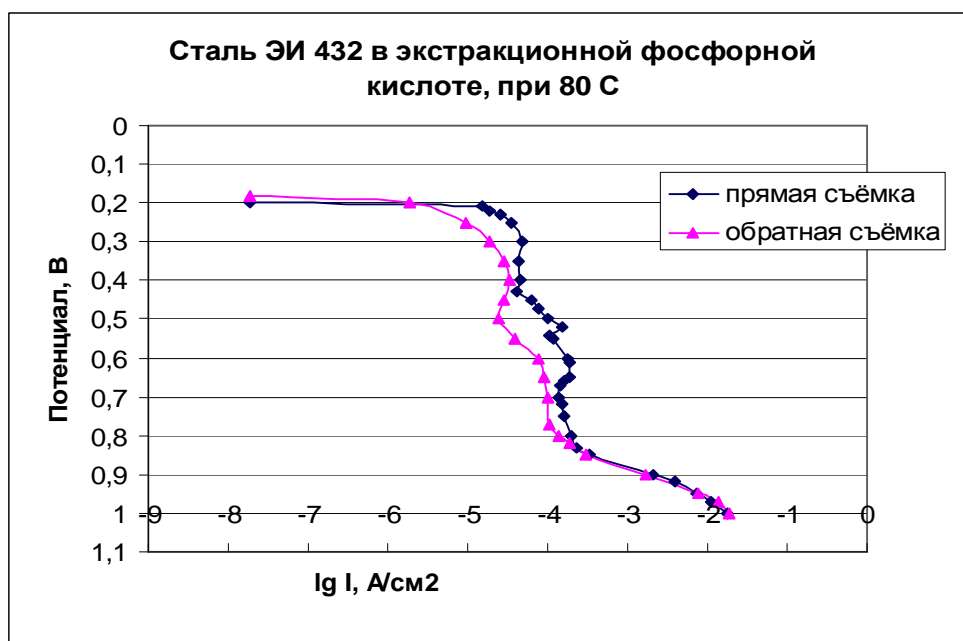


Рис. 4. Сталь ЭИ 432 в ЭИ 448 в экстракционной фосфорной кислоте, при 80 °С

Катодная обработка не приводит к активации стали.

В таблице 2 представлены скорости коррозии исследованных сталей и сплавов при потенциале свободной коррозии и в пассивной области.

Таблица 2

Скорости коррозии исследованных материалов* при потенциале свободной коррозии и в пассивной области в растворе экстракционной фосфорной кислоты при температуре 80 °С

Материал	Электрохимический эквивалент, (q)	Потенциал свободной коррозии, Есв.к, В	Проницаемость, П, мм/год	Диапазон потенциалов наиболее устойчивого пассивного состояния Е, В	Проницаемость, П, мм/год
08X21H6M2T (ЭП-54)	0,732	0,36	0,0001	0,57 – 0,86	0,047
Сплав 59	1,09	0,36	0,00018	0,46 – 0,7	0,153
Сплав 31	0,848	0,35	0,0001	0,42 – 0,8	0,143
Сплав 33	0,813	0,35	0,0001	0,42 – 0,72	0,06
02X21H25M5ДБ (ЭК-5)	0,842	0,27	0,00011	0,36 – 0,65	0,188
10X17H13M2T (ЭИ-448)	0,763	0,27	0,00012	0,57 – 0,86	0,513
10X17H13M3T (ЭИ-432)	0,773	0,2	0,00016	0,3 – 0,82	0,385
06ХН28МДТ (ЭИ-943)	0,827	0,33	0,00017	0,42 – 0,8	0,036
ХН60МБ (ЭИ-758)	1,11	0,21	0,00034	0,47 – 0,65	0,306
ХН30МДБ (ЭК-77)	0,837	0,2	0,00031	0,28 – 0,73	0,157

* Скорость коррозии получена пересчетом токовых показателей.

Как видно из таблицы, при потенциале свободной коррозии все исследованные материалы корродируют со скоростями менее 0,0005 мм/год.

При смещении потенциала в область более положительных значений, что может быть реализовано при изменении состава рабочей среды, скорости коррозии заметно возрастают.

Стали 10X17H13M2T и 10X17H13M3T в пассивной области нестойки и корродируют со скоростями 0,513 и 0,385 мм/год соответственно.

Двухфазная сталь 08X21H6M2T в этих условиях более стойка, скорость ее коррозии в пассивной области составляет 0,047мм/год, что согласуется с результатами промышленных коррозионных испытаний.

Наибольшей коррозионной стойкостью в пассивной области обладают сплавы ХН30МДБ, 06ХН28МДТ и 31, 33 и 59 фирмы «ТиссенКрупп ВДМ».

Скорость коррозии сплава 33 составляет 0,06 мм/год, остальных сплавов – вблизи 0,2 мм/год. Скорость коррозии 06ХН28МДТ варьируется в диапазоне 0,036 – 0,11 мм/год.

Достаточно высокой коррозионной стойкостью в этих условиях обладают сплавы ХН60МБ и 02Х21Н25М5ДБ, скорость коррозии которых около 0,3 мм/год.

Выводы.

Проведен комплекс коррозионно-электрохимических и металлографических исследований образцов основного металла и сварных соединений в условиях работы экстрактора фосфорной кислоты и показано:

- в экстракционной фосфорной кислоте высокой коррозионной стойкостью в широкой области анодных потенциалов обладают сплавы на железо-никелевой и никелевой основах: ХН60МБ, 06ХН28МДТ, ХН30МДБ и сплавы фирмы «ТиссенКрупп ВДМ» 59, 31, 33 – скорость коррозии менее 0,15 мм/год.

- обнаружена повышенная коррозионная стойкость в промышленных условиях экономнолегированной стали 08Х21Н6М2Т – скорость коррозии 0,0018 мм/год, то есть почти в 20 раз сталь более стойка, чем высоколегированные сплавы.

- межкристаллитной коррозии исследованных сталей не наблюдается.

Таким образом, для изготовления внутренних устройств, крышки экстрактора рекомендуются сплавы фирмы «ТиссенКрупп ВДМ» 31 (трубы) и 33 (лист), которые обладают более высокой коррозионной и эрозионной стойкостью в сравнении со сплавом 06ХН28МДТ (ЭИ-943).

Сплавы под индексами L-15 и L-25 обладают высокой коррозионной стойкостью при равномерном характере коррозии.

Список литературы: 1. Методы коррозионных испытаний металлических материалов. Основные требования. Оценка результатов; РД 24.200.16-90. – К.; – М.: Издательство стандартов, 1990. – 27 с. 2. Сталь. Металлографический метод оценки микроструктуры листов и ленты; ГОСТ 5640-68. – М.: Издательство стандартов, 1968. – 7 с. 3. Сталь. Эталоны микроструктуры; ГОСТ 8233-56. – М.: Издательство стандартов, 1957. – 8 с.

Поступила в редколлегию 25.03.10

Ю.Б. ДАНИЛОВ, докт. техн. наук, **В.А. КАЧАНОВ**, канд. хим. наук,
Л.П. ПЕРЦЕВ, докт. техн. наук, ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков,
Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СОЗДАНИИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕД

В роботі наведені підходи та шляхи дослідження і вибору корозійностійких конструкційних матеріалів для конструювання обладнання для агресивних середовищ. Розглянути корозійні та механічні властивості конструкційних матеріалів методи дослідження корозійної стійкості, в тому числі специфічних видів корозійного руйнування.

В работе приведены подходы и пути исследования и выбора коррозионностойких конструкционных материалов для конструирования оборудования для агрессивных сред. Рассмотреть коррозионные и механические свойства конструкционных материалов методы исследования коррозионной стойкости, в том числе специфических видов коррозионного разрушения.

In the present study approaches and directions of research and selection of corrosion-resistant construction materials for construction equipment for corrosive environments. Consider the corrosive and mechanical properties of structural materials corrosion resistance methods, including specific types of corrosion.

Проблемы выбора конструкционных материалов при разработке оборудования.

Материалы для сосудов и аппаратов выбирают, руководствуясь следующими требованиями: пригодностью для применения в данной конструкции, соответствием стандартам и нормам, освоенностью промышленностью и коррозионной стойкостью.

В свою очередь пригодность материала к работе характеризуется тремя основными качествами – коррозионной стойкостью, прочностью при заданной температуре и технологичностью изготовления [1].

В мировой практике имеется два подхода к выбору материалов – американский и европейский [2].

В США структура налогового обложения поощряет создание установок, имеющих низкие капитальные затраты, а, следовательно, наиболее дешевые

конструкционные материалы, но при этом повышаются расходы на эксплуатацию и ремонт оборудования.

В Европе наоборот, налоговая система способствует созданию установок с высокими капитальными затратами, что обеспечивает надежность и меньшие расходы на ремонт и эксплуатацию.

Исследователи в Советском Союзе при выборе материалов исходили из европейской концепции, что, возможно, в известной мере определило работоспособность действующего оборудования на постсоветском пространстве, хотя оно практически выработало заложенный ресурс.

Постановка задачи и пути ее решения.

Современный выбор материалов для изготовления нефтегазохимической аппаратуры и оборудования определяется рядом факторов, которые можно разделить на две группы:

- зависящих от внешних рабочих условий;
- связанных со свойствами данного материала.

К факторам первой группы относятся температура, давление, свойства среды, особенности технологического процесса, возможные примеси.

Температура, как известно, влияет на механические свойства материала.

При повышении температуры ухудшаются механические свойства металлов.

Так, при температуре выше 500 °С механические свойства углеродистых сталей настолько снижаются, что применение их становится нерациональным.

Правилами Госгоратомнадзора и требованиями стандартов не допускается применение углеродистой стали для аппаратов, работающих под давлением при температуре стенки выше 475 °С.

Механические свойства легированных сталей при повышении температуры ухудшаются менее резко, поэтому их использование в этих условиях более рационально.

При повышении температуры интенсифицируются коррозионные процессы.

Так, высокотемпературная сернистая коррозия, как известно, становится заметной, начиная с температуры 250 °С.

Снижение температуры ниже 0 °С также вызывает изменение механических свойств материалов.

При повышенных давлениях предъявляются более жесткие требования к качеству стали.

Углеродистые конструкционные стали обыкновенного качества разрешается применять для аппаратов, работающих под давлением до 5 МПа, при больших давлениях следует использовать стали с более высокими механическими свойствами и пониженным содержанием серы, фосфора и других примесей.

Увеличения примесей обычно приводит к интенсификации коррозии.

Так, при значительных давлениях в присутствии водорода углеродистые стали подвергаются водородной коррозии.

При выборе материалов необходимо учитывать коррозионное и эрозионное воздействие среды.

В этой связи часто возникают трудности в выборе сталей недефицитных марок; например, при недостаточно полной очистке сырья от солей и воды в некоторых процессах нефтепереработки для изготовления конденсационно-холодильной аппаратуры не удаётся подобрать стали, обеспечивающие достаточно длительный срок службы аппарата.

Повышенные требования предъявляются при выборе материалов для изготовления аппаратов, предназначенных для работы с взрывоопасными веществами.

Ко второй группе факторов относятся физико-механические и технологические свойства материалов.

Наиболее важными характеристиками механических свойств, при выборе материалов являются, как известно, предел прочности или временное сопротивление σ_b , предел текучести σ_T , относительное удлинение δ , относительное сужение ψ , модуль упругости при растяжении E (модуль продольной упругости), коэффициент Пуассона μ , ударная вязкость α_H .

Кроме указанных механических характеристик, при выборе сталей для изготовления элементов аппаратуры, работающих при повышенных температурах, необходимо знать такие свойства, как ползучесть и длительная прочность материала, склонность к тепловой хрупкости, релаксации, чувствительность к старению, стабильность структуры, а для аппаратуры, работающей при пониженных температурах – склонность к хладноломкости.

Из физических характеристик для выбора материалов важно знать температурный коэффициент линейного расширения и коэффициент теплопроводности материала.

Последний является важной характеристикой при конструировании теплообменной аппаратуры всех видов.

Наиболее важными технологическими свойствами материалов, которые следует учитывать при их выборе, являются свариваемость, обрабатываемость давлением и резанием.

Помимо указанных факторов, при определении целесообразности применения того или иного материала необходимо, главным образом, учитывать экономические соображения.

Большинство аппаратов на химических и нефтеперерабатывающих заводах работает в условиях повышенных температур.

Изменение механических свойств сталей при повышенных температурах следует учитывать при выборе допускаемых напряжений.

Так, при повышении температуры предел текучести сталей падает, а поскольку рабочие напряжения не должны превышать предел текучести, и их выбирают с определённым запасом, то при повышении температуры допускаемые напряжения уменьшаются.

Изменение механических свойств различных углеродистых сталей с содержанием углерода до 0,4 % при повышенных температурах носит примерно одинаковый характер и может быть представлено в относительных единицах (табл. 1).

Таблица 1

Механические свойства (%) углеродистых сталей с содержанием углерода до 0,4 %

Температура, °С	σ_b	σ_T	δ	ψ	E	α_n
20	100	100	100	100	100	100
100	100	95	80	95	98	110
200	120	85	55	80	95	115
300	115	70	80	90	90	110
400	90	58	100	100	85	85
500	60	40	100	100	75	60

Как видно из табл. 1, предел прочности с ростом температуры изменяется, увеличиваясь на 20 % при температуре 200 °С и падая при дальнейшем увеличении температуры до 60 % при 500 °С (следует отметить, что увеличение прочности при 200°С в расчет не принимается).

С повышением температуры характер диаграммы растяжения углеродистой стали изменяется: явление текучести становится менее явным (рис. 1) и при температуре примерно 300 °С площадка текучести исчезает.

В этом случае свойства оценивают по так называемому условному пределу текучести, который определяют как напряжение, вызывающее заданную степень остаточной деформации (обычно принимают 0,2 %).

Предел текучести и предел прочности при нормальной температуре для низкоуглеродистых сталей связаны соотношением $\sigma_T = (0,55 \div 0,60) \sigma_B$.

При повышении температуры предел текучести падает в большей степени, чем предел прочности, поэтому допускаемое напряжение следует выбирать с учетом предела текучести.

Величина предела текучести при изгибе определяется напряжением, которое вызывает в крайних волокнах остаточные деформации 0,2 %.

Изгибающий момент (рис. 2):

$$M_u = \frac{P_T \cdot l}{4},$$

где P_T - сила, вызывающая остаточные деформации в крайних волокнах образца, равные 0,2 %; l - пролёт образца.

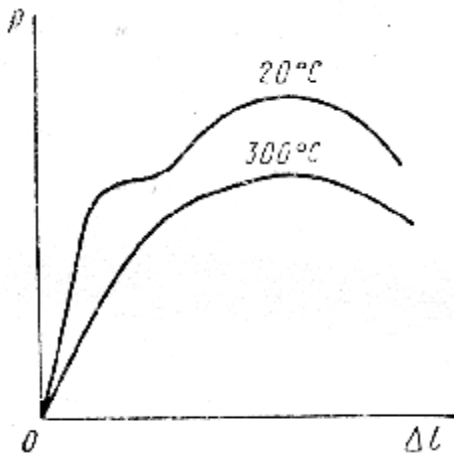


Рис. 1. Диаграмма растяжения стали
(P – сила, Δl – деформация)

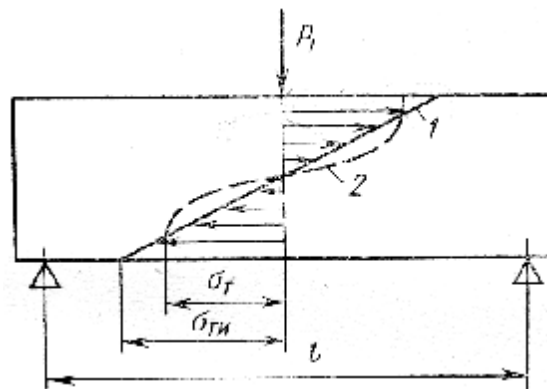


Рис. 2. Эпюра напряжений в сечении образца при изгибе:
1 – при упругих деформациях;
2 – при пластических деформациях

Предел текучести при изгибе:

$$s_{\text{III}} = \frac{P_T \cdot l}{4W},$$

где W - осевой момент сопротивления рассматриваемого сечения.

Для стали предел текучести при изгибе превышает предел текучести при растяжении и составляет при $\sigma_T = 200 \div 500$ МПа для образцов прямоугольного сечения соответственно $\sigma_{\text{ти}} = (1,44 \div 1,35) \cdot \sigma_T$.

Это объясняется неоднородностью напряженного состояния в условиях пластических деформаций при изгибе, когда эпюра напряжений характеризуется кривой (рис 2), а не прямой, как в условиях упругих деформаций.

Если для определения действительных напряжений в крайнем волокне при изгибе применять формулы, соответствующие распределению напряжений по кривой, при этом величина напряжений в крайнем волокне равна пределу текучести при растяжении.

Однако формулы, применяемые для определения напряжений, соответствуют прямолинейному закону распределения напряжений, поэтому при изгибе часто считают возможным несколько повысить допустимое значение напряжения в сравнении с допустимым напряжением при растяжении.

Если во всех точках поперечного сечения балки (рис 2) будет достигнуто напряжение текучести, то наступит так называемое предельное состояние, при котором образуется шарнир пластичности.

Предельный изгибающий момент, который может выдержать балка в этом случае, определяют как произведение предела текучести на пластический момент сопротивления $W_{\text{п}}$.

Значение $W_{\text{п}}$ для прямоугольного сечения высотой h и шириной b : $W_{\text{п}} = b \cdot h^2 / 4$; момент сопротивления при упругих деформациях, когда напряжения изменяются линейно от нейтральной оси к крайним волокнам в сечении образца, $W = b \cdot h^2 / 6$.

В этом случае следует брать требуемый по условиям работы коэффициент запаса прочности к предельному состоянию и определять размеры элементов, работающих под нагрузкой.

Характер изменения пластических свойств стали (относительного удлинения δ и относительного сужения ψ) при повышении температуры противоположен изменению предела прочности (табл. 1).

С ростом температуры δ и ψ вначале уменьшаются одновременно с некоторым увеличением предела прочности, а затем увеличиваются; сталь становится более пластичной, чем при нормальных условиях.

При выборе материалов по их характеристикам следует различать относительное удлинение образца пяти- и десятикратной расчетной длины, для которых соответственно:

$$l = 5d \text{ или } l = 5,65\sqrt{F} \text{ и } l = 10d \text{ или } l = 11,3\sqrt{F},$$

здесь d – диаметр образца; F – площадь поперечного сечения образца.

Значения относительного удлинения δ_5 и δ_{10} различаются; для низкоуглеродистой стали $\delta_5 \approx 1,16 \delta_{10}$. Для углеродистых сталей с содержанием углерода не более 0,25 % обычно принимают $\delta_{10} \geq 20 \%$.

Характеристика упругих свойств стали – модуль упругости при растяжении и сдвиге – с повышением температуры падает (табл. 2), а коэффициент Пуассона увеличивается.

Таблица 2

Модуль упругости при растяжении E в функции температур

Сталь	Значение $E \cdot 10^{-3}$, МПа, при температуре °С				
	20	100	250	450	550
Углеродистая	1,99	1,91	1,76	1,40	-
Легированная аустенитного класса	2	2	1,94	1,75	1,61

Значения модуля упругости материала при различных температурах, в частности, необходимы при определении температурных напряжений в элементах аппаратуры, расчете на устойчивость формы аппаратов и их частей и в других случаях.

Для сталей, используемых при изготовлении сосудов и аппаратов, допускаемое значение ударной вязкости при нормальной и пониженных температурах ограничено минимальным пределом.

При воздействии высоких температур в условиях напряженного состояния в сталях возникают ползучесть и релаксация, протекающие с различной интенсивностью в зависимости от химического состава стали, ее структуры, внутренних напряжений, температуры и др. Некоторые стали проявляют склонность к нарушению стабильности структуры.

Обычные методы кратковременных испытаний в условиях повышенных температур не дают возможности выявить действительные механические свойства сталей и не позволяют правильно судить об их прочности и пластичности.

В связи с этим, выбирая допускаемые напряжения при высоких температурах, следует учитывать изменение комплекса механических свойств, т. е. не только изменения предела прочности, предела текучести, но и длительную прочность и склонность стали к ползучести, релаксации.

При определении работоспособности стали в данных условиях необходимо учитывать также и ряд таких факторов, как склонность к тепловой хрупкости, графитизации, старению и пр.

Ползучестью, как известно, называют способность стали медленно, непрерывно, пластически деформироваться под действием постоянной нагрузки при высоких температурах.

Испытания на ползучесть проводят в специальных электропечах, где образец выдерживает длительное время при определенной температуре под действием постоянной нагрузки.

Время испытания обычно составляет 2000 – 3000 ч, но при необходимости может быть и больше.

При испытании измеряют деформацию образца.

По результатам испытаний вычисляют скорость ползучести.

Относительной скоростью ползучести называют скорость деформации образца в мм/(мм·ч):

$$u_n = \frac{\Delta l}{lt},$$

где Δl – абсолютная деформация образца; l – расчетная длина образца; τ – время.

Пределом ползучести (условным) называют напряжение, которое вызывает общую деформацию ползучести 1 % ($\Delta l = 0,01l$) за определенное время τ (обычно τ равно 10^4 или 10^5 ч.).

Следовательно, величина предела ползучести определяется скоростью ползучести:

$$u_n = \frac{0,01 \cdot l}{10000} = 10^{-6} \text{ мм/мм} \cdot \text{ч} ;$$

$$v_{\text{п}} = \frac{0,01l}{100000} = 10^{-7} \text{ мм/мм} \cdot \text{ч}.$$

Изложенные факторы при коррозионном воздействии усиливают разрушительные процессы и должны быть учтены.

Основные задачи коррозионных исследований.

В наиболее общей форме постановка задач коррозионных исследований направлена на изучение поведения новых материалов в конструкциях при их промышленной эксплуатации.

Поэтому, коррозионные исследования должны:

- соответствовать поставленной конкретной задаче (учитывать тип конструкции, условия эксплуатации по температуре, давлению и составу среды, наличие всевозможных примесей, особенно галоидов и сульфатов);

- иметь воспроизводимые результаты.

Воспроизводимость результатов коррозионных исследований может быть достигнута только при достаточно точной методике испытаний и на большом количестве образцов.

Значительно сложнее решить проблему соответствия проведенных исследований поставленной практической задаче, обеспечивающей создание конструкции с заданным ресурсом работы.

Обычно трудно учесть многочисленные факторы, которые оказывают влияние на коррозионную стойкость основного материала и его сварных соединений в конструкции в реальных условиях эксплуатации, но это необходимо выполнить обязательно – их значимость и систематизация – основные задачи коррозионных исследований.

Наиболее убедительны, с этой точки зрения, натурные испытания опытной конструкции или ее представительных элементов в реальных условиях эксплуатации. Однако этот метод чрезвычайно дорог и крайне ограничен по номенклатуре исследуемых материалах и параметрах исследуемых конструкций.

Закладываемые в разрабатываемую конструкцию химической аппаратуры конструкционный материал и сварные соединения должны:

- обеспечивать заданный ресурс работы для изделия в целом;

- быть технологичными;
- быть наименее легированными и не дефицитными;
- позволить создать экономически рентабельную конструкцию.

В качестве одного из основных показателей коррозионной стойкости конструкционных материалов принимается оценка по потере в массе образцов, выдержанных в рабочих средах в течение определенного времени.

Указанная оценка пригодна для характеристики однородного коррозионного воздействия среды на основной конструкционный материал и его сварные соединения.

Потеря в массе имеет вспомогательное значение при оценке конструкционных материалов с точки зрения межкристаллитной, точечно-язвенной, щелевой коррозии и других видов коррозионного разрушения.

Широко применяются для оценки коррозионной стойкости конструкционных материалов визуальный и микроскопический методы исследований, как при исследовании образцов, так и опытных и промышленных конструкций.

Визуальный осмотр больших поверхностей позволяет определить стойкость против точечно-язвенной и ножевой коррозии, при этом, измеряется глубина поражений и строится топография распределения.

Микроисследования прокорродовавших поверхностей позволили обнаружить возникновение очень малых областей, образующих начало ножевой и межкристаллитной коррозии.

При этом сравнивались поверхности образцов – свидетелей после испытаний с поверхностями контрольных образцов, не подвергавшихся испытаниям.

В случае каталитических процессов, когда существует реальная возможность отравления катализаторов незначительными количествами металлов – ядов, перешедших в раствор ввиду коррозии конструкционных материалов (микробиологическая, медицинская, нефтехимическая, фармацевтическая, пищевая промышленности), когда на первый план выдвигается не срок службы аппарата, а, прежде всего, чистота получаемых продуктов, обычная проверка коррозионной стойкости по потере в массе недостаточна.

Необходимо определение содержания ионов металлов в рабочих средах после коррозионных испытаний спектральным, масспектрометрическим и другими более чувствительными, чем гравиметрический, методами.

Методы испытаний.

Общая коррозия по определению В.В. Скорчелетти [3] есть самопроизвольное окисление металлов, вредное для промышленной практики.

Образование кислородных соединений металлов в большинстве случаев в атмосферных условиях является термодинамически естественным, что вытекает из характеристики изменения изобарного потенциала образования окислов металла из простых веществ.

Под общей коррозией понимается сплошное разрушение при визуальном и микроскопическом рассмотрении прокорродировавшей поверхности металла.

При этом, общая коррозия может быть как равномерной, так и неравномерной по глубине.

В соответствии с общеизвестной классификацией фирмы "Дюпон" на общую коррозию приходится до 28 % прокорродировавшего оборудования, на коррозионное растрескивание – до 24%, межкристаллитную коррозию – до 15%, питтинговую (точечно-язвенную) – до 14%, на коррозионно-механический износ – до 7% и на другие виды коррозии – до 13%

Продолжительность лабораторных испытаний образцов на общую коррозию принимается: 500, 1000 часов, в промышленных условиях – 3000, минимум 1000 часов.

Скорость коррозии оценивается по десятибалльной шкале (табл. 3).

При разработке химического и теплообменного оборудования применяются материалы 1 – 4 баллов стойкости.

В порядке исключения с ограниченным сроком службы могут применяться и материалы 5 и 6 балла стойкости.

Общая коррозия – единственный вид коррозии, который учитывается при разработке химического оборудования посредством прибавки на коррозию.

Остальные виды коррозионных разрушений [4] – межкристаллитная коррозия, коррозионное растрескивание, точечно-язвенная, щелевая, контактная коррозия могут быть исключены на стадии разработки оборудования или их скорость развития не должна превысить закладываемую прибавку на коррозию на весь ресурс работы химического оборудования, исчисляемого до 160 тысяч часов в рабочих условиях.

Учитывая, что толщина подверженных коррозии элементов конструкций теплообменного оборудования относительно невелика и составляет в

рассматриваемом аспекте 0,3 ÷ 3,0 мм, следует полагать, что главное – это правильно определить влияние специфических видов коррозионного разрушения (МКК, КР, точечно-язвенной, щелевой, ножевой, контактной коррозии) на коррозионное поведение конструкционного материала и его сварных соединений в конструкции, которые по скорости коррозии не должны превышать прибавки на коррозию.

Таблица 3

Десятибалльная шкала оценки коррозионной стойкости металлов и коррозионной активности сред по ГОСТ 13819

Балл	Глубина коррозионного проникновения, мм/год	Скорость коррозии, г/(м ² ч)				Характеристика устойчивости металла	Коррозионная активность среды
		железо и железные сплавы	медь и медные сплавы	свинец и свинцовые сплавы	алюминий и алюминиевые сплавы		
1	0,001	0,0009	0,001	0,0013	0,0003	Полностью устойчивый	Отсутствует
2	0,001-0,005	0,0009-0,0045	0,001-0,005	0,0013-0,0065	0,0003-0,0015	Повышенная устойчивость	Низкая
3	0,005-0,010	0,0045-0,009	0,005-0,010	0,0065-0,00130	0,0025-0,003	То же	То же
4	0,01-0,05	0,009-0,045	0,010-0,05	0,013-0,065	0,003-0,025	Устойчивый	Средняя
5	0,05-0,10	0,045-0,09	0,05-0,10	0,065-0,130	0,025-0,030	То же	То же
6	0,1-0,5	0,09-0,45	0,10-0,5	0,13-0,65	0,03-0,15	Пониженная устойчивость	Повышенная
7	0,5-1,0	0,45-0,9	0,5-1,0	0,65-1,30	0,15-0,30	То же	То же
8	1,0-5,0	0,9-4,5	1,0-5,0	1,3-6,5	0,3-1,5	Слабоустойчивый	Высокая
9	5,0-10,0	4,5-9,0	5,0-10,0	6,5-13,0	1,5-3,0	То же	То же
10	10,0	9,0	10,0	13,0	3,0	Неустойчивый	Очень высокая

При анализе результатов лабораторных испытаний следует разделять факторы, которые действуют на ход кривой зависимости скорости коррозии от времени.

Такие кривые схематично представлены на рис. 3.

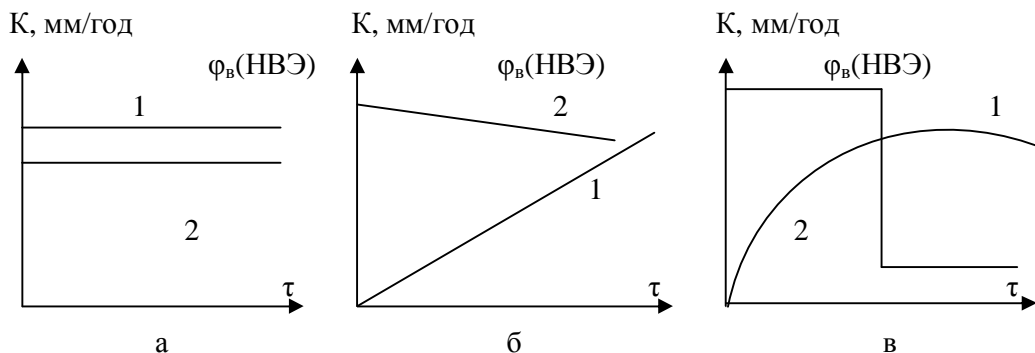


Рис. 3. Диаграммы скорости коррозии и изменение электродного потенциала:

а) агрессивная среда и корродирующая поверхность не изменяются;

б) поверхность металла становится менее коррозионностойкой,

а агрессивность среды повышается;

в) скорость коррозии проходит через максимум.

Кривая 1 на рис. 3а характеризует процесс, когда агрессивная среда и корродирующая поверхность не изменяются. Это же подтверждает и изменение потенциала коррозии (кривая 2), который также в процессе коррозии не изменяется.

Кривая 1 на рис. 3б характеризует процесс, в котором поверхность металла становится менее коррозионностойкой или то, что коррозионная среда становится более агрессивной. Подобный случай имеет место при коррозии нержавеющей стали, как в соляной кислоте, так и в кипящей концентрированной азотной кислоте. При этом отмечается заметное облагораживание электродного потенциала кр 2.

Кривая 1 на рис. 3в относится к случаю, когда скорость коррозии проходит через максимум с увеличением продолжительности испытаний. Это обусловлено пассивацией поверхности стали за счет обогащения агрессивной среды пассивирующими солями. Об этом также свидетельствует изменение электродного потенциала (кр 2), который по достижении максимума коррозии резко облагораживается, переводя сталь в пассивное состояние. К примеру, коррозия стали 12Х18Н10Т в 10 %-ном растворе азотной кислоты с добавкой ионов хлора $10,0 \div 3,0$ %.

Поэтому, наряду с определением скорости коррозии образцов конструкционных материалов в соответствии с РД 24.200.16-90 необходимо параллельное определение электродного потенциала, который позволяет судить как об изменениях состояния поверхности исследуемого металла, так и состава коррозионной среды.

Испытания под атмосферным давлением проведены в колбах и сосудах с обратными холодильниками. Для испытаний под давлением при температурах более высоких, чем температура кипения среды, испытания проводятся в специальных автоклавах (рис. 4).

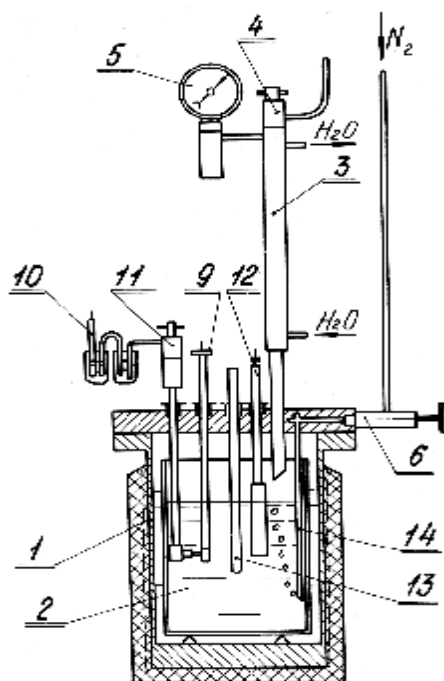


Рис. 4. Схема автоклава коррозионно-электрохимических исследований под давлением при повышенных температурах:

1 – корпус; 2 – ячейка из фторопласта или в эмалированном исполнении; 3 – конденсатор, 4 – клапан, 5 – манометр, 6 – вентиль игольчатый, 7, 8 – токопровод, 9 – рабочий электрод, 10 – электрод сравнения, 11 – шаровый вентиль из фторопласта, 12 – вспомогательный электрод из платины, 13 – карман для термопары, 14 – трубки для подачи инертного газа

При этом фиксируется потенциал исследуемой стали и, при необходимости, исследуется ее коррозионное поведение, как в активной области, так и в области устойчивого пассивного состояния.

В связи с тем, что химическое и особенно тепломассообменное оборудование зачастую подвержено щелевой коррозии разработана и внедрена в практику исследований методика определения коррозионной стойкости материалов, работающих в щелях, зазорах, застойных зонах.

Методика рассмотрена специализированными НИИ и предприятиями отрасли СНГ, одобрена и внесена в "РД по исследованию на склонность к щелевой коррозии", (г. Москва, 1990г.).

Суть ее [5] заключается в том, что капилляр Луггина вводится непосредственно в щель, что дает возможность оперативно улавливать как начало активации металла в щели, так и ее репассивацию, а по разности между потенциалом репассивации и потенциалом коррозии металла в щели ($\Delta\phi = \phi_{\text{рп}} - \phi_{\text{корр}}$) прогнозировать работоспособность металла в щели.

Особенно важно это для теплообменников и греющих камер, изготовляемых из листа.

При толщине листа $0,6 \div 1,0$ мм стойкость металла должна быть не ниже 4 балла стойкости.

Разработаны критерии коррозионной стойкости металла в щели по следующим параметрам: $\Delta\phi_{\text{щк}} = \phi_{\text{щ}} - \phi_{\text{кор}} > 0,05$ В [4].

Сталь коррозионностойка в щели, ее скорость коррозии $< 0,05$ мм/год, при $\Delta\phi_{\text{щк}} > 0,05$ В скорость коррозии нержавеющей сталей – более 0,1 мм/год при язвенном характере разрушений.

Указанная методика прошла многолетнюю апробацию в лабораториях и на стендах ОАО "УкрНИИхиммаш" и постоянно применяется при выборе коррозионностойких материалов для разработки и изготовления химического оборудования.

Склонность конструкционных материалов и их сварных соединений к коррозионному растрескиванию (КР) определяется в соответствии с РТМ 26-01-38-70 и РТМ 26-01-45-71.

Учитывая, что в сварной конструкции определяющими подверженности конструкции КР являются остаточные сварочные напряжения в «ОАО УкрНИИхиммаш» для испытаний на склонность к КР отдается предпочтение кольцевым образцам диаметром 130мм с вваренным диском диаметром 40мм (проба Стеклова О.И) [6, 7].

При этом определяется потенциал основного металла, зоны термического влияния и металла шва, что позволяет судить об электрохимической гетерогенности сварного соединения.

Склонность сварных соединений к МКК определяется в соответствии с ГОСТ 6032-89.

В таблице 4 приведены основные группы параметров, которыми необходимо пользоваться при выборе материалов для конструирования оборудования.

Основные группы параметров, которыми следует руководствоваться при
выборе материалов

№ п/п	Параметр	Оборудование (и условия его работы) при выборе материала, для которого должен быть учтён данный параметр
1	2	3
Основные группы параметров		
1. Коррозионная стойкость		
1	Стойкость против общей (равномерной) коррозии со стойкостью до 0,1 мм/год для элементов теплообменного оборудования и до 0,5 мм/год для корпусов и днищ	Параметр определяется по справочным данным, экспериментальным исследованиям коррозионно-электрохимического поведения в реальных или модельных средах. При контакте разнородных металлических материалов следует учитывать возможность работы гальванической пары (контактной коррозии) с учётом соотношения контактирующих поверхностей в реальной конструкции.
2	Стойкость против межкристаллитной коррозии, глубина поражений не более 30 мкм	Оборудование (включая сварные соединения) из сталей и сплавов на железоникелевой, никелевой и алюминиевой основе, работающее в средах, вызывающих межкристаллитную коррозию.
3	Стойкость против точечно-язвенной (ТЯК) и щелевой коррозии $\Delta\phi = \phi_{\text{рщд}} - \phi_{\text{кор}} \geq 0,05\text{В}$	Оборудование из коррозионностойких сплавов на железоникелевой и алюминиевой основе, титана, циркония и сплавов на их основе работающее в средах, вызывающих точечно-язвенную и щелевую коррозию. Ускоренные электрохимические исследования в рабочих или модельных средах позволяют прогнозировать подверженность т-я и щелевой коррозии металла в конструкции в зависимости от наличия застойных зон. Контакта с прокладочными материалами и др.
4	Стойкость против коррозионного растреск.	Оборудование из всех сталей и сплавов, работающее в средах, вызывающих коррозионное растрескивание.
5	Стойкость против структурно-избирательной коррозии	Главным образом оборудование из коррозионностойких сталей аустенитно-ферритного класса, латуней и сварные соединения коррозионностойких сталей аустенитного класса.
6	Стойкость против коррозионно-эрозионного износа	Реакционное и другое оборудование с перемешивающими устройствами из коррозионно-стойких сталей и сплавов на железоникелевой, титановой и алюминиевой основе.
7	Жаростойкость	Оборудование, работающее при температуре выше 600°C.

Продолжение табл. 4

1	2	3
8	Стойкость против обезуглероживания	Оборудование из углеродистых низколегированных и легированных конструкционных сталей, работающее в контакте с водородсодержащими средами при температуре выше 200°C, а также упругие элементы.
2 Механические свойства		
1	Временное сопротивление σ_B	Все виды химического оборудования
2	Предел текучести $\sigma_{0,2}$	
3	Предел текучести $\sigma_{0,1}$	Оборудование из сталей, у которых диаграмма растяжения с длинным и пологим участком упрочнения. Использование $\sigma_{0,1}$ позволяет применять допускаемые напряжения, повышенные на 12-15%.
4	Отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$	Высоконагруженные детали, работающие в особо агрессивных, токсичных и взрывоопасных средах. При прочих равных условиях $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ должно быть минимальным.
5	Относительное удлинение δ	Все виды химического оборудования. Параметр определяет технологичность выбранных сталей и сплавов и конструкцию вальцуемых и штампуемых деталей. Регламентируется ОСТ по технике безопасности.
6	Относительное сужение ψ	Оборудование, рассчитываемое на малоцикловую усталость (в уравнениях Ленджера, Коффина-Мэнсона). Параметр характеризует долговечность при небольшом (до 10^4) числе циклов нагружения. Параметр используется при выборе технологических режимов и при определении вида разрушения испытываемых образцов или опытного оборудования.
7	Ударная вязкость (КСУ или КСВ) при комнатной и отрицательных температурах	Все виды химического оборудования
8	Ударная вязкость при комнатной температуре после нагрева при повышенных температурах (старение)	Аппаратура, эксплуатируемая при температуре выше 200°C
9	Малоцикловая усталость	Сосуды и аппараты периодического нагружения (с числом циклов более 10^3). Параметр учитывается по значению ограниченного предела усталости материала.

Продолжение табл. 4

1	2	3
10	Предел выносливости	Циклически нагружаемые конструкции.
11	Трещиностойкость (вязкость разрушения) K_{IC}	Оборудование из высокопрочных материалов, а также материалов, работающих при низких температурах. Критический коэффициент напряжений K_{IC} даёт возможность определить допустимый размер дефекта в материале, или допустимое напряжение в конструкции с дефектом. Параметр должен учитываться при выборе стали или сплава повышенной и высокой прочности. Не учитывается для сталей аустенитного класса.
12	Трещиностойкость (вязкость разрушения) при воздействии коррозионной среды $K_{ISC} C$	Высоконапряженные детали, эксплуатирующиеся в средах, вызывающих коррозионное растрескивание.
13	Трещиностойкость (работа распространения трещин) K_{CT}	Сильно нагруженные детали машин и аппаратов (в качестве сравнительной характеристики). Параметр не учитывается при назначении сталей и сплавов аустенитного класса.
14	Временное сопротивление при повышенных температурах σ_v^t	Все виды химического оборудования, эксплуатируемое при повышенных температурах.
15	Предел текучести при повышенных температурах $\sigma_{0,2}^t$	То же, что в п. 2.2
16	Предел текучести при повышенных температурах	То же, что в п. 2.3
17	Относительное удлинение при повышенных температурах δ^t	То же, что в п. 2.5
18	Относительное сужение при повышенных температурах ψ^t	То же, что п. 2.6
19	Предел длительной прочности при 10^5 ч $\sigma_{10^5}^t$	Оборудование, при расчёте которого необходимо учитывать ползучесть материала (для углеродистых сталей при температуре более 380 °С, для аустенитных – более 525 °С, для низколегированных – более 420 °С)
20	Предел ползучести $\sigma_{1\% \times 10^5}$ при 1%-ной деформации	

Продолжение табл. 4

1	2	3
21	Удельная прочность σ_B/γ (здесь γ - плотность)	Детали и узлы химического оборудования, когда масса является одним из наиболее существенных факторов нагруженности (например, роторы и диски центробежных машин)
22	Твёрдость HB, HRC, HV	Все виды оборудования. Параметр определяет механическую обрабатываемость и износостойкость, а также стойкость к сероводородному охрупчиванию.
23	Коэффициент анизотропии β	Детали, для которых необходимо учитывать Механические свойства исходного материала в различных направлениях, например, в плоскости листа, по его толщине (роторы, диски, фланцы, приваренные встык и др.)
24	Переходная температура хрупкости $T_{хр}$	Все виды оборудования. Параметр не учитывается при выборе сталей и сплавов аустенитного класса, титана и алюминия.
3 Технологические свойства Обрабатываемость давлением		
1	Максимальная степень деформации при осадке за один нагрев	Конструкции с большим удельным весом деталей, изготавливаемых из поковок.
2	Минимальный радиусгиба в холодном состоянии	Конструкции с большим числом деталей, изготавливаемых методом гибки.
3	Минимальный радиусгиба в горячем состоянии	
4	Минимальный коэффициент вытяжки в холодном состоянии	Детали, подлежащие изготовлению методом вытяжки (колпачки, крышки и др.)
5	Минимальный коэффициент вытяжки в горячем состоянии	
6	Возможность штамповки днищ в холодном и горячем состоянии с требуемым отношением диаметра днища к толщине D/s	Сосуды и аппараты с выпуклыми (в основном эллиптическими) днищами, элементами с отбортовкой (конические отбортованные днища, горловины, переходные обечайки, отбортовки рубашек и т.п.)

Продолжение табл. 4

1	2	3
7	Технологичность труб при развальцовке, отбортовке	Теплообменные аппараты
Свариваемость		
8	Углеродный эквивалент C_{Σ}	Сварные сосуды и аппараты. Параметр характеризует склонность сталей к закалке при сварке, а также склонность к водородному охрупчиванию.
9	Допустимые способы сварки	Сварное оборудование, особенно крупногабаритное, требующее сварки при монтаже.
10	Склонность к образованию горячих трещин в сварном соединении	Сварные конструкции из высоколегированных сталей и сплавов.
11	Склонность к образованию холодных трещин в сварном соединении	Сварные детали и узлы из низколегированных, среднелегированных и углеродистых (с 0,22-0,25%) сталей и сплавов титана.
12	Необходимость соответствующего подогрева при сварке	Оборудование из легированной стали, в которой при сварке в процессе охлаждения возможно образование закалочных структур, а также оборудование, требующее снятия остаточных напряжений для работы в средах, вызывающих КР.
13	Необходимость проведения термообработки после сварки	Оборудование из легированной стали, в которой при сварке в процессе охлаждения возможно образование закалочных структур, а также оборудование, требующее снятия остаточных напряжений.
14	Возможные методы дефектоскопии сварных швов	Сварное оборудование, к которому предъявляются повышенные требования по ограничению дефектов.
15	Коэффициент прочности сварных соединений	Параметр учитывает при прочностных расчётах сварного оборудования
16	Угол статического изгиба сварного соединения	Все виды сварного химического оборудования
17	Ударная вязкость металла шва и зоны термического влияния при комнатной и отрицательных температурах	
18	Стойкость сварных соединений против ножевой коррозии	Химическое оборудование из коррозионностойких стабилизированных сталей и сплавов на железоникелевой основе для сред, содержащих азотную кислоту с ионом фтора, а также сред производства карбамида и др.

Продолжение табл. 4

1	2	3
19	Склонность сварных соединений к охрупчиванию при повышенных температурах	Сварные аппараты, эксплуатируемые при повышенных температурах или подвергаемые термообработке после сварки.
20	Возможность композиционной сварки	Оборудование, создаваемое из разных видов или марок конструкционных материалов
21	Коэффициент относительной обрабатываемости резанием	Для сравнительной оценки, особенно для оборудования с большим объёмом обработки резанием при его изготовлении
Термообрабатываемость		
22	Необходимость термообработки	Все виды химического оборудования
23	Возможность выполнения требуемой термообработки	Крупногабаритное оборудование, а также оборудование сложной конфигурации и тонкостенное с учётом допустимого коробления, изменения химического состава в поверхностных слоях, отсутствия склонности к МКК, образованию трещин и т.д.
24	Прокаливаемость	Детали, упрочняемые закалкой.
25	Склонность к охрупчиванию при термообработке	Оборудование из сложнлегированных сталей и сплавов, а также конструкционных сталей, подвергаемое термообработке.
26	Температурный интервал нагрева при термообработке на твёрдый раствор	Оборудование из коррозионностойких сплавов аустенитного класса.
27	Критические точки мартенситного превращения M_H , M_K , и точка A_{C1}	Разные виды оборудования из углеродистой и легированной сталей, параметр определяется с целью обеспечения стабильности структуры в интервале температур эксплуатации и при назначении режима термообработки.
28	Склонность к насыщению газами при термообработке	Оборудование из коррозионностойких сталей и сплавов титана, ниобия.
29	Возможность местной термообработки	Крупногабаритные изделия, изделия сложной формы.
Литейные свойства		
30	Температура заливки	Отливки сложной формы из легированных и высоколегированных сталей и сплавов
31	Линейная усадка	
32	Жидкотекучесть $K_{жт}$	
33	Трещиностойчивость $K_{ту}$	

Продолжение табл. 4

1	2	3
34	Склонность к образованию усадочной раковины	Отливки сложной формы из легированных и высоколегированных сталей и сплавов
35	Необходимость термообработки отливок	
36	Возможность применения ультразвукового, радиального, капиллярного, магнитного и электромагнитного методов контроля отливок и поковок	Все виды изделий, к которым предъявляются требования по ограничению внутренних и наружных дефектов.
4 Химический состав		
1	Максимальное содержание углерода	Все виды оборудования (с целью обеспечения требуемых коррозионной стойкости и свариваемости).
2	Максимальное содержание серы	Оборудование высокого давления, упругие элементы и другие ответственные детали (с целью снижения хладноломкости и красноломкости, повышение чистоты металла, коррозионной стойкости, в том числе водородостойкости в сероводородсодержащих средах, и ударной вязкости).
3	Максимальное содержание фосфора	
4	Максимальное содержание азота	Оборудование из углеродистых и низколегированных сталей, работающих при повышенных температурах
5	Минимальное содержание хрома	Все виды оборудования из коррозионностойких сталей и сплавов (с целью обеспечения требуемой коррозионной стойкости)
6	Минимальное содержание никеля	
7	Минимальное содержание молибдена	
8	Минимальное содержание меди	
5 Микроструктура		
1	Размер зерна в состоянии поставки	Оборудование, к которому предъявляются требования по радиационной стойкости и стойкости против МКК
2	Балл по неметаллическим включениям	Отдельные детали аппаратуры высокого давления упругие элементы, крепёжные изделия и др.

Продолжение табл. 4

1	2	3
3	Структура в термообработанном состоянии; ограничение содержания в структуре интерметаллидных фаз	Отдельные виды химического оборудования, требующего ограничения содержания α/γ -фазы в структуре металла швов аустенитферритного класса, σ -фазы в коррозионно-стойких сталях и их сварных соединениях, науглероженого слоя в металле и др
6 Физические свойства		
1	Теплопроводность	Все виды теплообменного оборудования.
2	Коэффициент линейного расширения α	Оборудование, испытывающее температурные напряжения в результате соединения различных конструктивных элементов, применение материалов с различным коэффициентом линейного расширения.
3	Плотность γ	То же, что в п.2.21
4	Температура плавления $T_{пл}$	Оборудование, эксплуатируемое при высоких температурах. Параметр определяет максимально допустимую рабочую температуру в зависимости от температуры рекристаллизации ($T_p = 0,4 T_{пл}$)
7 Антифрикционные свойства		
1	Коэффициент трения	Трущиеся детали (пары трения), резьбовые соединения, элементы фрикционных передач.
2	Скорость изнашивания	
3	Отсутствие склонности к схватыванию и заеданию	

Выводы:

1. Обоснованы пути исследования и выбора коррозионностойких конструкционных материалов при разработке новых конструкций для химической, нефтехимической и газовой промышленности и показана необходимость учета двух групп факторов, зависящих как от внешних рабочих условий (температура, давление, состав среды, примеси), так и от внутренних, связанных со свойствами исследуемого материала – его дефектностью, фазовым составом, примесями, гетерогенностью основного металла и его сварных соединений.

2. Обобщен опыт коррозионно-электрохимических исследований, применяющихся в ОАО «УкрНИИхиммаш», для разработки рекомендаций на конструкционные и сварочные материалы, обеспечивающих заданный ресурс работы разрабатываемого оборудования.

Список литературы: 1. Данилов Ю.Б. Научно-практические основы создания энергосберегающего теплообменного и выпарного оборудования химических производств: дис. ... доктора техн. наук / Ю.Б. Данилов. – Харьков, 2009. 2. Никольс Р. Конструирование и технология изготовления сосудов давления / Р. Никольс; [пер с англ.]. – М.: машиностроение, 1975. – 404 с. 3. Скорчелет-

ти В.В. Теоретические основы коррозии металлов / В.В. Скорчелетти. – Л.: Химия, 1973. – 273 с. 4. Метод определения показателей коррозии и коррозионной стойкости; ГОСТ 9.908-85. 5. Качанов В.А. Точечно-язвенная и щелевая коррозия аустенитных сталей в оборотных водах / В.А. Качанов, Л.А. Ключникова, Т.А. Балак. / Вестник Харьковского ГПТУ. – 2000. – Вып. 115. – С. 61. 6. Стеклов О.И. Прочность сварных конструкций в агрессивных средах / О.И. Стеклов. – М.: Машиностроение, 1976. – 200 с. 7. Соединения сварные. Методы испытаний на коррозионное растрескивание; ГОСТ 26294-84.

Поступила в редколлегию 25.03.10

УДК 661.791.669.14

А.И. КАБАШНЫЙ, Ю.Б. ДАНИЛОВ, докт. техн. наук,
В.Ф. СУЩЕНКО, И.В. ЛЕТКО, ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков,
Украина

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНОЙ ТЕПЛООБМЕННОЙ АППАРАТУРЫ ИЗ ЛИСТА

По результатам досліджень і експериментальних робіт визначена послідовність операцій технологічного процесу виготовлення панельних елементів теплообмінної апаратури із листа методом гідравлічного формування. Основні положення технології були впроваджені при розробці технічного проекту комплексної вакуум-випарної установки з апаратами плівкового типу.

По результатам исследований и экспериментальных работ определена последовательность операций технологического процесса изготовления панельных элементов теплообменной аппаратуры из листа методом гидравлического формирования. Основные положения технологии были внедрены при разработке технического проекта комплексной вакуум-выпарной установки с аппаратами пленочного типа.

According to the results of research and experimental work determined the sequence of process manufacturing operations panel elements heat exchangers from a letter by hydraulic forming. Terms technologies have been introduced in the technical development project of vacuum evaporator with film type cameras.

Решаемые проблемы.

Основными требованиями, предъявляемыми к теплообменному оборудованию из листа, в том числе и к выпарному, являются: интенсификация процесса, снижения металлоемкости, увеличения надежности.

Этим требованиям наиболее отвечают аппараты с панельными греющими камерами, в которых теплообмен осуществляется в пленочном режиме,

обеспечивающем высокий коэффициент теплопередачи, возможность работы при малых полезных разностях температур, незначительное время пребывания раствора в аппарате, что имеет определяющее значение при упаривании термонестойких растворов.

Панельный элемент поверхностью 1 м^2 эквивалентен $1,5 \text{ м}^2$ трубчатой поверхности нагрева.

Разница в расходе металла на изготовление 1 м^2 панельного элемента составляет 45 кг.

На 1 м^2 панельного элемента экономится 45 кг нержавеющей стали, наиболее часто применяемой для изготовления выпарных аппаратов для агрессивных сред.

В аппаратах с панельными греющими создаются лучшие условия сепарации вторичного пара, на панелях снижается накипеобразование ввиду мягких условий ведения процесса упаривания при пониженных температурных нагрузках [1].

Установки требуют меньшей строительной высоты зданий.

Проблемным вопросом в данной ситуации является технологическая возможность изготовления такого оборудования из листа.

Постановка задачи.

Создание технологии изготовления панельных элементов.

Панельные элементы изготавливались способом формовки гидравлическим выпучиванием.

Суть способа заключается в придании изделию необходимой формы посредством подаваемой под давлением воды.

Его характеризует высокая точность изготовления, невысокая трудоемкость процесса и хороший внешний вид готовых изделий.

Гидравлическое формование обеспечивает получение деталей сложной формы.

Универсальность и простота используемого инструмента, приспособлений и оборудования позволяет применять этот способ не только в массовом и серийном, но и в мелкосерийном производстве.

Опытные образцы панелей изготовлены из стали 12Х18Н10Т толщиной 1 мм.

Приспособление для их изготовления представляет собой 2 разъемные матрицы с посаженными в отверстия штифтами, формирующая часть которых

имеет сферическую форму.

Полость, в которой происходит гидроформование, образуется посредством приварки ребер к верхней и нижней плитам.

Этими же ребрами производится швов панелей, выполненных контактной шовной сваркой.

Размеры формующей полости 1470×500 мм.

В верхней плите имеются 2 отверстия для выхода штуцеров, приваренных к верхней пластине панели и предназначенных для подачи и спуска воды.

Центрирование панелей в приспособлении производится посредством штуцеров.

По периметру матриц предусмотрены отверстия под болты.

Приварка точек на панелях под дистанционные упоры выполнялась на точечной машине МТПР-25.

Процесс гидроформования проходил под давлением 5 – 6 МПа.

Схема процесса гидроформования (рис. 1).

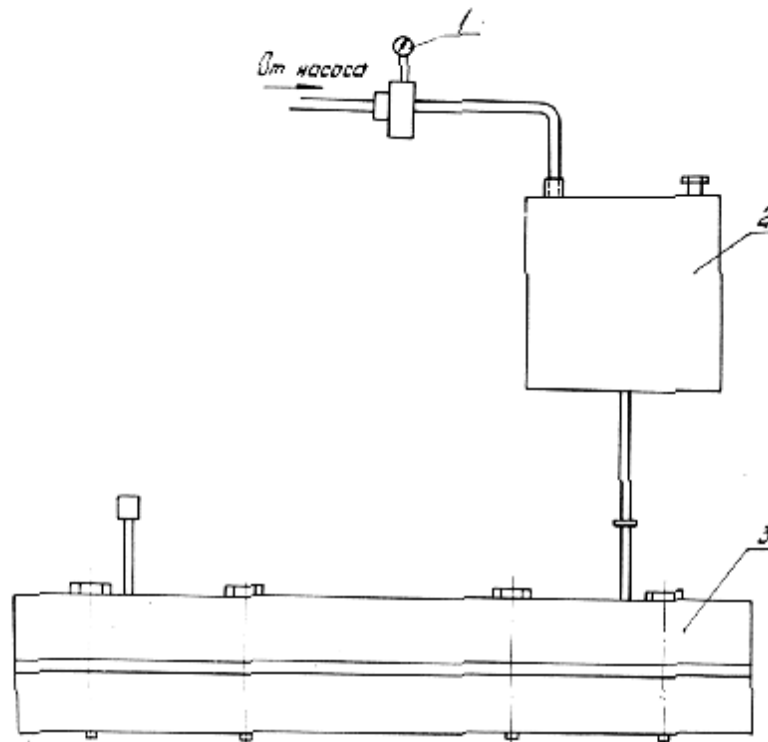


Рис.1. Схема процесса гидроформования

1 – манометр; 2 – промежуточная емкость; 3 – приспособление в сборе с панелью

Внешний вид панелей после гидроформования (рис. 2).

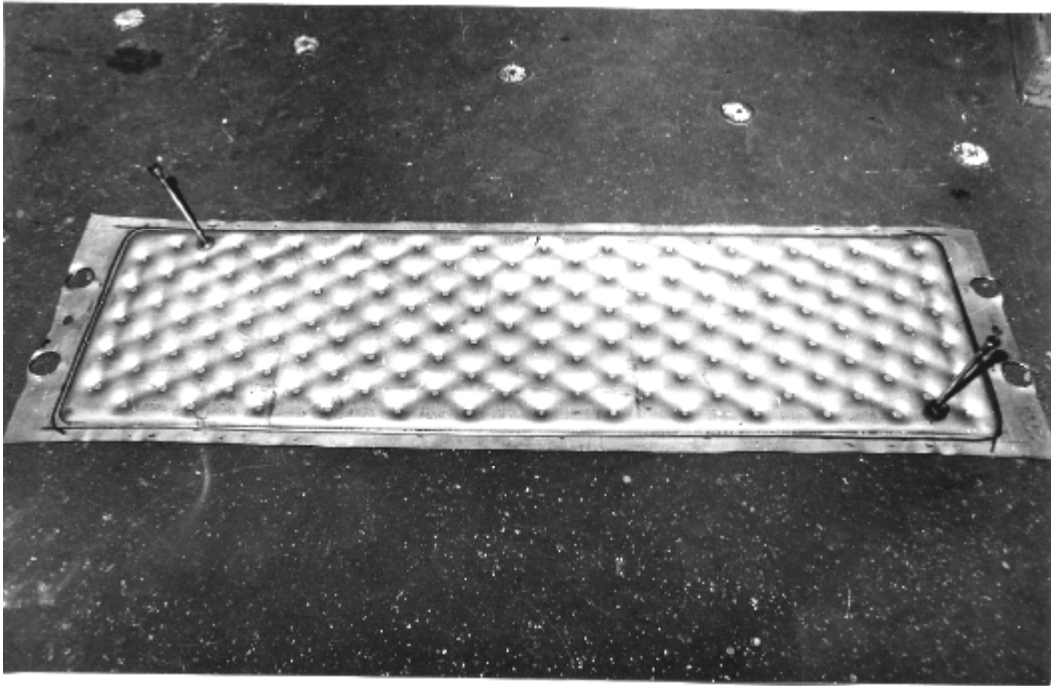


Рис. 2. Внешний вид панели после гидроформования

Для исследования теплогидродинамических процессов были изготовлены опытные образцы греющих камер.

Сборка панелей в пучок выполнялась при помощи гребенки, к которой по контуру приваривались панели.

К гребенке, сверху панели, приварена сферическая часть с отверстием для входа пара, а внизу – для вывода конденсата. В верхней части панели крепится распределительное устройство.

Опытный образец греющей камеры состоит из 3-х панелей (рис. 3).

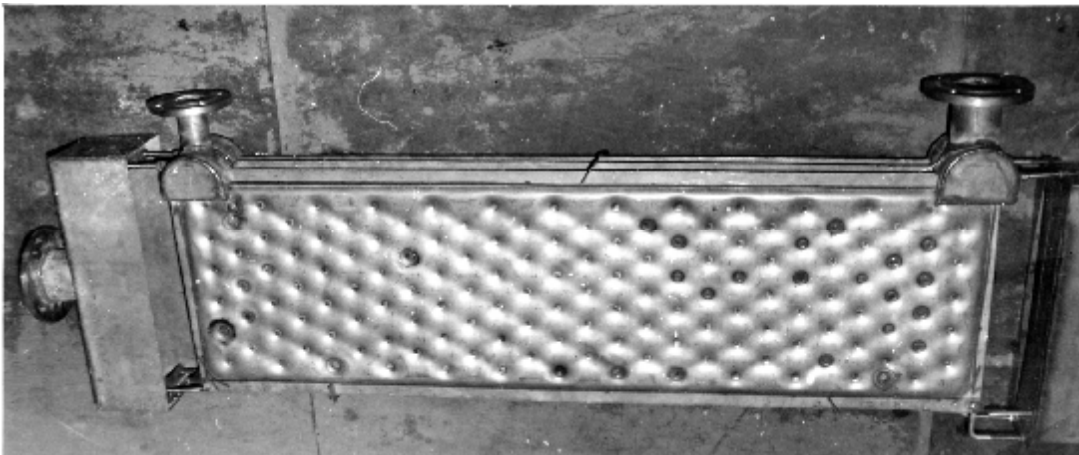


Рис. 3 Панельная греющая камера из 3-х панелей с распределительным устройством

Выводы.

По результатам экспериментов определена последовательность операций технологического процесса гидроформования, подобрано оборудование и оснастка для изготовления панельных элементов и контроля качества сборки и сварки. Для одной из основных операций – сварки точек – рекомендуется специальный двухдуговой манипулятор УД-424 УХЛ4 конструкции ИЭС им. Е.О. Патона с модернизированной горелкой для сварки неплавящимся вольфрамовым электродом без присадки. Результаты выполненных исследований использованы при разработке технического проекта комплексной вакуум-выпарной установки с аппаратами пленочного типа для упаривания черных сульфатных щелоков. Технология и оснастка позволяют организовать отечественное производство оборудования с панельными греющими элементами.

Список литературы: 1. Федоткин Л.Н. Пленочные теплообменные аппараты и пути интенсификации теплообмена в них. / Л.Н. Федоткин, В.Ф. Фирсюк. – К.: Техника, 1969. – 92 с.

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,
Л.С. МОЛОДЦОВА, ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина

РЕГЕНЕРАЦИЯ РАСТВОРОВ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЦИРКОНИЯ

Об'єктом досліджень є водний рафінатний розчин, отриманий на стадії екстракції цирконію та гафнію, якій містить сполуки з'єднань, алюмінію, заліза, титану, нікелю. Проведені дослідження і отримані практичні результати по концентруванню, перегонці і ректифікації рафінатних розчинів азотної кислоти та утилізації кубових залишків.

Объектом исследования является рафинатный раствор, получаемый на стадии экстракции циркония и гафния, содержащий с примесями соединения, алюминия, железа, титана, никеля. Проведен-

ны исследования и получены практические результаты по концентрированию, перегонке и ректификации рафинатных растворов азотной кислоты, проверке пожароопасности и утилизации кубовых остатков.

The object of research is rafinatnyy aqueous solution obtained at the stage of extraction of zirconium and hafnium compounds which contain compounds of aluminum, iron, titanium, nickel. Conducted research and practical results obtained by concentration, distillation and rectification rafinatnyh solutions of nitric acid and waste residue disposal.

Решаемые проблемы. Объектом исследования является рафинатный раствор азотной кислоты, получаемый на стадии экстракции циркония и гафния, содержащий с примесями соединения, алюминия, железа, титана, никеля. Данный раствор не может быть использован в технологическом цикле и подлежит регенерации. Литературные данные по регенерации отработанной азотной кислоты отсутствуют. Из опыта разработок ОАО «УкрНИИхиммаш» наиболее перспективным является метод термического обессоливания.

Постановка задачи. Целью данной работы является определение физико-химических свойств отработанных растворов азотной кислоты, определение параметров, режимов, условий разделения парогазовой смеси, содержащей 18 – 20 % массовых HNO_3 и $0,12 \text{ г/дм}^3$ ионов фтора, с целью получения дистиллята и очищенного раствора азотной кислоты с концентрацией 47 % и разработка способа утилизации кубовых остатков.

Методика исследований. Методика концентрирования растворов азотной кислоты. Концентрирование растворов азотной кислоты в диапазоне концентраций (масс. % по основному веществу) от 22 до 65 производили в соответствии с разработанной программой на экспериментальной установке, смонтированной в химической лаборатории ОАО «УкрНИИхиммаш». Экспериментальная установка состоит из: реактора изготовленного из титана ВТ1 – 0 (представляет собой цилиндрическую емкость, вместимостью 5 дм^3 , со встроенным погружным фторопластовым кипятильником, площадью поверхности теплообмена $0,12 \text{ м}^2$); холодильника – конденсатора для конденсации вторичных паров (площадь поверхности теплообмена $0,3 \text{ м}^2$, изготовлен из стали 12Х18Н10Т); колбы – приемника для сбора конденсата вторичных паров (вместимость 2 дм^3 ; изготовлена из стекла).

Режим концентрирования контролировали термометром со шкалой $0 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$ и ценой деления $1 \text{ }^\circ\text{C}$, для чего в корпусе реактора вмонтирована гильза для установки термометра.

Контроль концентрации раствора азотной кислоты осуществляли грубо по объему полученного конденсата, температуре кипения и точно титрометрическим способом 0,1 н раствором NaOH с индикатором метиловым оранжевым. Температуру кипения определяли с помощью ртутного термометра с шкалой 0 – 200 °С. Отделение осадка проводили на вакуум-фильтре и фильтре Шота.

Fe, Ti, Al – определяли фотоколориметрическим методом; Ni и Cr – атомно-абсорбционным методом; Zr – рентгенофлуоресцентным методом; фтор – потенциометрическим методом с фтор селективным электродом.

Кинематическую вязкость определяли с помощью капиллярного вискозиметра ВПЖ-2. Определение плотности проводили с помощью набора ареометров и пикнометрически.

Теплоемкость раствора определялась следующим образом.

В термостатированную емкость заливается теплая вода известного объема (300 – 400 мл) и измеряется температура ($T_{исх.}$). Емкость с исследуемой жидкостью объемом 50 – 100 мл при комнатной температуре, которую измеряют вторым термометром, помещают в ту же емкость. Жидкость нагревается в результате контакта с водой до балансовой температуры ($T_{ср}$), которая фиксируется одновременно двумя термометрами в воде и в исследуемой жидкости.

Получение очищенной азотной кислоты концентрацией не менее 47 % масс и проводили на лабораторной установке, предназначенной для отработки режимов ректификации азотной кислоты. Установка состоит из ректификационной колонны высотой 1,5 м, диаметром 80 мм, испарителя $F = 0,82 \text{ м}^2$ и дефлегматора $F = 2 \text{ м}^2$. В колонну в качестве питания подается вторичный пар, содержащий 18 – 20 масс. % HNO_3 . Колонна оснащена контактными устройствами – ситчато-клапанными тарелками, на которых происходит массообмен, в результате которого образуется водяной пар, содержащий фтористоводородную кислоту HF и 0,1 % раствор азотной кислоты. Пар выходит из верхней части колонны, раствор азотной кислоты стекает в кубовую ее часть. Часть азотной кислоты из куба колонны поступает в испаритель, где перегревается и поступает обратно в кубовую часть колонны. Водяной пар из колонны поступает в дефлегматор, где конденсируется. Часть полученного дистиллята поступает на верхнюю тарелку в качестве флегмы. Испаритель представляет собой вертикальный кожухотрубчатый теплообменник, в трубки которого поступает раствор азотной кислоты, а в межтрубное простран-

во подается греющий пар.

Дефлегматор представляет собой горизонтальный кожухотрубчатый теплообменник, в межтрубное пространство которого подается вода.

Обработка кубовых остатков. Отработку процесса утилизации кубовых остатков проводили на двухшнековой реакторно-смесительной машине (рис. 1).

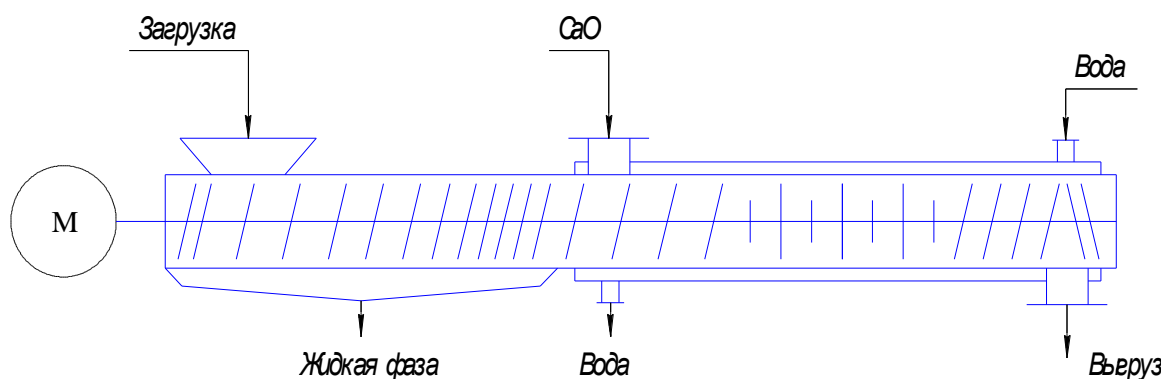


Рис. 1. Двухшнековая реакторно-смесительная машина

Аппарат состоит из корпуса, двух шнеков, раздвоителя мощности, привода и рамы.

Внутренняя поверхность секций корпуса выполнена в виде цилиндров, пересекающихся по образующей. Корпус состоит из двух типов секций, имеющих разное предназначение. Первый тип – фильтрующая – имеет отверстия, через которые удаляется жидкая фаза. Второй тип – смесительная, снабженная рубашкой, с помощью которой отводится тепло, выделяемое в результате реакции нейтрализации.

Внутри корпуса машины установлены два взаимозацепляющихся шнека, которые представляют собой валы с агрегатируемыми на них с помощью шпонок червячными насадками с правой и левой нарезкой витков и смесительными элементами – кулачками (могут быть различной конфигурации). При этом витки одного шнека входят с расчетным минимальным зазором во впадины другого и наоборот, что обеспечивает надежную очистку шнеков от материала и в тоже время транспортирование его. Шнеки приводятся во вращение раздвоителем мощности. Валы раздвоителя соединены с валами шнеков с помощью шлицевых муфт. Привод включает в себя стандартный электродвигатель и редуктор, установленные на раме. Исходный материал подается внутрь аппарата, подхватывается витками шнека и продвигается в на-

правлении выгрузки. По мере продвижения объем витка уменьшается, и жидкая фаза через отверстия в корпусе фильтруется, собирается в поддоне и удаляется из аппарата, а твердая фаза смешивается с нейтрализатором и выгружается из аппарата.

Экспериментальная часть. На исследования поступили растворы азотной кислоты концентрацией 23 – 25, 35, 56, 62 – 65, 47 масс. %.

Физико-химические характеристики исходного, промежуточного и конечного продуктов приведены в табл. 1 [1 - 2].

Таблица 1

Физико-химические свойства растворов азотной кислоты

№ п/п	Концентрация, масс. %	Плотность (30 °С), г/см ³	Температура кипения, °С	Коэффициент динамической вязкости (30 °С), спз	Удельная теплоемкость, $\frac{\text{ккал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$, (40 °С)	Теплопроводность, 100 °С, $\frac{\text{ккал}}{\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}}$ *
1	25	1,14	104	1,07	0,802	0,509
2	35	1,209	108	1,25	0,76	0,473
3	56	1,39	119	1,69	0,682	0,4
4	Регенерированная кислота (47 %)	1,31	114	1,6	0,693	0,418
5	Конденсат	1,001	100	1,001	0,998	0,535

* – теплопроводность принята по литературным данным

Концентрирование и перегонка раствора азотной кислоты. Для исследования заказчиком представлен раствор азотной кислоты следующего состава: HNO_3 – 424 г/дм³, ТБФ – 0,03 г/дм³, Zr – 0,7 г/дм³, Al – 0,013 г/дм³, Fe – 0,12 г/дм³, Ni – 0,022 г/дм³, Cr – 0,006, г/дм³, F – 0,1 г/дм³, Si – 0,04 г/дм³. В связи этим, для достижения требуемой концентрации (не менее 47 масс. %) принят процесс упаривания раствора отработанной азотной кислоты под атмосферным давлением.

На опытной установке был отработан процесс одноступенчатого упаривания раствора азотной кислоты до азеотропной смеси 68,4 % [3]. В установку было помещено 3 дм³ 35 % исходной отработанной азотной кислоты. Объем куба после упаривания составил 0,85 дм³. В процессе упаривания наблюдалось образование хлопьевидной массы органического происхождения в объеме и выпадение кристаллов солей металлов.

В связи с этим было проведено концентрирование раствора азотной кислоты в две стадии:

- На первой стадии концентрирование раствора азотной кислоты в диапазоне концентраций (масс. % по основному веществу) от 35 до 50 – 51. Упаривание проводили при начальной температуре $t = 106\text{ }^{\circ}\text{C}$ и до температуры $t = 111\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответствующей концентрации раствора азотной кислоты 50 – 51 %, упаренный раствор фильтровался на фильтре Шота, осадок представляет собой пленки и волокна органического происхождения (органическая взвесь). Осадок имеет следующий состав: Zr = 0,07 %, Al = 0,125 %, Fe = 0,01 %, Cr = 0,034, Ni = 1,2 %. Вторичный конденсат содержит 22 – 25 масс. % азотной кислоты и 0,12 г/дм³ ионов фтора. Количество влажного осадка, образующегося в процессе концентрирования кислоты, достигает 3,9 г из 1 л исходной 35 % азотной кислоты. Масса сухого осадка составляет 0,8 г с литра исходной 35 % отработанной азотной кислоты. После отмывки дистиллированной водой и сушки нерастворимого остатка масса его составила 0,35 – 0,45 г на 1 литр исходной кислоты. Сухой осадок содержит 24 % циркония. Результаты исследований представлены в табл. 2.

- На второй стадии было проведено концентрирование фильтрата раствора азотной кислоты в диапазоне концентраций (% масс. по основному веществу) от 50 – 51 до 62 – 65, что соответствует температуре кипения $t = 122\text{ }^{\circ}\text{C}$ (результаты эксперимента представлены в табл. 3).

Таблица 2

Результаты исследований по концентрированию рафинатного раствора на первой стадии

№ п/п	Объем упариваемого раствора, V (дм ³)	Концентрация азотной кислоты в упариваемом растворе, %	Объем кубового остатка, V (дм ³)	Концентрация азотной кислоты в кубовом остатке, %	Объем конденсата, V (дм ³)	Концентрация азотной кислоты в конденсате, %
1	3	35	1,5	50	1,5	22
2	3	35	1,4	52	1,6	23,5
3	3	35	1,6	49	1,4	20

Образовавшийся влажный осадок следующего состава: Zr = 0,78 %, Al = 0,04 %, Fe = 2,138 %, Cr = 0,73, Ni = 0,541 %. Ti = 0,1 % отфильтрован. 62 % азотная кислота после фильтрации содержит: Zr – 1 г/дм³, Ti – 0,215 г/дм³, Al – 0,337 г/дм³, Fe – 0,5 г/дм³, Ni – 0,08 г/дм³, Cr – 0,04 г/дм³. Фильтрат упаривался досуха. Суммарная масса сухого осадка,

образовавшегося на второй стадии (после упарки досуха), равна – 13,75 г на 1 литр исходной 35 % азотной кислоты.

Таблица 3

Результаты исследований по концентрированию рафинатного раствора на второй стадии

№ п/п	Объем упариваемого раствора, V (дм ³)	Концентрация азотной кислоты в упариваемом растворе, %	Объем кубового остатка, V (дм ³)	Концентрация азотной кислоты в кубовом остатке, %	Объем конденсата, V (дм ³)	Концентрация азотной кислоты в конденсате, %
1	1,5	50	1,04	60	0,46	55
2	1,5	50	0,9	65	0,6	60
3	1,5	50	0,95	62	0,55	57

В процессе получения 62 – 65 % азотной кислоты образовывался вторичный конденсат азотной кислоты концентрацией 55 – 60 %.

Ионов фтора в конденсате не обнаружено.

В кубовом остатке, образующемся в процессе перегонки, содержится порядка 0,2 г циркония на 1 литр исходной 35 % азотной кислоты.

Ввиду того, что минимальное значение концентрации отработанной азотной кислоты составляет 22 – 25 %, а концентрация кислоты, предоставленная заказчиком, составляет 35 %, была проведена отработка процесса концентрирования на модельном растворе концентрацией 22 – 25 %.

Модельный раствор готовился разбавлением дистиллированной водой 35 % раствора азотной кислоты предоставленного заказчиком.

Результаты эксперимента представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты исследований по концентрированию модельных растворов

№ п/п	Объем упариваемого раствора, V (дм ³)	Концентрация азотной кислоты в упариваемом растворе, %	Объем кубового остатка, V (дм ³)	Концентрация азотной кислоты в кубовом остатке, %	Объем конденсата, V (дм ³)	Концентрация азотной кислоты в конденсате, %
1	3	23	1,8	36	1,2	3
2	3	23	1,82	35	1,18	2,8
3	3	23	1,85	34,8	1,15	3,1

Полученную на первой стадии упаривания модельных растворов 35 % азотную кислоту упаривали до концентрации 56 %.

Для этого $1,8 \text{ дм}^3$ 35 % азотной кислоты упарили до концентрации 56 %, объем кубового остатка составил $1,31 \text{ дм}^3$, концентрация азотной кислоты в конденсате составила 18 – 20 %.

Конденсат направляется на ректификацию для очистки и концентрирования азотной кислоты до 47 – 50 %.

Получение очищенной азотной кислоты методом ректификации.

Ректификационная колонна предназначена для проведения разделения вторичного пара, выходящего с вакуум-выпарных установок и содержащего 4,9 масс. % HNO_3 и 33,5 масс. % HNO_3 , на водяной пар, содержащий не более 0,1 масс. % HNO_3 , и 47%-ный раствор азотной кислоты.

Процесс ректификации должен производиться под вакуумом.

На экспериментальной установке был отработан и проверен режим процесса ректификации.

На колонну подали 17,8 кг кислоты 33,5 масс. % HNO_3 , в результате образовалось: куб – 7,8 кг 48 масс. % HNO_3 , и 10 кг дистиллята с содержанием азотной кислоты не более 0,1 масс. %.

По диаграмме равновесия X-Y (рис. 2) между жидкостью и паром по ЛЛК для раствора азотной кислоты и рабочей линии укрепляющей части ректификационной колонны определены X_F , X_W , а также количество теоретических тарелок в укрепляющей и исчерпывающей части колонны.

Укрепляющая часть колонны ~ 3,1 тарелки; исчерпывающая часть – 2 тарелки.

К.п.д. ситчато-клапанной тарелки ≈ 60 %, следовательно количество практических тарелок составит не менее 10 шт.

На основании расчетов был предложен вариант работы установки ректификации под вакуумом.

Температура верха колонны 45 – 57 °С, низа 60 – 76 °С, работает под вакуумом.

Отработка процесса нейтрализации кубового остатка солей. В реакторно-смесительную машину поместили 200 г суспензии нитратов металлов (Fe, Na, Cr, Al, Zn) и органических примесей (кубовый остаток) полученной при упаривании регенерируемого раствора азотной кислоты, содержащей около 40 % азотной кислоты, а так же осадок, полученный на стадии каустификации отработанного раствора едкого натра.

Добавление осадка полученного на стадии каустификации проводили до получения смеси с рН 7 – 8.

На нейтрализацию пошло 480 г кубового остатка влажностью 37 – 40 %.

Таким образом, на нейтрализацию 1 кг кубового остатка, полученного в процессе регенерации азотной кислоты, необходимо 2,4 кг влажного осадка (1,5 кг в пересчете на сухой).

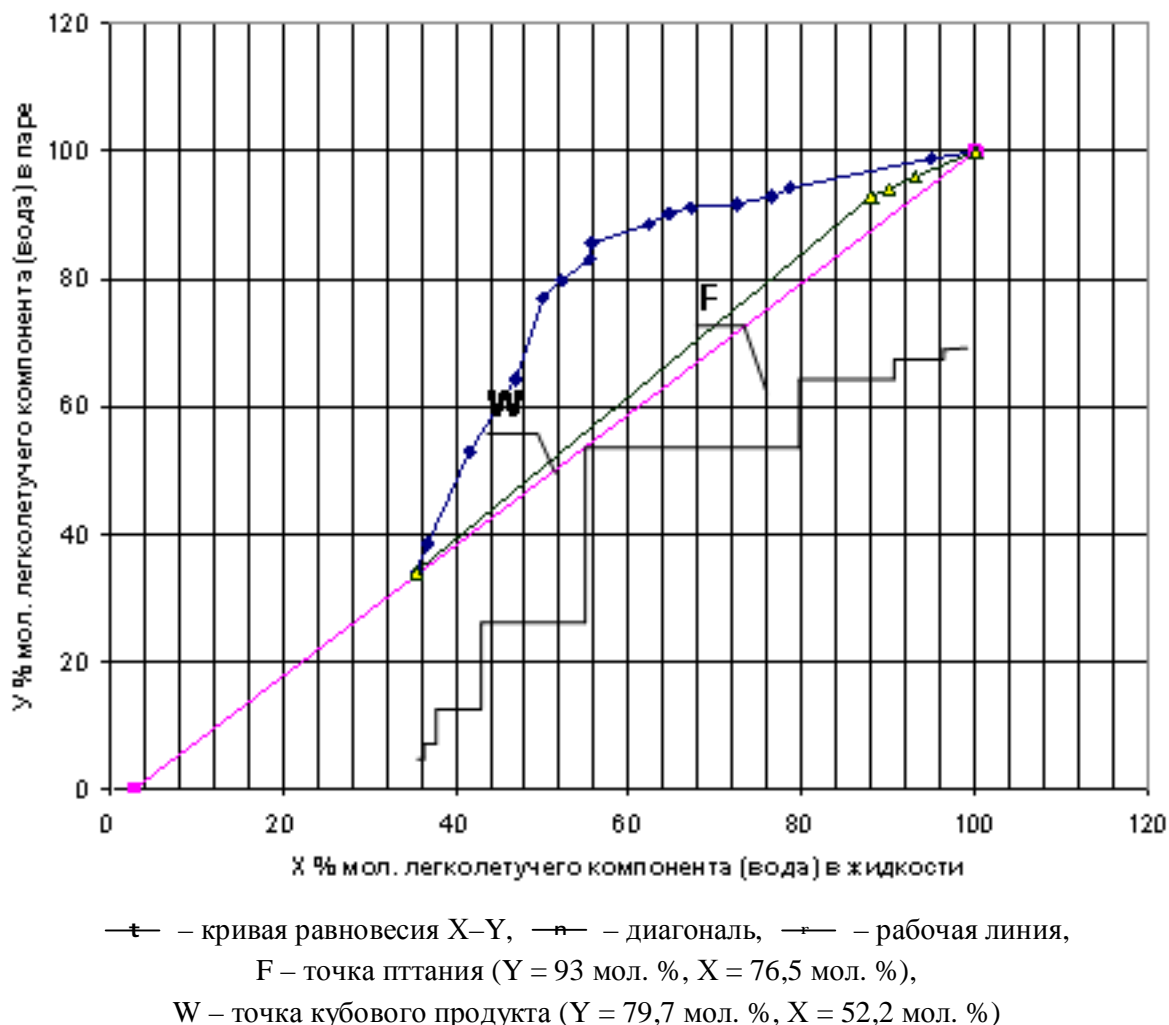


Рис. 2. Диаграмма равновесия между жидкостью и паром по л.л.к. для раствора азотной кислоты и рабочая линия укрепляющей части ректификационной колонны при абсолютном давлении 0,02 МПа

Проведено исследование нейтрализации кубового остатка негашеной известью (CaO). На нейтрализацию 200 г кубового остатка пошло 80 г CaO.

Таким образом, на нейтрализацию 1 кг кубового остатка необходимо 400 г негашеной извести.

Описание технологической схемы производства.

На основании проведенных разработок рекомендуется регенерировать азотную кислоту из отработанных растворов производства циркония по технологической схеме, включающей следующие операции:

- концентрирование до 35 масс. %;
- концентрирование до 56 масс. %;
- ректификация смеси азотной кислоты и воды из вторичных паров выпарных аппаратов с получением 47 % продукционной азотной кислоты;
- сгущение кубового остатка выводимого из второго корпуса;
- доотжим и нейтрализация сгущенной части.

Выводы.

Определены физико-химические свойства исходных, промежуточных и конечных растворов азотной кислоты.

Отработаны режимы концентрирования и перегонки азотной кислоты.

Предложен способ утилизации кубового остатка, методом нейтрализации шламом образующимся на стадии каустификации процесса регенерации отработанного едкого натра.

Степень регенерации рафинатных растворов азотной кислоты составляет 99 %.

Список литературы: 1. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций / А. Миснар. – М.: Изд. «Мир и Москва», 1968. – 430 с. 2. Кей Дж. Таблицы физических и химических постоянных / Дж. Кей, Т.Лэби. – М.: Государственное изд-во физико-математической литературы, 1962. – 748 с. 3. Симулин Н.А. Справочник азотчика: справочник в 2 т. / [Н.А. Симулин, М.С. Фурман и др.]; под ред. Е.Я. Мельникова. – М.: Химия, 1967. – Т. 1 – 492 с.

Поступила в редколлегию 25.03.10

Ю.Б. ДАНИЛОВ, доктор техн. наук, **О. И. НЕВШУПА**,
В.А. КАЧАНОВ, ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина

ОПЫТ ПОЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОГО ЧЕШУИРОВАННОГО ЕДКОГО НАТРА

В данній роботі розглянуті питання одержання твердого їдкого натрового лугу концентруванням 44 – 50 % розчину діафрагмового лугу, дається оцінка стабільності якості моногідрату лугу в залежності від терміну зберігання.

В данной работе рассмотрены вопросы получения твердого едкого натра концентрированием 44 – 50 % раствора диафрагменного каустика, дается оценка стабильности качества моногидрата едкого натра в зависимости от времени хранения.

In the presented article the questions of receipt of hard caustic soda are examined from a 44 – 50 % solution of diaphragm caustic soda, the estimation of lie of monohydrate of caustic soda is produced.

Получение твердого едкого натра из 44 – 50 %-ного раствора электролитического каустика представляет серьезную техническую задачу в связи с отсутствием надежных коррозионностойких материалов при упаривании раствора в интервале концентраций 75 – 99 % и температур 200 – 450 °С.

Имеющийся опыт получения твердого едкого натра свидетельствует о низкой коррозионной стойкости конструкционных материалов в плаве едкого натра будь то специальный чугун (в плавильных котлах) или никель в каскадной установке получения 94 % NaOH квалификации ТД, а также достаточно высокие энергетические затраты на тонну получаемого продукта.

В ОАО «УкрНИИхиммаш» проведены работы по получению твердого едкого натра из 44 – 50 % раствора диафрагменного каустика в два этапа: на первом этапе раствор упаривается до 72 – 75 %, отстаивается и кристаллизуется в кристаллизаторе с получением твердого моногидрата (NaOH·H₂O) – в соответствии с диаграммой растворимости NaOH в воде (рис. 1) [1].

Как видно из рисунка, кристаллизация моногидрата имеет место в широкой области концентраций от 50 до 75 % и в интервале температур ниже 55 °С.

На втором этапе при концентрациях (более 75 % NaOH) и температуре более 55 °С кристаллизацией можно получить кристаллический безвод-

ный очищенный от примесей едкий натр, что открывает в производстве существенные возможности по снижению энергетических и капитальных затрат [2, 3].

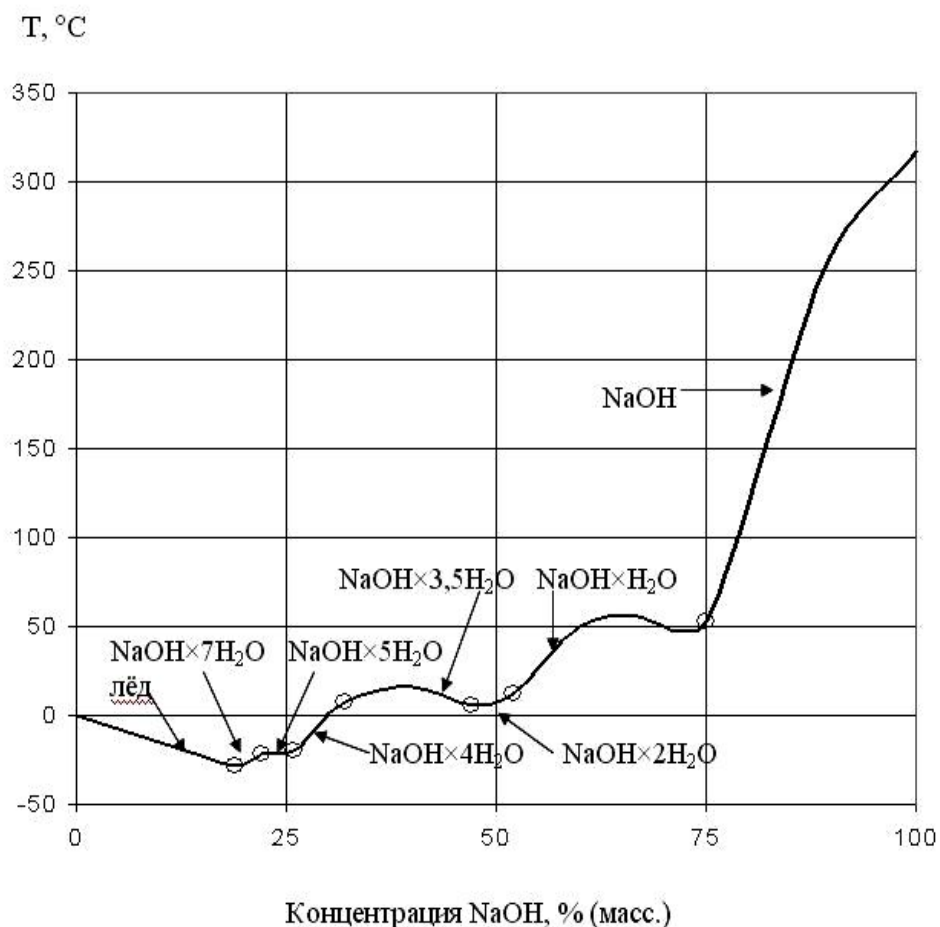


Рис. 1. Политерма растворимости NaOH в воде

Лабораторные исследования.

Исследования проводили в заводских условиях. Для каждого опыта отбирался свежеполученный каустик. Концентрирование раствора едкого натра проводили в изготовленном из никеля НП2 автоклаве емкостью 2 литра.

Процесс проводили при атмосферном давлении и интенсивном перевешивании.

В таблице 1 приведены результаты исследований.

Как видно из приведенных результатов, при упаривании раствора диафрагменного каустика имеет место существенное снижение концентрации примесей хлоридов, хлоратов, сульфатов и карбонатов, что должно сказаться

Таблица 1

Результаты упаривания диафрагменного каустика

Номер опыта	Содержание компонентов в растворе до упаривания, %	Содержание примесей в пересчете на 100% NaOH, %	Содержание компонентов в растворе после упаривания, %	Содержание примесей в растворе после упаривания, в пересчете на 100 % NaOH, %	Степень очистки, %
1	NaOH – 45,15 Na ₂ CO ₃ – 0,29 NaCl – 1,39 NaClO ₃ – 0,31	– 0,64 3,08 0,69	NaOH – 62,3 Na ₂ CO ₃ – 0,26 NaCl – 1,88 NaClO ₃ – 0,34	- 0,42 3,0 0,55	- 34,4 2,08 20,3
2	NaOH – 44,1 Na ₂ CO ₃ – 0,28 NaCl – 1,5 Na ₂ SO ₄ – 0,05	– 0,63 3,36 0,12	NaOH – 62,5 Na ₂ CO ₃ – 0,6 NaCl – 2,2 Na ₂ SO ₄ – 0,03	- 0,95 3,36 0,048	- - 0 60
3	NaOH – 44,96 Na ₂ CO ₃ – 0,61 NaCl – 1,9 NaClO ₃ – 0,4	- 0,36 4,23 0,89	NaOH – 68,35 Na ₂ CO ₃ – 0,38 NaCl – 2,18 NaClO ₃ – 0,23	- 0,54 3,09 0,33	- 58,8 24,6 61,8
4	NaOH – 45,15 Na ₂ CO ₃ – 0,29 NaCl – 1,39 NaClO ₃ – 0,31	- 0,64 3,08 0,69	NaOH – 69,12 Na ₂ CO ₃ – 0,217 NaCl – 2,1 NaClO ₃ – 0,4	- 0,31 3,04 0,58	- 51,6 1,03 15,9
5	NaOH – 46 Na ₂ CO ₃ – 0,76 NaCl – 2,7 NaClO ₃ – 0,31	- 1,63 5,8 0,67	NaOH – 69,5 Na ₂ CO ₃ – 0,63 NaCl – 2,04 NaClO ₃ – 0,42	- 0,91 2,95 0,61	- 44,2 49,2 9,0
6	NaOH – 44,1 Na ₂ CO ₃ – 0,28 NaCl – 1,5 Na ₂ SO ₄ – 0,05	- 0,63 3,36 0,12	NaOH – 69,7 Na ₂ CO ₃ – 0,54 NaCl – 1,8 Na ₂ SO ₄ – 0,033	- 0,78 2,5 0,046	- - 23,2 51,7
7 с добавкой сахара	NaOH – 44,96 Na ₂ CO ₃ – 0,61 NaCl – 1,9 NaClO ₃ – 0,4	- 1,36 4,23 0,89	NaOH – 70,8 Na ₂ CO ₃ – 0,59 NaCl – 2,2 NaClO ₃ – 0,42	- 0,83 3,01 0,57	- 39,0 26,5 33,7
8	NaOH – 44,96 Na ₂ CO ₃ – 0,61 NaCl – 1,9 NaClO ₃ – 0,4	- 1,36 4,23 0,89	NaOH – 72,0 Na ₂ CO ₃ – 0,37 NaCl – 2,25 NaClO ₃ – 0,48	- 0,51 3,03 0,67	- 62,5 26,0 24,7

на снижении агрессивности упариваемого каустика при концентрации последнего от 75 % до 98 % и облегчить выбор конструкционных материалов для конструирования оборудования по получению твердого едкого натра, а также позволит повысить качество получаемого продукта.

В таблице 2 представлены результаты по кристаллизации очищенного едкого натра из расплава.

Таблица 2

Результаты кристаллизации на барабанном кристаллизаторе очищенного концентрированного NaOH

Номер опыта	Концентрация NaOH исходная, %	Температура ванны, °С	Температура барабана, °С	Концентрация NaOH в чешуированном каустике, %
1	81,7	200	190	94
2	83,2	210	205	96
3	83,6	215	210	97,1
4	85,0	230	210	98

Как видно из таблицы, при кристаллизации концентрация едкого натра в чешуированном продукте значительно возрастает — на 13 – 14 % в сравнении с концентрацией его в расплаве. Это открывает возможности кристаллизации 98 % едкого натра при температуре расплава до 300 °С вместо традиционных 395 °С при упаривании под вакуумом и кристаллизации в гранбашне.

В ОАО «УкрНИИхиммаш» разработана установка получения твердого едкого натра и проведена оценка расхода сырья и энергоресурсов, отнесенная на 1 тонну 100 % едкого натра: исходный расплав (моногидрат едкого натра до 75 %) – не более 1,4 т; электроэнергия (потребляемая) – не более 20 кВт; вода на охлаждение – не более 18 м³; пар (1,9 МПа, температура 209 °С) – не более 0,4 т.

Промышленные исследования по получению моногидрата едкого натра.

Исследования проводили в условиях производства диафрагменного каустика на опытной установке, состоящей из последовательно соединенных емкости исходного раствора каустика (44 – 46 % по NaOH), насоса подачи раствора в испаритель, конденсатора вторичного пара, емкости упаренного раствора и вальцевого кристаллизатора. В процессе работы установки кон-

тролировалась концентрация упариваемого каустика, температура, давление, примеси в упаренном растворе, осветленном растворе и твердом каустике.

Получаемые чешуйки моногидрата затаривались в полиэтиленовые мешки (50 кг).

Была наработана представительная партия чешуированного моногидрата едкого натра. Результаты качества полученного едкого натра представлены в таблице 3.

Таблица 3

Качество представительной партии чешуированного едкого натра

Содержание компонентов в растворе до паривания, %	Содержание примесей в пересчете на 100 % NaOH, %	Содержание компонентов в растворе после упаривания, %	Содержание компонентов в твердом каустике, %	Содержание примесей в твердом каустике в пересчете на 100 % NaOH, %	Степень очистки, %
NaOH – 44,9	-	NaOH – 72,9	NaOH – 73,0	-	-
Na ₂ CO ₃ – 0,8	1,78	Na ₂ CO ₃ – 0,98	Na ₂ CO ₃ – 1,27	1,74	2,4
NaCl – 3,6	8,2	NaCl – 3,2	NaCl – 3,0	4,1	50
NaClO ₃ – 1,6	3,56	NaClO ₃ – 0,4	NaClO ₃ – 0,4	0,5	86
Na ₂ SO ₄ – 0,8	1,78	Na ₂ SO ₄ – 0,8	Na ₂ SO ₄ – 0,8	1,12	37
		Σ = 15,4		Σ = 7,64	

Как видно из таблицы, степень по очистки NaCl достигает 50 %, по NaClO₃ – 86 %, по Na₂CO₃ - 2,4 %, по Na₂SO₄ – 37 %. Таким образом, при суммарном содержании примесей 15,4 % в 44,9 % едком натре содержание примесей снижается почти в 2 раза, что в определенной мере коррелируется с данными [2].

На базе проведенных исследований была разработана установка получения моногидрата едкого натра с ожидаемым расходом сырья и энергоресурсов в пересчете на 1 тонну 100 % едкого натра: исходный раствор (жидкий едкий натр концентрацией 45 – 50 %) – не более 2,5 тонн, потребляемая электроэнергия – не более 8 кВт, вода для охлаждения — не более 60 м³, пар (P = 1,0 МПа, T = 179 °C) не более 1,1 т.

Характеристика товарного продукта: моногидрат едкого натра чешуированного твердого: NaOH – не менее 72 %, NaCl – не более 3 %, NaClO₃ – не более 0,4 %. Затаренный продукт (чешуированный каустик) в полиэтиленовой упаковке после 2-х лет хранения не слежался и сохранил исходную структуру (рис. 2).



Рис. 2. Чешуирированный NaOH после двух лет хранения

Выводы:

1. Проведены исследования по концентрированию диафрагменного едкого натра (44 – 48 %) и его кристаллизации в лабораторных условиях. Показано, что при концентрировании и отстое значительно снижается концентрация примесей в растворе. При кристаллизации на охлаждаемой поверхности получен твердый чешуирированный моногидрат едкого натра.

2. Проведено упаривание с последующей кристаллизации очищенного моногидрата едкого натра и показана принципиальная возможность повышения его концентрации при кристаллизации на охлаждаемой поверхности (чешуирированный едкий натр). Проработана технологическая возможность получения безводного едкого натра и оценены основные технологические параметры на 1 тонну получаемого 100 % едкого натра.

3. Проведена наработка опытно — промышленной партии чешуирированного моногидрата едкого натра в промышленных условиях, оценены его качество и основные технологические параметры. Разработана техническая документация на установку получения моногидрата едкого натра. Оценена слеживаемость полученного моногидрата едкого натра и показано, что после хранения в герметичном полиэтиленовом мешке в течение 2 лет чешуйки моногидрата не потеряли свою структуру.

Список литературы: 1. Якименко Л.М. Справочник по производству хлора, каустической соды и основных хлорпродуктов / Л.М. Якименко, М.И. Пасманник. – М.: Химия, 1976. – 207 с. 2. Пат. № 2232713(И) Российской Федерации. Способ получения твердого едкого натра и устройство для его осуществления / Данилов Ю.Б., Невшупа О.И., Качанов В.А. и др.; заявители и патентообладатели Данилов Ю.Б., Невшупа О.И., Качанов В.А. и др.; заявл. 27.07.03; опубл. 20.07.04. Бюлл. № 20. 3. Пат. ua № 69783А (И) України. Спосіб отримання твердого їдкого натра та пристрій для його здійснення / Данилов Ю.Б., Невшупа О.И., Качанов В.А. та інші.; заявники та патентотримачі Данилов Ю.Б., Невшупа О.И., Качанов В.А. та інші.; заявл. 04.12.03; опубл. 15.06.06. Бюлл. № 6.

В.А. КАЧАНОВ, канд. хим. наук, **Ю.Б. ДАНИЛОВ**, докт. техн. наук,
Е.К. ГВОЗДИКОВА, **В.Ю. КОЗИН**,
О.В. ПАНАСЕНКО, ОАО «УкрНИИХиммаш», г. Харьков, Украина

ГРАФИТОВЫЕ ПРОКЛАДОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ И НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В статті наведені властивості графітових прокладок, які знаходять широке застосування в хімічній та нафтопереробній промисловості. Досліджено вплив контакту графіту з нержавіючими сталями і показана можливість використання графітових прокладок для хімічних та нафтопереробних підприємств.

В статье приведены свойства графитовых прокладок, которые находят широкое применение в химической и нефтеперерабатывающей промышленности. Исследовано влияние контакта графита с нержавеющей сталью и показана возможность использования графитовых прокладок для химических и нефтеперерабатывающих предприятий.

In the article the properties of graphite gaskets, which are widely used in chemical and petroleum industries. The influence of graphite contact with stainless steel and the possibility of using graphite gaskets for chemical and oil refineries.

Решаемые проблемы:

Крупнейшие мировые поставщики и проектировщики оборудования для нефтеперерабатывающих заводов, такие как “Shell”, “Axens”, “ABB” и другие в последнее время ограничили применение прокладочных материалов, содержащих асбест, таких как паронит, в связи с канцерогенными свойствами асбеста. Альтернативой таким прокладочным материалам являются материалы из терморасширенного графита, например «Графлекс».

Терморасширенный графит был разработан компанией UCAR Carbon Co. Inc более 30 лет назад. Применение графитовых уплотняющих материалов (прокладок и сальниковых набивок и фольги), в том числе графитовых, в различных конструкциях и оборудовании связано с необходимостью уплотнения фланцевых соединений, разъемов, валов, штоков и др. работающих в агрессивных и абразивных средах.

Гибкий терморасширенный графит может быть использован сам по себе, как набивочный и уплотнительный материал, или усилен различными ма-

териалами, такими, как нержавеющая сталь, фторопласт, арамидные. акриловые, хлопчатобумажные волокна или стекловолокно, чтобы повысить его потребительские свойства.

В настоящее время ограничены рациональные и обоснованные методы оценки химической стойкости углеграфитовых материалов и ресурса работы изделий из них. Единственный достоверный, но длительный метод – эксплуатационная проверка изделий в рабочих условиях [1, 2].

Поскольку графит является электропроводящим материалом и обладает электроположительным потенциалом порядка +0,36 В, то появляется реальная возможность возникновения контактной коррозии при эксплуатации контактирующих пар графит – конструкционный металлический материал в растворах электролитов.

Термодинамическая вероятность возникновения контактной коррозии металлов, уплотненных графитовыми прокладками определяется разностью стандартных электродных потенциалов контактируемых материалов. Однако реальная возможность и реальные скорости контактной коррозии определяются главным образом не разностью электродных потенциалов контактируемых материалов в конкретной агрессивной среде, а кинетикой протекания катодных и анодных реакций, соотношением площадей катодных и анодных участков контактируемых материалов, характеристиками агрессивной среды.

Поэтому нами были проведены испытания металлографитовых прокладок в тестовых растворах, применяемых для исследования стойкости материалов в условиях нефтеперерабатывающей промышленности.

В таблице 1 приведены характеристики различных материалов в некоторых электролитах [3, 4].

Таблица 1

Металл	Электродный процесс	Стандартный электродный потенциал, В (по НВЭ)	Потенциал коррозии металлов в некоторых электролитах, В (НВЭ)		
			0,1 N HCL	0,1 N NaOH	3 % NaCL
Fe	$Fe \rightarrow Fe^{2+}$	- 0,43	- 0,328	- 0,161	- 0,255
Cr	$Cr \rightarrow Cr^{3+}$	- 0,74	- 0,039	- 0,412	- 0,032
Ni	$Ni \rightarrow Ni^{2+}$	- 0,25	- 0,31	- 0,128	- 0,023
Cu	$Cu \rightarrow Cu^{2+}$	+ 0,337	+ 0,154	- 0,027	+ 0,07
Ti	$Ti \rightarrow Ti^{2+}$	- 1,63	-	-	+ 0,4
C		+ 0,3	-	-	-

Как видно из таблицы, углерод обладает довольно большим положительным потенциалом, его контакт с железом и сплавами на его основе может вызвать увеличение коррозионного разрушения металлов.

Это обусловлено, прежде всего, тем, что в паре металл – графит последний является эффективным катодом, обладая развитой поверхностью, графит адсорбирует посторонние анионы, а также кислород, являющийся мощным катодным деполяризатором, определяющим коррозионный процесс в нейтральных и щелочных средах.

Электрохимическое поведение графитопластов, особенно в контакте с металлическими деталями, практически не изучено. В отдельных работах приводятся данные о стандартных потенциалах углепластиков в агрессивных средах, однако детального исследования механизма контактной коррозии авторы не дают.

В связи с этим, мы проводили исследования в модельных условиях, приближенных к производственным по содержанию агрессивных компонентов, в том числе сероводорода.

В отличие от металлических конструкционных материалов, коррозия которых происходит на границе металл – среда, коррозия композиционных материалов протекает как на поверхности материала, так и в объеме материала, куда агрессивная среда проникает в результате диффузии.

В качестве критерия коррозии композиционных неметаллических материалов принимаются:

- изменения массы образца, связанного с его растворением или заполнением его внутренних пустот агрессивной средой;
- изменения линейных размеров образца (набухание), вызванные разрывом внутренних связей, расширением пор и др.

Постановка исследований.

Исследования коррозионной стойкости и эффективности работы пары металл – графитовая прокладка проводили гравиметрическим и электрохимическим методом.

Исследованиям подвергались прокладки и контактирующий металл в объеме раствора, а также прокладки в виде пакетов: прокладка – сплав 06ХН28МДТ, прокладка – сталь 12Х18Н10Т, прокладка – сталь 09Г2С. Графитовые прокладки зажимали между двумя образцами металла с помощью болтов из фторопласта 4.

Исследования проводили в растворе 3 %-ной соляной кислоты и по стандарту NACE (национальная ассоциация коррозионистов Америки) ТМ-02-84 в растворе, содержащем 5 % NaCl и 0,5 % CH₃COOH, насыщенном H₂S до 3000 мг/л (рН раствора 3,0 – 3,8). Указанный раствор применяется для тестовых исследований конструкционных материалов в агрессивных средах нефтепереработки, содержащих сероводород.

Продолжительность испытаний – 650 часов.

Электрохимические исследования проводили с помощью потенциостата П-5827М в электрохимической ячейке без разделения катодного и анодного пространств. В качестве электрода сравнения применяли насыщенный хлор-серебряный электрод, вспомогательный электрод – платина. Все потенциалы приведены относительно насыщенного хлорсеребряного электрода.

Исследования химической стойкости графитовых листов, графитовой сальниковой набивки, армированной стекловолокном, и армированной стекловолокном и инконелевой проволокой проводили гравиметрически в 1 N-ных растворах серной кислоты и едкого натра, а также в газовом конденсате при комнатной температуре.

Результаты исследований.

Исследования химической стойкости образцов графитовых листов и сальниковой набивки при комнатной температуре в 3 %-ной соляной кислоте, в 1 N-ных растворах серной кислот и едкого натра, в газовом конденсате и в тестовом растворе NACE показали, что после 650 часов испытаний вес образцов практически не изменился. Растворы не окрасились. Таким образом, в этих условиях материал относится к классу стойких («С»). Образцы графитовой сальниковой набивки, армированной стекловолокном, в 1 N-ном растворе едкого натра показала пониженную стойкость и относится к классу относительно стойких («ОС»).

Спектральный анализ армирующего металла прокладок показал, что он содержит 16,7 % Cr, 3,5 % Ni, 9,0 % Mn, 0,4 % Si и по химическому составу близок к сталям типа 12X17AГ4 и 12X18H10T (ГОСТ 5632).

Исследования влияния графита на коррозионную стойкость различных металлов в тестовом растворе NACE показали (табл. 2), что после 1000 часов испытаний образцы из стали Ст. 3 в контакте с графитом корродировали со скоростью 0,62 мм/год, в то время, как скорость коррозии образцов этой же стали в объеме раствора составила 0,22 мм/год.

Таблица 2

Влияние контакта с графитовой прокладкой на коррозионную стойкость сталей в тестовом растворе NACE

Марка стали	Скорость коррозии, мм/год	
	В объеме	В контакте с графитом
Сталь Ст. 3	0,22	0,62
09Г2С	0,35	0,45
09Г2СЮЧ	0,088	0,231

Низколегированная сталь 09Г2С корродирует с меньшей скоростью, чем сталь Ст. 3. Как и для стали Ст. 3 наблюдается повышение скорости коррозии стали в контакте с графитовой прокладкой ($\Pi = 0,45$ мм/год) по сравнению со скоростью коррозии в объеме раствора ($\Pi = 0,35$ мм/год).

Исследование более стойкой к сероводородной коррозии стали 09Г2СЮЧ, легированной алюминием и редкоземельными элементами, при общем увеличении коррозионной стойкости показало аналогичную тенденцию поведения стали в контакте с графитовой прокладкой ($\Pi = 0,191$ мм/год) и в объеме раствора ($\Pi = 0,088$ мм/год).

Результаты электрохимических исследований представлены в таблице 3.

Таблица 3

Электродные потенциалы сталей и графита в контакте с металлами и в объеме тестового раствора NACE

Материал	Электродный потенциал, В (НХСЭ)				
	Металла	графита	Металла в контакте с графитом	Графита в контакте с металлом	Компромиссный потенциал
06ХН28МДТ	- 0,12	-	- 0,12	- 0,12	- 0,12
12Х18Н10Т	- 0,43	-	- 0,41	- 0,41	- 0,41
09Г2С	- 0,40	-	- 0,36	- 0,36	- 0,36
12Х17АГ4	- 0,135	-	- 0,11	- 0,11	- 0,11
Графит	-	+ 0,02	-	-	-

Как видно из таблицы, на всех металлах за исключением сплава 06ХН28МДТ в тестовом растворе NACE наблюдается незначительный рост электродного потенциала, что свидетельствует о том, что стали являются анодом и в водных растворах могут подвергаться повышенному коррозионному разрушению поверхностей металла при контакте с графитом.

В безводных апротонных средах, в том числе в средах нефтепереработки, электродные процессы затруднены, и разница потенциалов не должна оказывать значительного воздействия на коррозионную стойкость сталей, не следует ожидать эффективной коррозии в работе пары металл – графит, и их контакт во фланцевых соединениях, уплотнении зазоров и т.д. не является коррозионно-опасным.

Проведенные промышленные испытания прокладок из графитовой фольги, листового армированного графита и сальниковой графитовой набивки в условиях ЗАО «ЛИНИК», ООО «Солнцедаровское НПП», ЗАО «Укртатнафта», ЗАО «УБСП Фобос» и ОАО «Херсоннефтепереработка» показали достаточную работоспособность уплотнительных графитовых материалов на основе терморасширенного графита в средах нефтепереработки.

Анализ результатов промышленных испытаний и опыта применения графитовых уплотняющих материалов производства для уплотнения насосов, трубопроводов, запорной арматуры нефтеперерабатывающих и химических предприятий Украины показал их достаточную работоспособность и химическую стойкость.

На основании проведенных исследований графитовых прокладочных материалов, были рекомендованы для применения на нефтеперерабатывающих предприятиях Украины, на что получены соответствующие заключения Госгорнадзорохрантруда.

Выводы:

1. Проведенные исследования показали достаточно высокую химическую стойкость графитовых прокладок и сальниковых набивок в исследованных средах.

3. В безводных апротонных средах, в том числе в средах нефтепереработки, электродные процессы затруднены не следует ожидать эффективной коррозии в работе пары металл – графит, и их контакт во фланцевых соединениях, уплотнении зазоров и т.д. не является коррозионно-опасным.

3. Уплотнительные материалы из терморасширенного графита, могут быть рекомендованы для оборудования химической и нефтеперерабатывающей промышленности Украины.

4. Применение сальниковых набивок армированных стекловолокном в щелочных средах ограничено, и их применение должно рассматриваться в каждом конкретном случае.

Список литература: 1. Молчанов Б.И. Углепластики / Б.И. Молчанов, П.А. Чукаловский, В.Я. Варшавский. – М.: Химия, 1985. – 208 с. 2. Чукаловский П.А. Защита оборудования от коррозии в производстве искусственных волокон / П.А. Чукаловский. – Мытищи: НИИТЭХИМ, 1981. – 178 с. 3. Акимов Г.В. Основы теории коррозии металлов / Г.В. Акимов. – М.: Metallurgizdat, 1946. – 276 с. 4. Розенфельд И.П. Коррозия и защита металлов / И.П. Розенфельд. – М.: Metallurgizdat, 1969. – 583 с.

Поступила в редколлегию 25.03.10

УДК 658.516.2

Ю.Б. ДАНИЛОВ, докт. техн. наук, **В.В. ПРОГОЛАЕВ**,

А.Н. СУЛИМА, канд. техн. наук,

В.А. ФЕДОРЧЕНКО, ОАО «УкрНИИхиммаш», г. Харьков, Украина

АКТУАЛИЗАЦИЯ ФОНДА НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ НА ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В статті пропонується інформація щодо розроблених ВАТ «УкрНДІхіммаш» галузевих стандартів Мінпромполітики України, які актуалізовані відповідно до чинних на сьогодні нормативних документів. Розроблення стандартів проводилось відповідно до Закону України «Про стандартизацію», Закону України «Про стандарти, технічні регламенти та процедури оцінки відповідності», постанови КМУ від 01.03.06 р. № 1395 «Про створення центральними органами виконавчої влади фондів нормативних документів у відповідній сфері діяльності», Планів стандартизації Мінпромполітики України та НДР «Розроблення нормативних документів Мінпромполітики (устаткування для хімічної промисловості)».

В статье предлагается информация о разработанных ОАО «УкрНИИхиммаш» отраслевых стандартах Минпромполитики Украина, которые актуализованы соответственно к действующим на сегодня нормативным документам. Разработка стандартов проводилась согласно Закона Украины «Про стандартизацію», Закона Украины «О стандартах, технических регламентах и процедуре оценки соответствия», постановления КМУ от 01.03.06 г. № 1395 «О создании центральными органами исполнительной власти фондов нормативных документов в соответствующей сфере деятельности», Планов стандартизации Минпромполитики Украины и НИР «Разработка нормативных документов Минпромполитики (оборудование для химической промышленности)».

In the article the information developed by "JSC UkrNDIhimmmash" industry standard MIP Ukraine, which actualized in accordance with applicable regulations to the present. Development of standards was conducted according to the Law of Ukraine "On standardization" Law of Ukraine "On standards, technical regulations and conformity assessment procedures, the CMU of 01.03.06, № 1395" On creation of central executive bodies fund regulations in the relevant area of "Industrial Policy of Ukraine plans standardization and research:" Development regulations MIP (equipment for chemical industry).

Общество не может существовать без технического законодательства и нормативных документов (стандартов, правил, регламентов, технических условий), которые устанавливают для общего и многообразного использования оптимальные правила, общие принципы или характеристики относительно видов деятельности или ее результатов.

Химическое машиностроение работает в соответствии с отраслевыми стандартами, которые в связи с вступлением Украины в ВТО должны быть актуализированы и соответственно пересмотрены современному научному уровню.

ОАО «УкрНИИХиммаш», как головная организация по стандартизации (ГОС-83) оборудования для химической промышленности (Код УКНД ДК 004-199 – 71.120), в соответствии с программой Минпромполитики Украины до 2012 г. разработал за последние пять лет девять отраслевых стандартов.

СОУ МПП 71.120-080:2005 Посудини та апарати. Механічні випробування зварних з'єднань

Стандарт распространяется на, сосуды, аппараты, трубопроводы, работающие в химической, нефтеперерабатывающей и газовой промышленности.

Стандарт устанавливает виды испытаний, порядок и методы изготовления образцов и проведения испытаний.

Стандарт предусматривает требования безопасности при проведении испытаний на оборудовании с целью исключения опасности для человека: травмирование движущимися элементами, влияние вредных веществ, поражение электрическим током, действие вибрации, термические ожоги, пожаробезопасность.

Внедрение этого стандарта позволило повысить организацию проведения испытаний, исключило случаи травмирования сотрудников во время проведения испытаний.

СОУ МПП 71.120-081:2005 Посудини та апарати. Газові та рідинні методи контролювання герметичності

Стандарт распространяется на сосуды та аппараты химических, нефте-химических, газоперерабатывающих и смежных производств.

Стандарт устанавливает способы контроля герметичности сосудов и аппаратов, методику их выбора, порядок и методику подготовки и проведения контроля герметичности сварных и разъемных корпусов аппаратов, а также крепления труб в трубных решетках теплообменных аппаратов и аппаратов воздушного охлаждения (АВО).

Стандартом предусмотрены требования безопасности при работе с гелиевыми и галогенными течеискателями, с баллонами, с сосудами Дьюара, механическими и пароструйными насосами.

Внедрение этого стандарта позволило повысить качество оборудования и сократить сроки изготовления оборудования.

СОУ МПП 71.120-181:2007 Посудини, апарати, трубопроводи. Компенсатори лінзові та стяжки. Методи розрахунку на міцність

Стандарт распространяется на сосуды, аппараты и трубопроводы, имеющие компенсаторы линзовые, работающие в условиях одноразовых и многократных статических нагрузок (не больше 500000 циклов) под внутренним или наружным давлением и под действием осевых и поперечных усилий и изгибающих моментов.

Стандарт устанавливает нормы и методы расчета на прочность компенсаторов линзовых и стяжек к ним при условии, что отклонения геометрической формы и погрешности изготовления не превышают допусков, установленных действующими нормативными документами.

Внедрение этого стандарта позволило ускорить сроки выполнения проектных работ и повысило надежность технологического оборудования и трубопроводов.

СОУ МПП 71.120-183:2007 Апарати колонні із чавуну. Загальні технічні умови

Стандарт распространяется на аппараты колонные из чугуна, применяемые в технологических процессах химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, газовой и других отраслях промышленности, работающие под давлением до 0,07 МПа, под вакуумом или атмосферным давлением (под налив) при температуре стенки аппарата не ниже минус 70 °С и до 400 °С.

Стандарт классифицирует аппараты на группы:

- колонны тарельчатые колпачковые – Кк;
- колонны тарельчатые ситчатые – Кс;
- колонны насадочные – Кн;
- колонны полые полочные – Кп

Стандарт устанавливает царговую конструкцию колонн диаметром (внутренним) 2000 мм и 3200 мм. Материальное исполнение СЧ 15-32, СЧ 18-36, СЧ 24-44 по ГОСТ 1412-85.

Введение стандарта позволило сократить сроки проектирования колонн на конкретные условия эксплуатации.

СОУ МПП 71.120-079:2007 Посудини та апарати. Методика розрахунку на міцність і герметичність прямолінійних ділянок фланцевих з'єднань

До настоящего времени отсутствовала нормативная документация на расчет прямоугольных фланцевых соединений на прочность и герметичность.

Стандарт распространяется на сосуды и аппараты, работающие под давлением до 16 МПа и температуре стенки аппарата не ниже 70 °С в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей и газовой отраслях промышленности.

Стандарт устанавливает методику расчета на прочность и герметичность.

Внедрение стандарта позволило повысить надежность аппаратов с прямолинейными фланцевыми соединениями за счет внедрения программы расчета «FLAN PR».

СОУ МПП/НАН 71.120-104/004:2007 Посудини та апарати зварні з корозійностійких сплавів на основі нікелю. Загальні технічні вимоги

Стандарт распространяется на сосуды и аппараты, работающие при температуре стенки от минус 70 °С до 500 °С (для сплава ХН78Т до 900 °С) и под давлением до 10 МПа, под налив или под вакуумом с остаточным давлением не ниже 665 Па (5 мм рт. ст.).

Область применения – химическая промышленность.

В стандарте предусмотрено применение импортных сплавов 59, 201, С-276, 400, В-4 фирмы ВDM-Крупп (Австрия).

Применение новых импортных сплавов позволило расширить область применения аппаратов.

Стандарт разработан совместно с Институтом электросварки им. Е.О. Патона НАНУ (ИЭС НАНУ).

Стандарт внедрен с 01.10.2007 г. в организациях и предприятиях, занимающихся проектированием, изготовлением и эксплуатацией оборудования из титана.

СОУ МПП/НАН 71.120-182/005:2007 Посудини та апарати зварні з титану та титанових сплавів. Загальні технічні умови

Стандарт распространяется на сварные сосуды и аппараты, изготавли-

ваемые из титана и его сплавов, работающих под давлением до 10 МПа с температурой стенки от минус 270 °С до 400 °С, под вакуумом с остаточным давлением не ниже 665 Па (5 мм рт. ст.), под налив.

Аппараты применяются в технологических установках химической и смежных отраслях промышленности.

Стандарт устанавливает требования к проектированию, изготовлению, приемке и поставке оборудования.

В стандарте приведен перечень 130 производств, в которых используется оборудование, изготовленное из титана марок ВТ1-0 и ВТ1-00.

Стандарт разработан совместно с Институтом электросварки им. Е.О. Патона Национальной Академии наук Украины (ИЭС НАНУ).

Стандарт внедрен с 01.12.2008 г. в организациях и предприятиях, занимающихся проектированием, изготовлением и эксплуатацией оборудования из титана.

СОУ МПП 71.120-216:2008 Апарати з обертовими барабанами загального призначення. Загальні технічні умови.

Стандарт распространяется на аппараты с вращающимися барабанами общего назначения, которые применяют для тепловой и теплехимической обработки материалов в производствах химической, лесохимической и других отраслях промышленности в районах с умеренным и тропическим климатом.

Аппараты применяют для обработки сыпучих пожаро – и взрывобезопасных невредных веществ.

Стандарт устанавливает типы, основные параметры, размеры аппаратов, общие требования к конструкции, материалам, изготовлению, методам контроля, приемки и эксплуатации аппаратов. Стандартом предусмотрены четыре типа аппаратов: печи, сушилки, холодильники, кристаллизаторы.

Стандарт разработан на замену 15 отраслевых документов (ОСТ).

СОУ МПП 71.120-217:2009 Посудини та апарати сталеві зварні. Загальні технічні умови.

Стандарт распространяется на стальные сварные сосуды и аппараты, работающие под давлением до 16 МПа (160 кгс/см²), под налив или под вакуумом с остаточным давлением не ниже 665 Па (5 мм рт. ст.) при температуре стенки не ниже минус 70 °С, работающих во всех отраслях промышленности.

Стандарт устанавливает общие требования к конструкции, материалам, изготовлению, методам испытаний, приемке и поставке аппаратов, а также

теплообменным и выпарным аппаратам.

В стандарте учтены требования НПАОП 0.00-1.07 [1], Технического регламента подтверждения соответствия безопасности оборудования, работающего под давлением, утвержденный приказом Госпотребстандарта Украины 31.12.2003 г. приказ № 279 и гармонизованого с Директивой 97/23/ЕС Европейского парламента и Совета Европейского Союза от 29.5.1997г. Стандарт согласован с Государственным Департаментом промышленной безопасности, охраны труда и горнадзора от 11.6.2009 г.(№01/03-10-10/3707) и зарегистрирован в ГП «УкрНДНЦ» Госпотребстандарта Украины от 16.7.2009 г. (№32595752/1919).

Стандарт действителен для всех отраслей промышленности Украины.

Список литературы: **1.** Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением; НПАОП 0.00-1.07-94. – К.: Госнадзорохрантруда Украины, с изменениями и дополнениями, 1998. – 373 с. **2.** Технический регламент подтверждения соответствия безопасности оборудования, работающего под давлением. – К.: Госпотребстандарт Украины, 2003. – 56 с. **3.** Посудини та апарати. Механічні випробування зварних з'єднань; СОУ МПП 71.120-080:2005. – Офіц. вид. – К.: Міністерство промислової політики України, 2005. – 111 с. **4.** Посудини та апарати. Газові та рідинні методи контролювання герметичності; СОУ МПП 71.120-081:2005. – Офіц. вид. – К.: Міністерство промислової політики України, 2005. – 44 с. **5.** Посудини, апарати, трубопроводи. Компенсатори лінзові та стяжки. Методи розрахунку на міцність; СОУ МПП 71.120-181:2007. – Офіц. вид. – К.: Міністерство промислової політики України, 2007. – 52 с. **6.** Апарати колонні із чавуну. Загальні технічні умови; СОУ МПП 71.120-183:2007. – Офіц. вид. – К.: Міністерство промислової політики України, 2007. – 30 с. **7.** Посудини та апарати. Методика розрахунку на міцність і герметичність прямолінійних ділянок фланцевих з'єднань; СОУ МПП 71.120-079:2007. – Офіц. вид. – К.: Міністерство промислової політики України, 2007. – 38 с. **8.** Посудини та апарати зварні з корозійностійких сплавів на основі нікелю. Загальні технічні вимоги; СОУ МПП/НАН 71.120-104/004:2007. – Офіц. вид. – К.: Міністерство промислової політики України, НАН України, 2007. – 88 с. **9.** Посудини та апарати зварні з титану та титанових сплавів. Загальні технічні умови; СОУ МПП/НАН 71.120-182/005:2007. – Офіц. вид. – К.: Міністерство промислової політики України, НАН України, 2007. – 138 с. **10.** Апарати з обертовими барабанами загального призначення. Загальні технічні умови; СОУ МПП 71.120-216:2008. – Офіц. вид. – К.: Міністерство промислової політики України, 2008. – 155 с. **11.** Посудини та апарати сталеві зварні. Загальні технічні умови; СОУ МПП 71.120-217:2009. – Офіц. вид. – К.: Міністерство промислової політики України, 2008. – 339 с.

Поступила в редколлегию 25.03.10

Содержание

1.	Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ ПОСВЯЩАЕТСЯ 80-ЛЕТИЮ УКРАИНСКОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО И КОНСТРУКТОРСКОГО ИНСТИТУТА ХИМИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ	3
2.	Ю.Б. ДАНИЛОВ, В.В. ДРОЗДОВ К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАСТИНЧАТЫХ ПРЕКРЕСНОТОЧНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ	5
3.	Ю.Б. ДАНИЛОВ, В.Н. КОЛОМИЕЦ ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПРИ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ В ОБЪЕМЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО КИПЯТИЛЬНИКА ИЗ ФТОРОПЛАСТОВЫХ ТРУБОК	8
4.	В.Н. КОЛОМИЕЦ, Ю.Б. ДАНИЛОВ, М.А. ХАРЧЕНКО АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ФТОРПЛАСТОВЫХ ДЕФЛЕГМАТОРОВ И ПУТЕЙ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИХ КОНСТРУКТИВНОГО ИСПОЛНЕНИЯ	13
5.	В.Н. КОЛОМИЕЦ, А.Н. СУЛИМА, М.А. ХАРЧЕНКО, Ю.В. БОРОВЕНСКИЙ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИСТИЛЛЯЦИИ РАСТВОРОВ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ НА ОПЫТНОЙ УСТАНОВКЕ	16
6.	А.М. ХАРЧЕНКО, М.А. ХАРЧЕНКО СМЕСИТЕЛЬ-ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ДЕХРОМАТОРА	20
7.	С.А. БЕЛОВ, М.А. ОРАЗОВА ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОПОРНОГО УЗЛА КОКСОВОЙ КАМЕРЫ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ	23
8.	П.С. МАРЧЕНКО, С.А. ГОНДАРЕВА РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ПАТРУБКА ШТУЦЕРА С ГИЛЬЗОЙ	32
9.	А.Н. СУЛИМА, И.А. СУЩЕНКО, Т.А. КУРОЧКА, И.П. ШЕПОТЬКО, С.П. НЕГОДА, М.Ю. ВАСЮК, Т.Г. ЯШИНА СПЕЦИАЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ КОЛОННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ПОЛИМЕРИЗУЮЩИХСЯ СРЕД	41
10.	С.А. БЕЛОВ, Е.А. СЫПКО, С.А. КОРОЛЕВА, О.А. БЕЛОВА ПРОЧНОСТЬ И ГЕРМЕТИЧНОСТЬ ФЛАНЦЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ ПЛАВАЮЩЕЙ ГОЛОВКИ	46
11.	В.М. ДОЛИНСКИЙ, М.В. КРАВЕЦ РАСЧЕТ ПЛОСКИХ КРЫШЕК С ДОПУСКОМ ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ	54
12.	Ю.Б. ДАНИЛОВ, А.В. КОШЕЛЬНИК, А.Е. МОРОЗОВ ИСТОРИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИХ КОНСТРУКЦИЙ	59
13.	В.М. ДОЛИНСКИЙ, Л.Д. МИЩЕНКО, В.Г. ИВАНОВ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕАКЦИОННЫХ ТРУБ ПЕЧИ РИФОРМИНГА ОДЕССКОГО ПРИПОРТОВОГО ЗАВОДА	66
14.	В.М. ДОЛИНСКИЙ, В.И. ЧЕРЕМСКАЯ РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ СОСУДОВ, ОТРАБОТАВШИХ УСТАНОВЛЕННЫЙ РЕСУРС	72

15.	В.А. КАЧАНОВ, Ю.Б. ДАНИЛОВ, Т.Э. ШЕПИЛЬ, Т.А. БАЛАК, Е.К. ГВОЗДИКОВА, В.Ю. КОЗИН, Н.А. КОНДАКОВА ПРИЧИНА РАЗРУШЕНИЯ ПЛАСТИНЧАТОГО РАЗБОРНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ИЗ СТАЛИ 316L В НАСЫЩЕННОМ РАСТВОРЕ МЭА БАГЛЕЙСКОГО КХЗ	88
16.	Т.Э. ШЕПИЛЬ, В.А. КАЧАНОВ, Ю.Б. ДАНИЛОВ, В.Ю. КОЗИН, К.А. ЮЩЕНКО, В.С. САВЧЕНКО ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИЧИН ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ТРУБ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ЛИТЬЯ В ПЕЧИ РИФОРМИНГА В ПРОИЗВОДСТВЕ ПОЛУЧЕНИЯ АММИАКА НА РОВЕНСКОМ ОАО «АЗОТ»	95
17.	Д.В. БОБКОВ, В.А. КАЧАНОВ, Ю.Б. ДАНИЛОВ, Е.К. ГВОЗДИКОВА, Т.Э. ШЕПИЛЬ, Т.А. БАЛАК, В.Ю. КОЗИН ОЦЕНКА КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ НОВЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СРЕДАХ ЭКСТРАКЦИОННОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ	102
18.	Ю.Б. ДАНИЛОВ, В.А. КАЧАНОВ, Л.П. ПЕРЦЕВ, ИССЛЕДОВАНИЕ И ВЫБОР КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СОЗДАНИИ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АГРЕССИВНЫХ СРЕД	110
19.	А.И. КАБАШНЫЙ, Ю.Б. ДАНИЛОВ, В.Ф. СУЩЕНКО, И.В. ЛЕТКО ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СВАРНОЙ ТЕПЛООБМЕННОЙ АППАРАТУРЫ ИЗ ЛИСТА	133
20.	О.И. НЕВШУПА, Д.В. БОБКОВ, В.А. КАЧАНОВ, Ю.Б. ДАНИЛОВ, С.Е. БОГУЧАРОВА, Н.Е. ЗАГОРУЛЬКО, Е.К. ГВОЗДИКОВА, В.Ю. КОЗИН, Л.С. МОЛОДЦОВА РЕГЕНЕРАЦИЯ РАСТВОРОВ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ В ПРОИЗВОДСТВЕ ЦИРКОНИЯ	137
21.	Ю.Б. ДАНИЛОВ, О. И. НЕВШУПА, В.А. КАЧАНОВ ОПЫТ ПОЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОГО ЧЕШУИРОВАННОГО ЕДКОГО НАТРА	147
22.	В.А. КАЧАНОВ, Ю.Б. ДАНИЛОВ, Е.К. ГВОЗДИКОВА, В.Ю. КОЗИН, О.В. ПАНАСЕНКО ГРАФИТОВЫЕ ПРОКЛАДОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ И НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	153
23.	Ю.Б. ДАНИЛОВ, В.В. ПРОГОЛАЕВ, А.Н. СУЛИМА, В.А. ФЕДОРЧЕНКО АКТУАЛИЗАЦИЯ ФОНДА НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ НА ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	159

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК

НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ “ХПІ”

Тематичний випуск
“Хімія, хімічна технологія та екологія”

Збірник наукових праць

Випуск № 15

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. № 91-10

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. № 843. 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