

На правах рукописи

ИНСАФУТДИНОВ АКСАН ФАРАХУТДИНОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ
КОЖУХОТРУБЧАТОЙ ТЕПЛООБМЕННОЙ АППАРАТУРЫ
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕМ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ
ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ БАЗОВЫХ ДЕТАЛЕЙ**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(Машиностроение в нефтеперерабатывающей промышленности)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа 2002

Работа выполнена на кафедре "Технология нефтяного аппаратостроения"
Уфимского государственного нефтяного технического университета (УГНТУ)

Научный руководитель: доктор технических наук
Абдеев Р.Г.

Научный консультант: кандидат технических наук, доцент
Ризванов Р.Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор, чл.-корр. АН РБ
Панов А.К.

кандидат технических наук, профессор
Гафаров Р.Х.

Ведущее предприятие: ОАО "Туймазыхиммаш"

Защита состоится 20 февраля 2002 г. в 14³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.289.05 при Уфимском государственном нефтяном техническом университете по адресу: 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УГНТУ.

Автореферат разослан 18 января 2002 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор

И.Г. Ибрагимов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. На качество изготовления нефтехимических аппаратов большое влияние оказывает операция сборки корпусов. При сборке корпусов выполняют взаимную стыковку базовых деталей (обечайки и днища) аппаратов. Применяемые для сборки обечайки и днища могут иметь различного рода отклонения формы и размеров. При взаимной стыковке таких базовых деталей возникают смещения кромок, которые приводят к снижению несущей способности аппаратов.

Смещения кромок, возникающие вследствие отклонений формы поперечных сечений деталей от круглости, ликвидируют за счет пригоночно-доделочных работ, что значительно повышает трудоемкость сборочных операций. При этом пригонка может осуществляться как за счет местных деформаций кромок, так и общей деформации обечаек в радиальном направлении. Пригоночные деформации вызывают появление остаточных напряжений, которые могут отрицательно сказаться на прочности сварных соединений.

Кроме того, отклонения формы и размеров в сечениях корпусов кожухотрубчатых теплообменных аппаратов (КТА) приводят к увеличению зазоров между кожухом и поперечными перегородками, что ведет к снижению тепловой эффективности теплообменников.

Теплообменные аппараты являются одним из распространенных видов технологического оборудования, из них наибольший удельный вес приходится на кожухотрубчатые аппараты, в среднем, по отраслям – 15...18% на предприятиях химической промышленности, 50% - в нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. Капиталовложения в кожухотрубчатую теплообменную аппаратуру в нашей стране и за рубежом составляют от 10 до 40% стоимости технологического оборудования. Эксплуатационные расходы также велики и достигают иногда 40-50% расходов на все оборудование.

В настоящее время накоплен достаточный опыт по эксплуатации КТА, определению их достоинств и недостатков, дальнейшего усовершенствования кон-

струкции и технологии изготовления. Продолжается работа по более четкому определению причин неудовлетворительной работоспособности и конкурентоспособности, неуклонному повышению эффективности использования. К числу основных недостатков отечественных КТА относится низкая тепловая эффективность, обусловленная необоснованностью конструкторской точности, низкой технологической точностью из-за несовершенства технологии изготовления, в частности, корпусов, внутренних устройств, выступающих элементов; низкой технологичностью конструкций аппаратов в сравнении с аналогичными зарубежными образцами, отсутствием методов автоматизированного проектирования, сертификации, слабым метрологическим обеспечением и неоформленным фондом НТД.

До последнего времени к конструкциям КТА не предъявлялись конкретные требования к точности и технологичности, конструкторы фактически не несли ответственности за связанную с ними потерю работоспособности, а их соблюдение было передано на произвольное решение изготовителей. Это сдерживало техническое перевооружение аппаратостроения и препятствовало созданию совершенных технологических систем производства качественной продукции.

Поэтому актуальной является проблема контроля формы и диаметров поперечных сечений базовых деталей корпусов аппаратов с целью оптимизации сборки сопрягаемых поверхностей. Данная проблема решается разработкой методов и средств контроля поперечных сечений базовых деталей по нормируемым параметрам и приведением их сечений в соответствие с требованиями нормативно-технической документации по точности.

Настоящая работа выполнена в соответствии с Государственной научно-технической программой Академии наук Республики Башкортостан (АН РБ) "Проблемы машиностроения, конструкционных материалов и технологий" по направлению 6.1 "Разработка новейших технологий и материалов для машиностроения и аппаратостроения" на 1996-2000 годы, утвержденной постановлением Кабинета Министров РБ №204 от 26.06.96 г.

Цель работы - разработка комплекса научно-технических и технологических мероприятий, направленных на повышение технического уровня производства и качества функционирования кожухотрубчатой теплообменной аппаратуры путем учета реальных форм и размеров поперечных сечений базовых деталей при их взаимной стыковке.

Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- исследование влияния отклонений формы поперечного сечения кожуха на коэффициент эффективности конструкции КТА;
- изучение влияния погрешностей формы и размеров на напряженное состояние зоны сопряжения базовых деталей аппаратов, нагруженных внутренним давлением;
- разработка методов и технических средств контроля формы и размеров поперечных сечений базовых деталей КТА;
- разработка технологии стыковки базовых деталей, позволяющей снизить смещение кромок и зазоры внутри корпусов КТА.

Научная новизна:

- установлены закономерности влияния параметров отклонений формы поперечного сечения кожуха на коэффициент эффективности конструкции КТА. Показано, что с увеличением отклонения формы увеличиваются площади зазоров между кожухом и поперечными перегородками, кожухом и трубным пучком, что ведет к снижению коэффициента эффективности конструкции на 6...12%;
- получена зависимость коэффициента концентрации напряжений в стыковом соединении «обечайка-эллиптическое днище» от геометрических параметров отклонений формы в зоне сопряжения. Показано, что напряженное состояние в данном сопряжении зависит не только от величины смещения кромок, но и от знака смещения, а также от величины угла конусности в отбортовочной части днища;

– разработаны способ контроля и методика оценки геометрических параметров поперечных сечений базовых деталей на основе цифровой обработки дискретно-аналоговых результатов измерений, позволяющие за счет интегральной оценки найти действительный центр сечения и пересчитать измеренные радиусы с учетом найденного центра сечения детали, определить отклонения профиля поперечного сечения от круглости по всему периметру детали.

Практическая ценность

Разработана и внедрена в производство контрольно-измерительная система для контроля формы и размеров базовых деталей КТА, позволяющая оперативно и в полном объеме получать геометрические характеристики поперечных сечений деталей с точностью до $\pm 0,5$ мм.

Разработан технологический процесс сборки корпусов КТА с учетом реальных форм и размеров базовых элементов, позволяющий снизить трудоемкость сборки на 20...30%.

Результаты работы были использованы при разработке стандарта предприятия ОАО "Салаватнефтемаш" СТП 0387-600-99 "Контроль формы и размеров корпусов теплообменных аппаратов" и "Методики контроля формы и диаметров базовых деталей корпусов нефтехимических аппаратов", утвержденной в ОАО "ВНИИПТхимнефтеаппаратуры" (г. Волгоград).

Апробация работы. Основное содержание работы докладывалось и обсуждалось на Международной научно-технической конференции «Проблемы нефтегазового комплекса России» (г. Уфа, 1998 г.), III Международном конгрессе «Защита-98» (г. Москва, 1998 г.), V Международной научной конференции «Методы кибернетики химико-технологических процессов» (г. Уфа, 1999 г.), II научно-техническом семинаре «Обеспечение промышленной безопасности производственных объектов топливно-энергетического комплекса Республики Башкортостан» (г. Уфа, 1999 г.), II Международном симпозиуме «Наука и технология углеводородных дисперсных систем» (г. Уфа, 2000 г.), II Всерос-

сийской научно-технической конференции «Методы и средства измерений» (г. Нижний Новгород, 2000 г.), V межвузовской научно-технической конференции "Проблемы нефтедобычи Волго-Уральского региона" (г. Октябрьский, 2000 г.), III Конгрессе нефтегазопромышленников России (г. Уфа, 2001 г.), Международном Форуме по проблемам науки, техники и образования "III тысячелетие – новый мир" (г. Москва, 2001 г.), 49-й, 50-й и 51-й научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ (г. Уфа, 1998-2000 гг.), научно-технических семинарах кафедры «Технология нефтяного аппаратостроения» УГНТУ (1995-2001 гг.).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в брошюре и 19 научно-технических статьях и тезисах докладов научно-технических конференций, получен один патент на изобретение РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, приложений и содержит 139 страниц машинописного текста, 74 рисунка, 18 таблиц, список использованной литературы из 129 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи исследований.

В первой главе выполнен анализ состояния технологичности конструкций и технологии производства кожухотрубчатой теплообменной аппаратуры (КТА) в отечественном аппаратостроении и за рубежом.

Анализ статистических данных результатов испытаний отечественных стандартных конструкций КТА показал, что до 30 % изделий имеют эксплуатационные характеристики, не соответствующие требованиям нормативно-технической документации (НТД).

Недостаточная тепловая эффективность аппаратов возникает из-за отсутствия обоснованных точностных требований:

- нестандартных соединений с зазором, стыковых, фланцевых штуцеров, муфт, корпуса;

- межосевых расстояний отверстий трубной решетки, влияющих на более полное размещение труб в корпусе аппарата;

- крепления труб в трубной решетке;

- уплотнительных прокладок.

К причинам, снижающим технический уровень отечественных КТА, относятся:

- несовершенство технологии изготовления;

- слабая отработанность конструкций на технологичность, что приводит к повышенной трудоемкости и металлоемкости по сравнению с аналогичными зарубежными образцами;

- отсутствие методов автоматизированного проектирования конструкций и современной технологии производства;

- низкое метрологическое обеспечение;

- отсутствие фонда НТД.

Таким образом, проведенный анализ состояния технического уровня производства КТА на заводах отрасли позволил выявить характерные недостатки конструкций выпускаемой теплообменной аппаратуры и несовершенство технологии изготовления, к наиболее существенным из которых относятся следующие:

- недостаточная тепловая эффективность, обусловленная слабой отработкой изделий на технологичность по стадиям жизненного цикла, значительной фактической площадью зазора между корпусом и перегородками трубного пучка вследствие необоснованного назначения отклонений точности размеров и формы, отсутствия методики построения основной нормы взаимозаменяемости элементов нестандартных соединений;

- недостаточная надежность из-за разгерметизации узлов крепления труб и фланцевых соединений, образования трещин в сварных швах стыковых соединений базовых деталей;

- повышенная металлоемкость в сравнении с аналогичными зарубежными образцами.

Дальнейший скачок в повышении качества КТА возможен в значительном улучшении потребительских свойств (точность, надежность, взаимозаменяемость, однородность) и повышении эффективности сборки. Он может выразиться в более эффективном соединении деталей, уменьшении количества собираемых элементов или даже в полном отказе от сборочных операций при использовании новых материалов, использовании методов стандартизации, создании технических систем контроля, переходе на управляемую и автоматизированную гибкую сборку в связи с успехами в развитии микропроцессорных систем управления и робототехники.

Результаты исследований процесса сборки кольцевых стыковых соединений теплообменной аппаратуры, проведенных в нефтеаппаратурных цехах ОАО "Салаватнефтемаш", приведенные в таблице, показывают, что трудоемкость сборки кольцевого стыкового соединения "днище-обечайка" в два раза, а соединения "днище-корпус" в два с половиной раза больше трудоемкости сборки стыка "обечайка-обечайка". Значения трудоемкости имеют тенденцию роста с увеличением диаметра и толщины стенки стыкуемых базовых деталей.

Трудоемкость сборки кольцевых стыковых соединений аппаратов

Наименование соединения	Трудоемкость сборочных работ, %			K_c
	подготовительные	собственно сборочные	пригоночно-доделочные	
днище-корпус	10...12	22...26	62...68	0,27
днище-обечайка	14...18	24...36	46...62	0,36
обечайка-обечайка	28...32	50...56	12...22	0,76

Значения коэффициента собираемости (K_c), характеризующего уровень собираемости и объем пригоночно-доделочных работ при сборке кольцевых соединений, колеблются в довольно широких интервалах: для стыкового соединения "днище-корпус" в пределах 0,24...0,29; "днище-обечайка" - 0,28...0,44; "обечайка-обечайка" - 0,69...0,82.

Объем пригоночно-доделочных работ, выполняемых для обеспечения установленных допусков на смещение кромок кольцевых стыковых соединений днищ с обечайками, высок и составляет 32...66% от общей трудоемкости сборочных работ. Собираемость кольцевых соединений "днище-обечайка" и "днище-корпус" в несколько раз ниже, чем соединения "обечайка-обечайка". Таким образом, в аппаратостроении днище является ведущей базовой деталью.

Собираемость кольцевых стыковых соединений базовых деталей можно было бы значительно улучшить при наличии контрольно-измерительных устройств, позволяющих быстро и в полном объеме получить информацию о геометрических характеристиках поперечных сечений деталей. Но имеющиеся в настоящее время на аппаратостроительных предприятиях средства не позволяют этого сделать. Поэтому актуальной является проблема разработки оперативного способа контроля геометрических характеристик поперечных сечений базовых деталей корпусов аппаратов.

Возникающие в процессе изготовления отклонения формы и размеров поперечных сечений базовых деталей оказывают влияние на напряженно-деформированное состояние корпусов аппаратов при нагружении внутренним или внешним давлением. В работе разработаны методики учета влияния отклонений формы на прочность корпусов аппаратов, нагруженных внутренним давлением.

Вторая глава посвящена исследованию влияния отклонений формы поперечного сечения кожухов на коэффициент эффективности конструкции КТА.

Коэффициент теплоотдачи в межтрубном пространстве теплообменника определяется по формуле

$$\alpha = J_{tot} \cdot \alpha_i,$$

где J_{tot} - общий коэффициент эффективности конструкции аппарата; α_i - коэффициент теплоотдачи идеального пучка при поперечном омывании.

Коэффициент эффективности конструкции рассчитывается по выражению

$$J_{tot} = J_s J_b J_l J_c J_r,$$

где J_s - коэффициент, учитывающий шаг размещения перегородок на входном и выходном участках межтрубного пространства; J_b - коэффициент, учитывающий байпасный переток между корпусом и периферией пучка; J_l - коэффициент, учитывающий переток между корпусом и перегородкой, перегородкой и трубами; J_c - коэффициент, учитывающий теплопередачу в окне сегментной перегородки; J_r - коэффициент, учитывающий противоположные градиенты температур, возникающие при ламинарном течении.

От точности изготовления кожуха по форме и внутреннему диаметру поперечного сечения зависят поправочные коэффициенты J_l и J_b .

На основе анализа влияния отклонений формы поперечного сечения кожуха (овальность, угловатость и смещение кромок в продольном шве) на площади зазоров в межтрубном пространстве теплообменников были установлены аналитические зависимости коэффициентов J_l и J_b от параметров отклонений формы. На рис. 1 и 2 приведены зависимости данных коэффициентов от величины овальности сечения кожуха для четырех типоразмеров теплообменников.

С увеличением параметров отклонений формы поправочные коэффициенты, а следовательно и коэффициент эффективности конструкции, уменьшаются. Было установлено, что допускаемые согласно НТД отклонения формы поперечного сечения кожуха могут снизить коэффициент эффективности конструкции КТА на 6...12%.

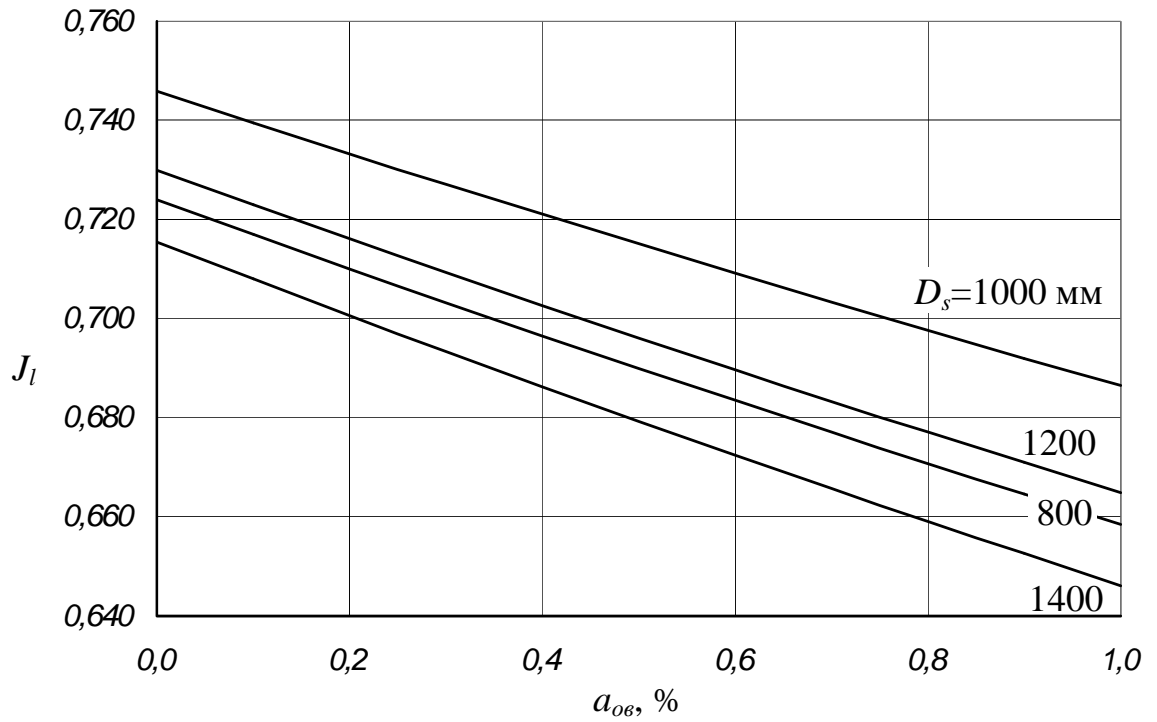


Рис. 1. Зависимость поправочного коэффициента J_l от величины овальности сечения кожуха

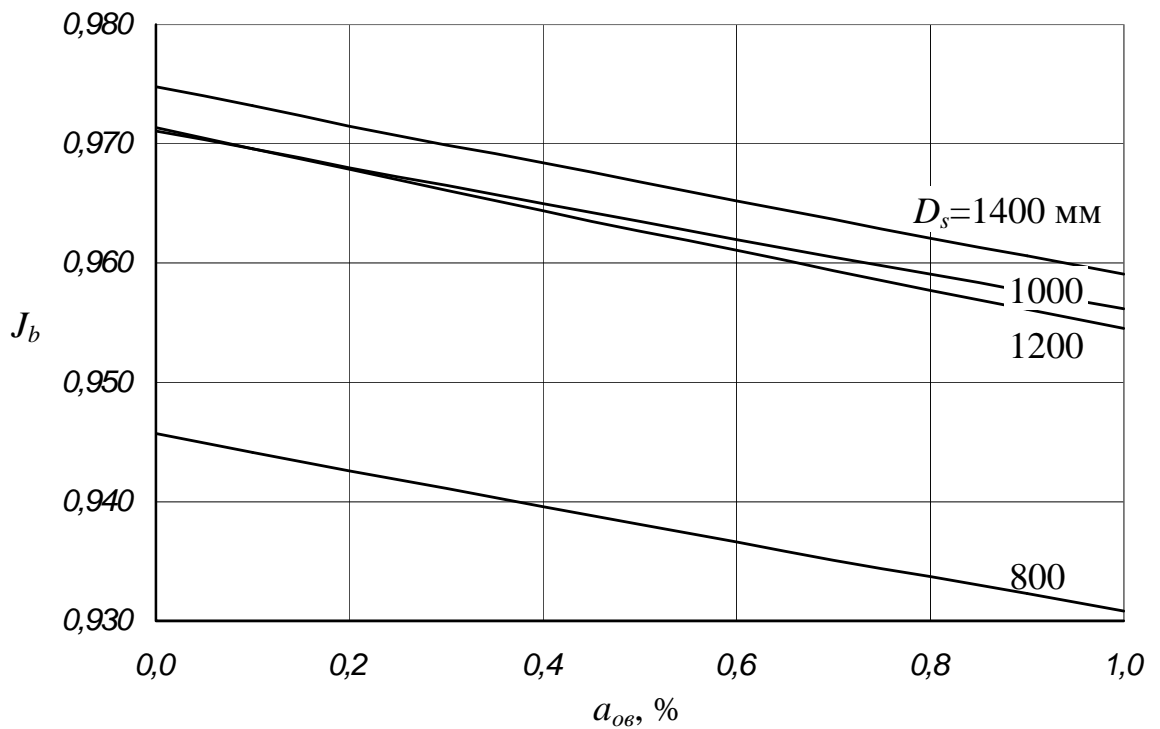


Рис. 2. Зависимость поправочного коэффициента J_b от величины овальности сечения кожуха

Во второй главе также исследовано влияние отклонений формы на напряженно-деформированное состояние корпусов аппаратов, нагруженных внутренним давлением.

Одними из распространенных отклонений формы в зоне сопряжения “обечайка-эллиптическое днище” являются смещение кромок и конусность отбортовочной части днища, которые возникают в процессе изготовления аппаратов. Смещение кромок имеет технологическое происхождение. Его конечная величина представляет собой результат накопившихся погрешностей на всем потоке заготовительных, формоизменяющих и сборочных операций

Исследованию влияния смещения кромок на работоспособность аппаратуры посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных исследователей, в которых доказано отрицательное влияние смещения кромок на напряженное состояние кольцевого сварного соединения.

В то же время в литературных источниках недостаточно данных о напряженном состоянии кольцевого стыкового соединения “обечайка-днище”.

В аппаратостроении находят наиболее широкое применение стандартные эллиптические днища. Поэтому представляет интерес рассмотрение влияния отклонений формы в зоне сопряжения “обечайка-эллиптическое днище” на напряженное состояние краевой зоны сосудов давления.

Для исследования указанного выше влияния был использован метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет учесть особенности геометрии зоны сопряжения.

Смещение кромок при равенстве толщин стенок обечайки и днища характеризуется величиной

$$c = \frac{D_{об} - D_{дн}}{2},$$

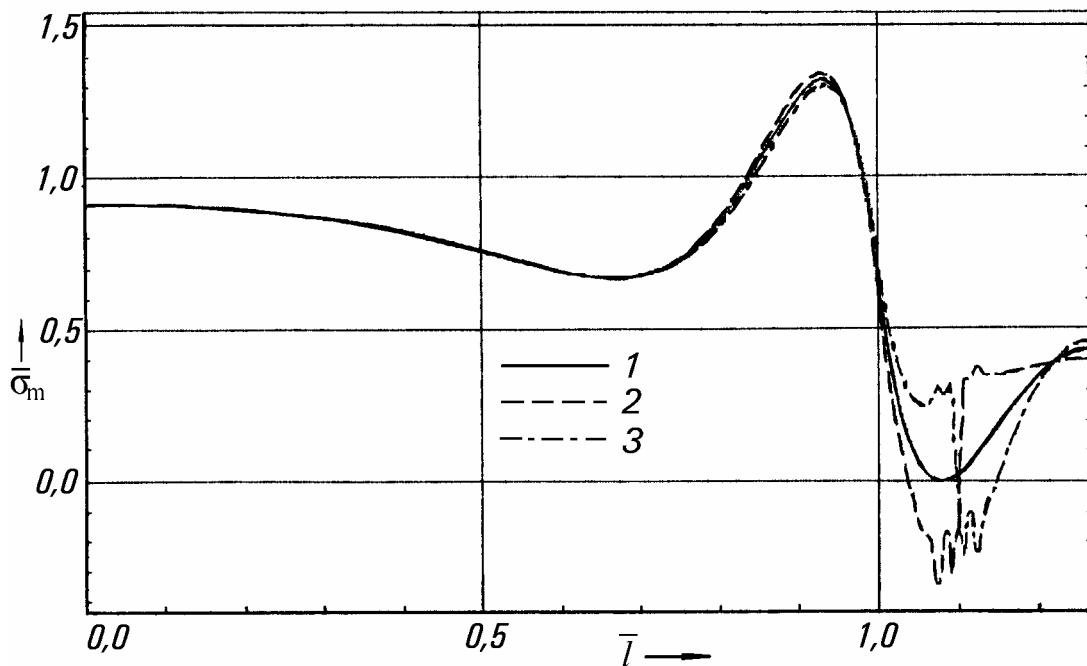
где $D_{об}$ - внутренний диаметр обечайки; $D_{дн}$ - внутренний диаметр днища.

На рис. 3 и 4 показаны распределения меридиональных напряжений вдоль образующей аппарата для его внутренней и наружной поверхностей для случаев смещения кромок $c = 0$; $s/4$; $-s/4$, где s - толщина стенки днища. Коэф-

коэффициент толстостенности днищ $\beta = s/D_{\text{дн}} = 0,01$. Толщины днищ и цилиндрических обечаек были приняты одинаковыми. Напряжения и расстояние вдоль образующей аппарата, отмеряемое от полюса днища, представлены на ниже приводимых рисунках в относительных величинах

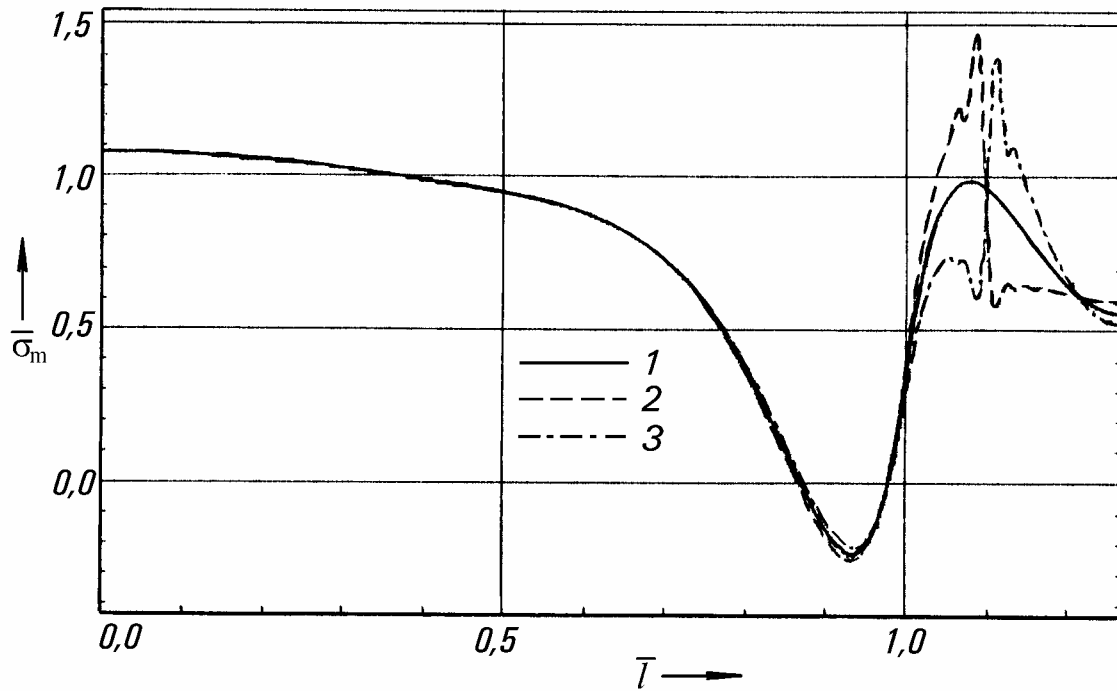
$$\bar{\sigma}_m = \frac{\sigma_m}{\sigma_{\theta}^{\text{об}}}; \quad \bar{l} = \frac{l}{l_{\text{э}}},$$

где σ_m - меридиональные напряжения; $\sigma_{\theta}^{\text{об}} = \frac{pD_{\text{в}}}{2s}$ - окружное напряжение в обечайке того же диаметра, что и днище, по безмоментной теории оболочек; p - внутреннее давление; $D_{\text{в}}$ - внутренний диаметр днища ($D_{\text{в}} = D_{\text{дн}}$); s - толщина стенки днища; $l_{\text{э}}$ - четверть периметра эллипса, описывающего профиль сечения днища.



1 – смещение $c = 0$; 2 – $c = s/4$; 3 – $c = -s/4$

Рис. 3. Распределение меридиональных напряжений вдоль образующей аппарата на внутренней поверхности днища и в зоне, прилегающей к стыку



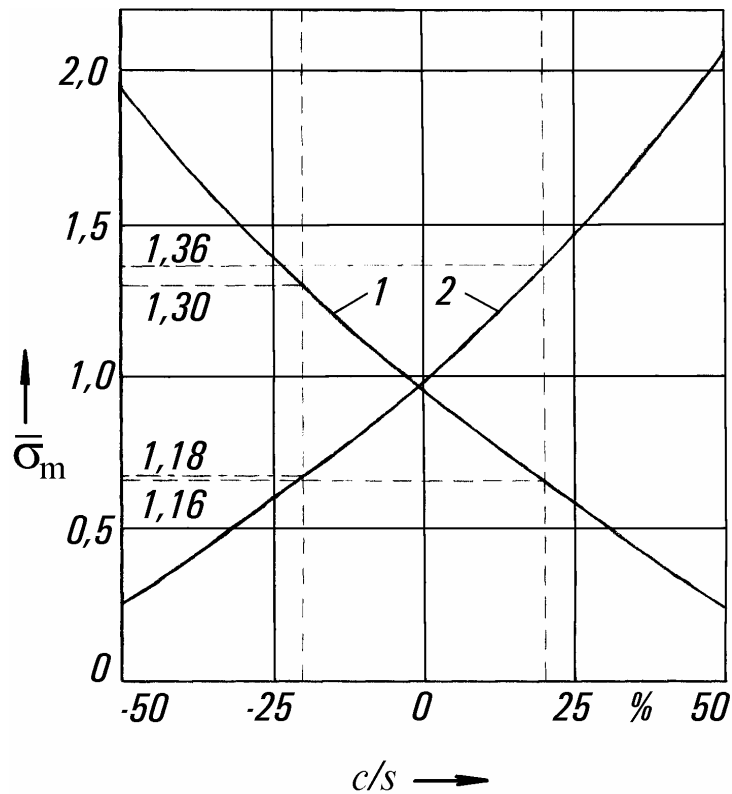
1 – смещение $c = 0$; 2 – $c = s/4$; 3 – $c = -s/4$

Рис. 4. Распределение меридиональных напряжений вдоль образующей аппарата на наружной поверхности днища и в зоне, прилегающей к стыку

Как видно из приведенных рисунков, знак смещения кромок определяет характер распределения напряжений в краевой зоне. В случае положительного смещения кромок, т.е. когда $D_{\text{дн}} < D_{\text{об}}$, имеет место значительное возрастание напряжений на наружной поверхности днища в зоне, прилегающей к стыку. При отрицательном смещении кромок, т.е. когда $D_{\text{дн}} > D_{\text{об}}$, возрастание меридиональных и эквивалентных напряжений имеет место на наружной поверхности краевой зоны обечайки.

На рис. 5 показана зависимость максимальных напряжений на наружной поверхности краевой зоны со стороны обечайки и днища от величины смещения c при $\beta=0,01$. Штриховые вертикальные линии соответствуют допускаемым значениям смещения кромок согласно ОСТ 26 291-94.

Наличие конусности в отбортовочной части эллиптического днища также оказывает влияние на распределение напряжений в краевой зоне сопряжения обечайки и днища. Было проведено исследование влияния угла конусности отбортовочной части днищ на напряженное состояние сосудов давления.



1 – со стороны обечайки; 2 – со стороны днища

Рис. 5. Зависимость меридиональных напряжений на наружной поверхности в зоне шва от величины смещения кромок в стыке “обечайка-днище”

Было установлено, что отклонения формы в зоне сопряжения “ обечайка-эллиптическое днище ” могут оказывать значительное влияние на напряженное состояние сосудов давления в краевой зоне даже в пределах допустимых значений согласно нормативно-технической документации на изготовление. При этом наиболее существенно изменяются распределения для меридиональных напряжений. В случае одновременного наличия нескольких отклонений формы, их взаимное влияние может усиливаться или ослабляться.

Третья глава посвящена разработке способа и средств контроля формы и размеров базовых деталей КТА, методики обработки результатов замеров.

Разработанный способ контроля заключается в следующем.

Измерительное устройство помещают внутрь контролируемой детали, причем ось вращения устройства устанавливают относительно оси вращения детали приблизительно, с точностью до $\pm 20\%$ от диаметра. Далее вращают вокруг оси водило, в направляющих которого установлена с возможностью пере-

мещения в радиальном направлении подпружиненная измерительная штанга с роликом на ее конце, катящимся по проверяемой поверхности детали. Значения текущих радиуса детали и угла поворота водила через определенные промежутки с помощью датчиков передаются электронному устройству (например, компьютеру), которое накапливает результаты замеров, контролирует величину угла поворота водила и при совершении водилом полного оборота численным интегрированием с использованием массива значений углов и радиусов контрольных точек находит положение центра тяжести сечения детали, пересчитывает углы и радиусы контрольных точек детали относительно центра тяжести сечения детали, определяет периметр и средний диаметр сечения, максимальные отклонения формы от круглости и диаметров от номинального значения.

Положение центра вращения водила O характеризуется координатами x_0 и y_0 относительно осей сечения детали (рис. 6). Замер радиусов контрольных точек производится при вращении водила с шагом по углу, равным $\Delta\varphi$. По результатам измерений получают массивы значений радиусов r_i и угловых координат φ_i контрольных точек, которые образуют табличную зависимость $r_i=f(\varphi_i)$, где i – номер контрольной точки.

Положение центра тяжести сечения детали определяется относительно центра вращения водила координатами, которые рассчитываются по формулам:

$$\varphi_c = \operatorname{arctg} \frac{S_x}{S_y}; \quad r_c = \frac{S_y}{S \cos \varphi_c},$$

где S – площадь сечения детали; S_x и S_y – статические моменты сечения детали относительно осей x и y соответственно.

Площадь сечения и статические моменты определяются по зависимостям:

$$S = \frac{\Delta\varphi}{6} \cdot \sum_{i=0}^n r_i^2 \cdot w_i;$$

$$S_x = \frac{\Delta\varphi}{3} \cdot \sum_{i=0}^n \left(w_i \cdot \frac{\Delta r_i}{3} \cdot \cos \varphi_i \cdot \sum_{j=0}^m r_j^2 \cdot w_j \right);$$

$$S_y = \frac{\Delta\varphi}{3} \cdot \sum_{i=0}^n \left(w_i \cdot \frac{\Delta r_i}{3} \cdot \sin \varphi_i \cdot \sum_{j=0}^m r_j^2 \cdot w_j \right),$$

где w_i – весовые коэффициенты численного интегрирования.

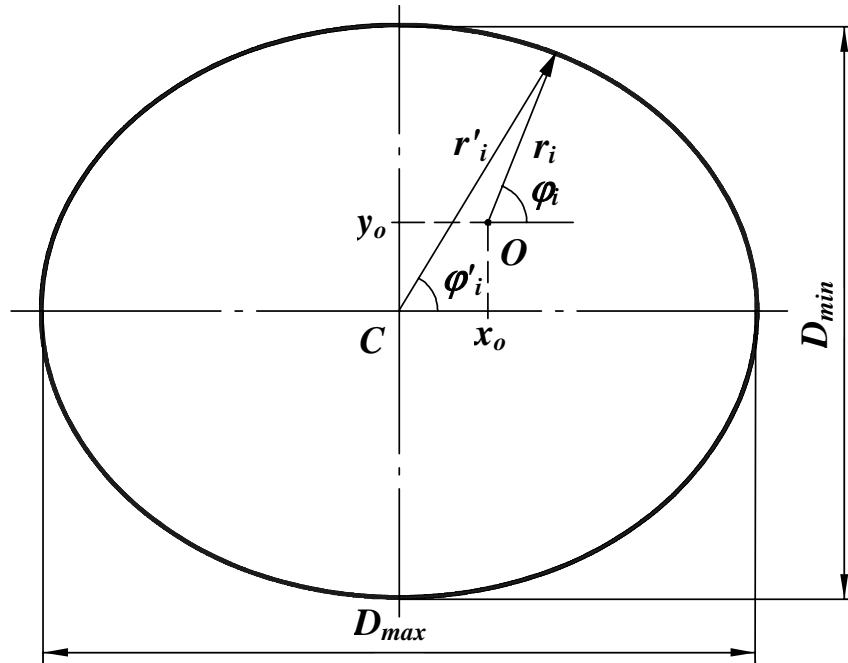


Рис. 6. Схема контроля внутренней поверхности базовой детали

После нахождения положения центра тяжести сечения детали C пересчитываются значения r_i и φ_i контрольных точек относительно центра тяжести сечения C . Новые значения радиусов и углов находятся по формулам:

$$r'_i = \sqrt{r_i^2 + r_c^2 - 2 \cdot r_i \cdot r_c \cdot \cos(\varphi_i - \varphi_c)};$$

$$\varphi'_i = \arctg \left(\frac{r_i \cdot \sin \varphi_i - r_c \cdot \sin \varphi_c}{r_i \cdot \cos \varphi_i - r_c \cdot \cos \varphi_c} \right).$$

Таким образом, получаем новую зависимость $r'_i = f(\varphi'_i)$, используя которую находим периметр сечения детали, средний диаметр, максимальный и минимальный диаметры сечения, величину отклонения от круглости, наибольшее отклонение диаметра от среднего значения.

На разработанный способ контроля получен патент на изобретение РФ № 2166729.

Для возможности осуществления указанного способа контроля были разработаны контрольно-измерительные устройства (профилографы) нескольких конструкций (для малогабаритной и крупногабаритной аппаратуры).

Профилографы позволяют записывать профилограмму сечения детали в память компьютера. Они осуществляют контроль размеров по внутренней поверхности цилиндрических деталей.

Рассматриваемые профилографы позволяют контролировать и измерять все виды отклонений формы и размеров поперечных сечений цилиндрических деталей: овальность, огранку, угловатость в продольном шве, смещение кромок, отклонение периметра (среднего диаметра). Данные устройства дают возможность заменить такие широко применяемые в настоящее время на производстве средства измерений и контроля, как линейки, рулетки, нутромеры, шаблоны, при этом значительно повысив точность замеров и контроля.

На базе профилографов создана контрольно-измерительная система (КИС), позволяющая автоматизировать процесс измерений и обработки результатов замеров. Точность измерений КИС составляет $\pm 0,5$ мм. Если КИС подключить к исполнительным механизмам сборочных устройств, то это позволит автоматизировать процесс сборки базовых деталей корпусов аппаратов по оптимальному варианту.

В четвертой главе выполнена разработка технологии сборки корпусов аппаратов с учетом реальных форм и размеров сечений базовых деталей.

Сборка стыкуемых деталей осуществляется за счет оптимизации взаимного расположения поперечных сечений деталей с целью минимизации образующегося смещения кромок из-за наличия отклонений формы сечений. Для возможности осуществления данного вида сборки была разработана конструкция сборочного станда.

Основу станда для сборки цилиндрических корпусов аппаратов составляет роликовый станд, состоящий из двух частей. Первая часть представляет собой типовой роликовый станд, дополнительно оборудованный роликовым кон-

вейером. Вторая часть стенда для сборки цилиндрических корпусов аппаратов выполнена в виде подъемной платформы, оборудованной двумя парами роликоопор. Одна из стыкуемых деталей располагается на основной части роликового стенда, вторая деталь – на подъемной платформе. Сборочный стенд оборудован контрольно-измерительной системой, позволяющей получить геометрические характеристики сечений стыкуемых деталей. Для обеих замеренных деталей компьютер по заданному алгоритму определяет наиболее оптимальный вариант размещения поперечных сечений стыкуемых обечаек. Далее по командам компьютера подъемная платформа перемещает в вертикальном направлении и поворачивает на нужный угол размещенную на ней обечайку. За счет горизонтального продольного перемещения платформы обеспечивается необходимый сварочный зазор. После этого осуществляется прихватка стыкуемых обечаек.

Выводы и рекомендации по работе

1. Предложены зависимости для оценки коэффициента эффективности конструкции кожухотрубчатых аппаратов, имеющих допустимые отклонения формы поперечного сечения кожуха в виде овальности, угловатости и смещения кромок в продольном шве. Данные зависимости позволяют оценить тепловую эффективность КТА с учетом реальной формы и размеров сечения кожуха аппарата.

2. Изучены особенности напряженно-деформированного состояния зоны сопряжения "обечайка-эллиптическое днище" с учетом отклонений формы в виде смещения кромок и конусности отбортовочной части. Полученные распределения напряжений в корпусах аппаратов, имеющих отклонения формы в зоне стыка "обечайка-эллиптическое днище", позволяют оценить ресурс КТА при действии нестационарных нагрузок и коррозионном воздействии среды.

3. Разработаны способ контроля и методика оценки геометрических параметров поперечных сечений базовых деталей на основе цифровой обработки дискретно-аналоговых результатов измерений, позволяющие за счет интеграль-

ной оценки найти действительный центр сечения и пересчитать измеренные радиусы с учетом найденного центра сечения детали, определить отклонения профиля поперечного сечения от круглости по всему периметру детали.

4. Разработана и внедрена в производство контрольно-измерительная система для контроля формы и размеров базовых деталей КТА, позволяющая оперативно и в полном объеме получать геометрические характеристики поперечных сечений деталей с точностью до $\pm 0,5$ мм.

5. Разработан технологический процесс сборки корпусов КТА с учетом реальных форм и размеров базовых элементов, позволяющий снизить трудоемкость сборки на 20...30%. Разработаны и внедрены в производство методика и стандарт предприятия по контролю формы и размеров базовых деталей корпусов теплообменных аппаратов.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ризванов Р.Г., Абдеев Р.Г., Инсафутдинов А.Ф. Современные методы и средства контроля формы и размеров корпусов аппаратов: Методические рекомендации. - Уфа: УГНТУ, 1997. – 40 с.

2. Забатурин А.М., Инсафутдинов А.Ф., Ризванов Р.Г. Оценка смещения кромок при стыковке соосных цилиндрических деталей, имеющих овальность поперечного сечения // Материалы 49-й науч.-техн. конфер. студентов, аспирантов и молодых ученых. - Уфа: УГНТУ, 1998. - С. 179.

3. Инсафутдинов А.Ф., Ризванов Р.Г. Оценка ресурса нефтехимических аппаратов с учетом отклонений формы базовых деталей // Материалы 49-й науч.-техн. конфер. студентов, аспирантов и молодых ученых. - Уфа: УГНТУ, 1998. - С. 183-184.

4. Гареев Р.Р., Инсафутдинов А.Ф., Ризванов Р.Г. Устройство для контроля поперечных сечений базовых деталей аппаратов // Материалы 49-й науч.-техн. конфер. студентов, аспирантов и молодых ученых. - Уфа: УГНТУ, 1998. - С. 180-181.

5. Ризванов Р.Г., Инсафутдинов А.Ф. Учет отклонений формы базовых деталей при оценке остаточного ресурса корпусов нефтехимических аппаратов // Проблемы нефтегазового комплекса России: Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. - Уфа: УГНТУ, 1998. - С. 197.

6. Ризванов Р.Г., Инсафутдинов А.Ф. Оптимизация стыковки базовых деталей при изготовлении корпусов нефтехимических аппаратов // Проблемы нефтегазового комплекса России: Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. - Уфа: УГНТУ, 1998. - С. 195.

7. Абдеев Р.Г., Ризванов Р.Г., Забатурин А.М., Инсафутдинов А.Ф. Технологическое обеспечение изготовления кожухотрубчатой теплообменной аппаратуры повышенной тепловой эффективности // Проблемы нефтегазового комплекса России: Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. - Уфа: УГНТУ, 1998. - С. 196.

8. Ризванов Р.Г., Инсафутдинов А.Ф. Оценка влияния отклонений формы на прочность цилиндрических корпусов сосудов давления // Тез. докл. III Международного конгресса "Защита-98". - М.: Нефть и газ, 1998. - С. 20.

9. Ризванов Р.Г., Абдеев Р.Г., Инсафутдинов А.Ф. Повышение качества изготовления нефтехимических аппаратов совершенствованием средств контроля формы и размеров базовых деталей // Тез. докл. III Международного конгресса "Защита-98". - М.: Нефть и газ, 1998. - С. 5.

10. Ризванов Р.Г., Абдеев Р.Г., Матвеев Н.Л., Инсафутдинов А.Ф. Оптимизация сборки корпусов аппаратов с учетом отклонений формы сечений базовых деталей // Методы кибернетики химико-технологических процессов: Тез. докл. V Международ. науч. конф. Т. 2; Кн. 2. – Уфа: УГНТУ, 1999. – С. 42-44.

11. Ризванов Р.Г., Каримов М.Ш., Инсафутдинов А.Ф. Оценка напряженно-деформированного состояния аппаратов с учетом геометрии зоны сопряжения "обечайка-эллиптическое днище" // Методы кибернетики химико-технологических процессов: Тез. докл. V Международ. науч. конф. Т. 2; Кн. 2. – Уфа: УГНТУ, 1999. – С. 44-46.

12. Ризванов Р.Г., Шарафиев М.Р., Инсафутдинов А.Ф. Влияние различия модулей упругости слоев биметалла на напряженное состояние эллиптических днищ нефтехимических аппаратов // Обеспечение промышленной безопасности производственных объектов топливно-энергетического комплекса Республики Башкортостан: Материалы 2-го науч.-техн. семинара. – Уфа: УГНТУ, 1999. – С. 125-132.

13. Ризванов Р.Г., Шарафиев М.Р., Инсафутдинов А.Ф. Исмагилов М.А. Влияние взаимного расположения базовых деталей нефтехимических аппаратов с овальностью сечения на распределение смещения кромок // Обеспечение промышленной безопасности производственных объектов топливно-энергетического комплекса Республики Башкортостан: Материалы 2-го науч.-техн. семинара. – Уфа: УГНТУ, 1999. – С. 182-186.

14. Ризванов Р.Г., Абдеев Р.Г., Матвеев Н.Л., Рыскулов Р.Г., Шенкнехт А.И., Инсафутдинов А.Ф. Влияние геометрии зоны сопряжения "обечайка-эллиптическое днище" на напряженное состояние сосудов давления. – М.: Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2000. - № 4. – С. 16-17.

15. Абдеев Р.Г., Ризванов Р.Г., Файрушин А.М., Инсафутдинов А.Ф. Оптимизация взаимного расположения стыкуемых блоков обечаек корпусов содовых печей // Наука и технология углеводородных дисперсных систем: Материалы II Международного симпозиума. Т. 2. – Уфа: ГИНТЛ "Реактив", 2000. – С. 202-203.

16. Ризванов Р.Г., Инсафутдинов А.Ф., Давлетшина Е.М. Контрольно-измерительная система для контроля формы и диаметров базовых деталей нефтехимической аппаратуры // Наука и технология углеводородных дисперсных систем: Материалы II Международного симпозиума. Т. 2. – Уфа: ГИНТЛ "Реактив", 2000. – С. 213-214.

17. Ризванов Р.Г., Инсафутдинов А.Ф., Файрушин А.М. Метод контроля геометрических параметров поперечных сечений базовых деталей нефтехимических аппаратов // Методы и средства измерений: Тез. докл. 2-й Всеросс. на-

уч.-техн. конф. – Нижний Новгород: Межрег. В.-Волжск. отд. АТН РФ, 2000. – С. 24.

18. Инсафутдинов А.Ф., Ризванов Р.Г. Автоматизированная система контроля формы и диаметров базовых деталей нефтегазового оборудования // Проблемы нефтедобычи Волго-Уральского региона: Сб. тез. докл. V межвуз. науч.-метод. конф. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2000. – С. 117-119.

19. Ризванов Р.Г., Инсафутдинов А.Ф. Повышение тепловой эффективности кожухотрубчатых теплообменников применением автоматизированной системы контроля поперечных сечений корпусов // III Конгресс нефтегазопромышленников России. Секция Н "Проблемы нефти и газа" (г. Уфа, 23-25 мая 2001 г.): Научные труды. – Уфа: ГИНТЛ "Реактив", 2001. – С. 338-339.

20. Ризванов Р.Г., Инсафутдинов А.Ф. Влияние отклонений формы сечения кожуха на коэффициент эффективности конструкции кожухотрубчатых теплообменных аппаратов // Труды Международного Форума по проблемам науки, техники и образования. – М.: Академия наук о Земле, 2001. – С. 124-137.

21. Патент РФ № 2166729. Способ контроля формы и диаметров внутренних сечений крупногабаритных цилиндрических деталей / Р.Г. Ризванов, А.Ф. Инсафутдинов, Р.Г. Абдеев. – 2001. - Бюл. № 13.

Соискатель

А.Ф. Инсафутдинов