

УДК 66.048.37:539.4

**АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ КОЛОННОГО АППАРАТА ИЗ ДВУХСЛОЙНОЙ  
СТАЛИ 16ГС+08Х13 С УЧЕТОМ РАССЛОЕНИЯ МЕТАЛЛА**

**TWO-PLY 16GS+08X13 STEEL COLUMN STRESS-STRAIN STATE  
ANALYSIS WITH METAL DELAMINATION TAKEN INTO ACCOUNT**

Закирничный Г.Е., Айбатуллин Р.Г., Мавлеткулов У.Р.,  
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный нефтяной  
технический университет», г. Уфа, Российская Федерация

G.E. Zakirnichny, R.G. Aibatullin, U.R. Mavletkulov,  
FSBEI NPE “Ufa State Petroleum Technological University”,

Ufa, the Russian Federation

e-mail: mavletkulovmmo@gmail.com

**Аннотация.** Основным массообменным оборудованием в технологических процессах нефтепереработки являются колонные аппараты. При этом широкое применение нашли колонные аппараты, выполненные из двухслойных сталей с целью экономии дорогостоящих материалов. В настоящее время определение остаточного ресурса таких колонных аппаратов базируется на стандартных методиках расчета в области прочности сосудов и аппаратов. Однако существующие методы расчетов на прочность основаны на упрощенном представлении колонного аппарата на различных этапах расчета и не позволяют получить комплексную картину его напряженно-деформированного состояния (НДС) с учетом геометрических особенностей и двухслойности обечайки.

Известно, что НДС оборудования оказывает значительное влияние на процессы накопления повреждений при эксплуатации. Одним из наиболее распространенных дефектов в обечайке колонных аппаратов, выполнен-

ных из двухслойных сталей, является расслоение между основным и плакирующим слоями за счет появления обезуглероженного слоя в процессе длительной эксплуатации.

В данной работе с помощью программного комплекса ANSYS, реализующего метод конечных элементов, исследовалось напряженно-деформированное состояние колонного аппарата с учетом:

- размеров и расположения штуцеров и люков;
- собственного веса и рабочих параметров;
- результатов исследований механических свойств двухслойной стали 16ГС+08Х13 колонного аппарата в состоянии поставки и после длительной эксплуатации на установке термического крекинга;
- двухслойности оболочки.

Определено, что максимальные значения напряжений в наиболее нагруженной кубовой части аппарата при номинальной толщине стенки достигают в двухслойной модели 228 МПа, что превышает значения напряжений, полученных для однослойной модели почти на 80 МПа. Получена зависимость максимальных значений напряжений от размера дефекта типа расслоение при расположении его в наиболее и наименее нагруженной зонах кубовой части колонного аппарата для металла в состоянии поставки и после длительной эксплуатации.

**Abstract.** Columns are the main mass transfer equipment used in oil refining processes. In this regard, in order to save expensive materials, two-ply steel columns became widely used. Currently, the determination of residual life of such columns is based on standard methods of strength calculations for vessels and apparatuses. However, the existing methods of strength calculations are based on a simplified representation of the column apparatus at various stages of calculation and do not provide a comprehensive picture of its stress-strain state (SSS) taking into account geometrical features and the fact that the shell is double-layer.

It is known that SSS of equipment produces considerable influence on the processes of damage accumulation during operation. One of the most prevalent defects in the shell of two-ply steel columns is delamination between the main layer and cladding layers due to the formation of a decarburized layer in the process of continuous operation.

The column stress-strain state was analyzed in this paper with the use of ANSYS software implementing the finite element method, considering as follows:

- the size and location of manholes and nozzles;
- dead load and operating parameters;
- the results of investigations of two-ply 16GS+08X13 steel column mechanical properties in the as delivered condition and after continuous operation at a thermal cracking unit;
- double-layer shell.

It is established that the maximum stresses in the most loaded bottom of the column with a nominal wall thickness in a double-layer model reach 228 MPa, which is almost 80 MPa higher than the stress values obtained for a single-layer model. The dependence of maximum stress values on the size of delamination defect is determined with the defect being located in the most loaded and the least loaded zones of the column bottom for the metal being in the as delivered condition and after continuous operation.

**Ключевые слова:** колонный аппарат, остаточный ресурс, метод конечных элементов, расслоение, двухслойные сосуды, плакирование, напряженно-деформированное состояние.

**Key words:** column, residual life, finite element method, delamination, double-layer vessels, metal cladding, stress-strain state.

Биметаллы нашли широкое применение в качестве материала корпусов сосудов и аппаратов для технологических процессов с агрессивными сре-

дами, где более дешевый основной слой несет нагрузку, а более дорогой плакирующий слой защищает основной металл от интенсивного разрушающего воздействия со стороны среды, что позволяет получить положительный экономический эффект. В настоящее время металлургическая промышленность обладает множеством методов создания биметаллов, но наиболее часто их получают или заливкой, или сборкой в пакет с последующей совместной пластической деформацией [1].

Для аппаратов, выполненных из двухслойных сталей, характерно возникновение дефекта типа расслоения, причем не только при изготовлении и монтаже, но и в процессе эксплуатации в результате деградации структуры металла и возникающего из-за этого процесса охрупчивания [2]. Также две стали, разделенные неширокой зоной сплавления промежуточного сплава, существенно отличаются по содержанию легирующих элементов и, прежде всего, никеля и хрома, а также углерода и других, в основном, карбидообразующих. Различны в этих сталях содержание железа, а также их фазовые структурные состояния, но при этом они объединены схожестью атомно-кристаллического строения и металлической связью.

Существующие методы расчетов на прочность сосудов и аппаратов основаны на упрощенном представлении колонного аппарата на различных этапах расчета, например, ввиду тонкости плакирующего слоя можно не учитывать его толщину при определении несущей способности корпуса [3-5]. Кроме того, стандартные расчеты не позволяют оценить неоднородность напряженно-деформированного состояния (НДС), вызванную наличием в корпусе колонного аппарата отверстий под люки и штуцеры [6] и, соответственно, выявить дополнительные зоны концентрации напряжений, превышающих допустимые значения и оказывающих значительное влияние на процессы накопления повреждений при эксплуатации.

Одним из наиболее распространенных дефектов в обечайке колонных аппаратов, выполненных из двухслойных сталей, является расслоение, которое представляет собой вытянутое, плоскостное нарушение сплошности

материала различной величины, расположенное внутри стенки сосуда вдоль направления соединения основного и плакирующего слоя за счет появления обезуглероженного слоя в процессе длительной эксплуатации. В связи с этим следует признать актуальным исследование, посвященное определению расположения и размеров зон концентрации напряжений в колонных аппаратах с учетом размеров и расположения штуцеров и люков для выявления в их корпусе наиболее вероятных мест появления дефекта типа расслоение и степень его влияния на общее напряженно - деформированное состояние колонного аппарата.

В качестве объекта исследования была выбрана вертикальная цельносварная ректификационная колонна установки термического крекинга одного из нефтеперерабатывающих заводов г. Уфы, предназначенная для отделения от остатка висбрекинга жирного газа, бензина и флегмы. Материалом основного слоя для данного колонного аппарата является сталь 16ГС, плакирующего - сталь 08Х13. Высота аппарата составляет 24550 мм, внутренний диаметр - 2400 мм. Расчетное давление внутри аппарата 1,5 МПа, температура верха - 200 °С, низа - 400 °С.

НДС колонного аппарата определялось с использованием программного комплекса (ПК) ANSYS. На первом этапе НДС оценивалось для всего аппарата в целом с учетом геометрических особенностей. Для решения задачи совместного термосилового нагружения был выбран восьмиузловой четырехугольный элемент SOLID5, предназначенный для решения связанных задач. Были наложены граничные условия, исходя из опыта использования ПК ANSYS аспирантами и сотрудниками кафедры ТМО [6]: в горизонтальном направлении выполнялось ограничение перемещений вдоль оси X ( $U_X = 0$ ) для узлов, лежащих на оси Z и, соответственно, ограничение перемещений вдоль оси Z ( $U_Z = 0$ ) для узлов, лежащих на оси X; в вертикальном направлении производилось ограничение перемещений вдоль оси Y ( $U_Y = 0$ ) всех узловых точек опорной поверхности нижнего опорного кольца (рисунок 1).

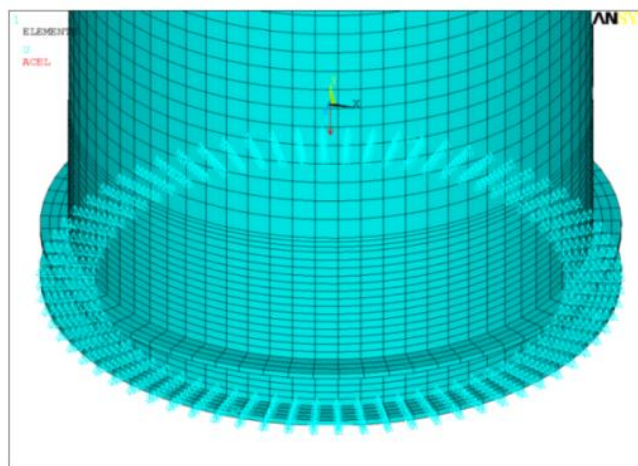


Рисунок 1. Граничные условия для колонного аппарата

В результате расчета было определено, что наиболее нагруженным участком является зона корпуса вблизи отверстия под люк в кубовой части колонны (рисунок 2). При номинальной толщине стенки напряжения в этой зоне достигают в двухслойной модели 228 МПа, что превышает значения напряжений, полученных для однослойной модели почти на 80 МПа.

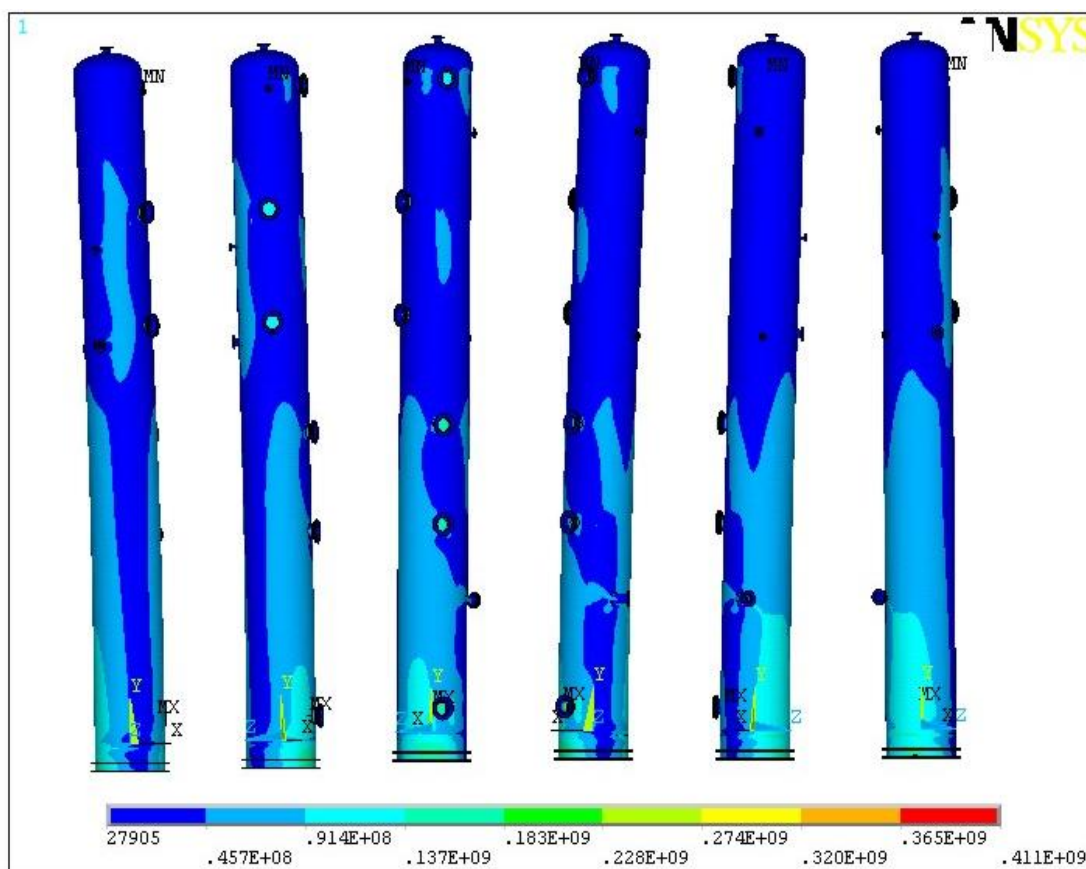


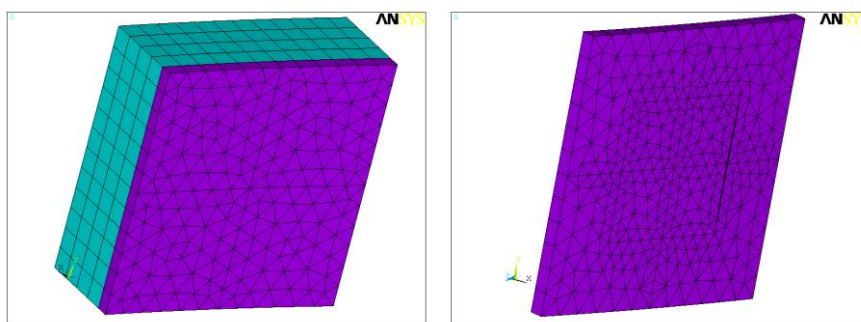
Рисунок 2. Распределение напряжений, по исследуемому колонному аппарату



Опыт эксплуатации показывает, что основной дефект для двухслойной стали – расслоение; исходя из этого, на следующем этапе исследований определялось влияние дефекта типа расслоения на изменение напряжений в обечайке.

С целью упрощения, идеализации и сокращения времени для построения моделей, наиболее нагруженная кубовая часть колонны моделировалась как двухслойное кольцо, на котором задавалась более мелкая сетка конечных элементов. Общая высота кольца обечайки была принята 1000 мм. Нагрузки прикладывались в соответствии с результатами вышеприведенных расчетов.

Для создания конечно-элементной модели использовался тип элементов TET10NODE92 и BRICK20NODE95 для области с расслоением для получения более корректного и точного результата в расчетах. На рисунке 3 представлен участок моделирования расслоения.



Моделирование несплошности

Рисунок 3. Участок цилиндрической обечайки с расслоением

При рассмотрении распределения полей напряжений в стенке оболочки было определено, что наиболее напряженные участки наблюдаются в области раскрытия дефекта.

Расчет НДС колонного аппарата был проведен при ширине раскрытия расслоения 0,5 мм, 0,7 мм и 1,0 мм при длине от 2 мм до 100 м. Расчеты проводились при расположении расслоения в наиболее и наименее нагруженных областях. На рисунке 4 в качестве примера показано распределе-

ние напряжений в области расслоения между слоями металла при ширине раскрытия 0,5 мм и длины расслоения 0,2 см, 0,5 см, 1 см, 3 см соответственно, при расположении в наиболее нагруженной области кубовой части колонного аппарата. Видно, что наиболее напряженные участки наблюдаются в области раскрытия дефекта.

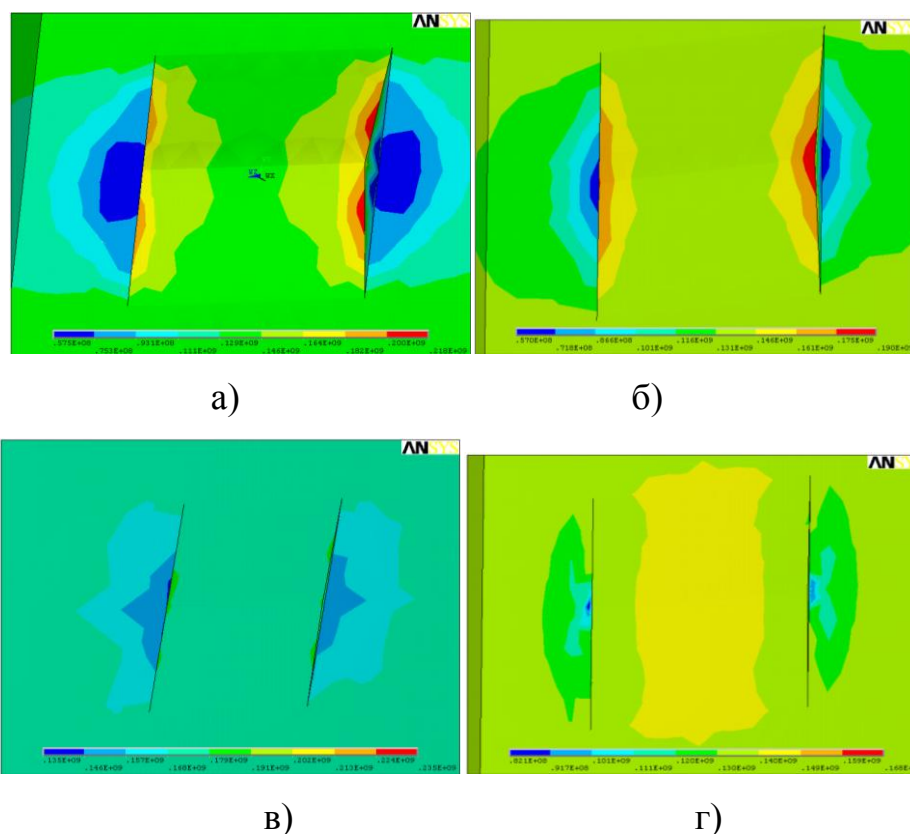


Рисунок 4. Распределение напряжений в области расслоения между слоями металла при ширине раскрытия 0,5 мм  
а – длина расслоения 0,2 см; б – длина расслоения 0,5 см;  
в – длина расслоения 1 см; г – длина расслоения 3 см

Зависимость максимальных эквивалентных напряжений от размеров расслоения приведена на рисунках 5 и 6. Видно, что значения напряжений превышают предел прочности, равный 414 МПа при длине расслоения примерно 50 мм, что недопустимо и может привести к аварийному разрушению колонного аппарата.



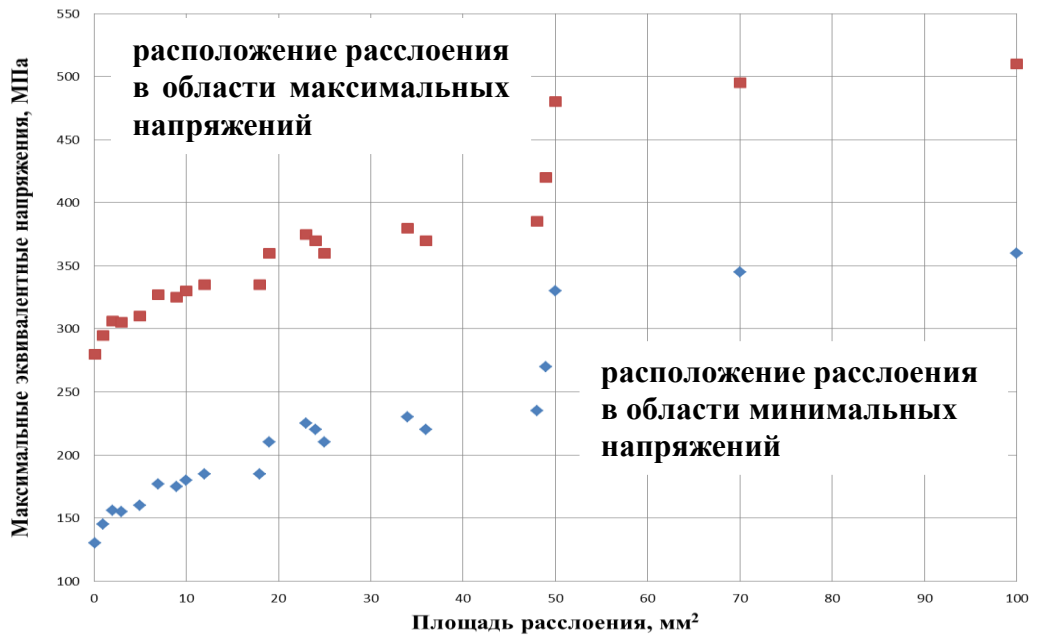


Рисунок 5. Зависимость максимальных эквивалентных напряжений цилиндрической обечайки из двухслойной стали 16ГС+08Х13 от площади несплошности

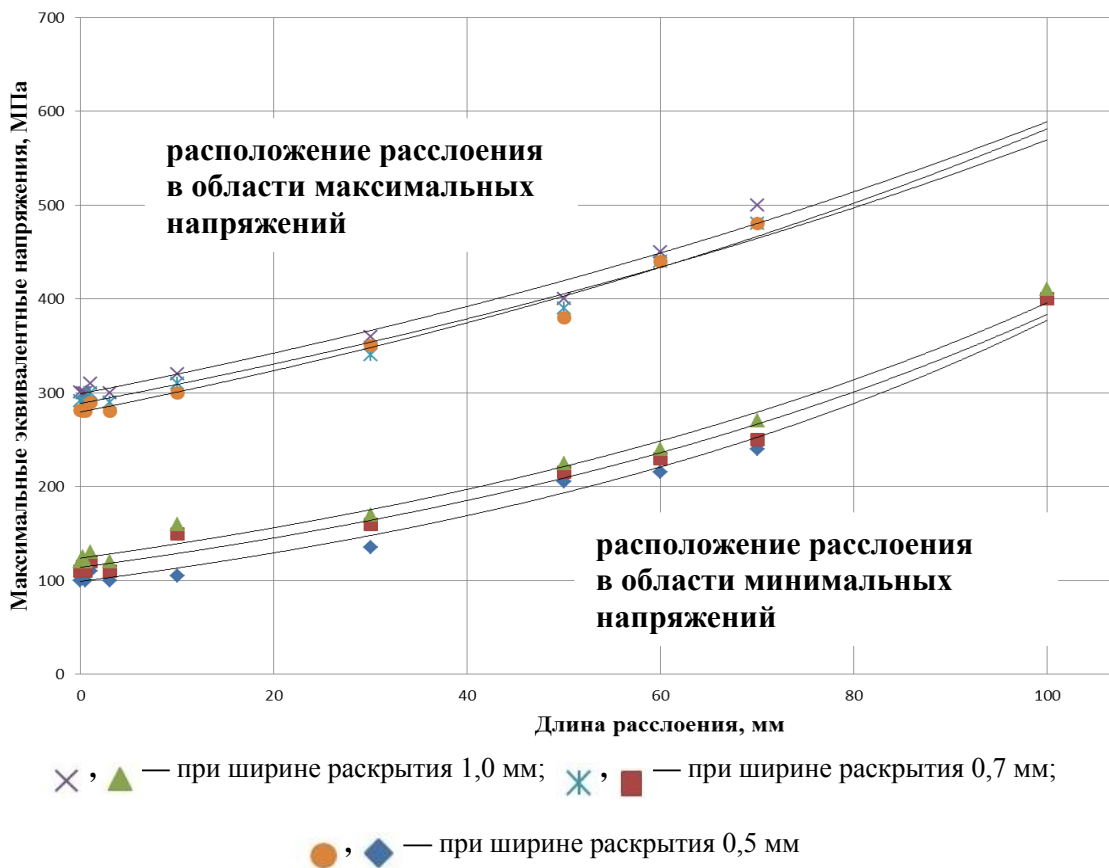


Рисунок 6. Зависимость максимальных эквивалентных напряжений цилиндрической обечайки из двухслойной стали 16ГС+08Х13 от размера расслоения ( $\delta$ ) и ширины раскрытия ( $\Delta$ )

## **Выводы**

Таким образом, проведенные расчеты показали, что наличие расслоения приводит к существенному увеличению напряжений в колонном аппарате, изготовленном из двухслойной стали 16ГС+08Х13. Поэтому на стадии проектирования на основании расчета напряженно - деформированного состояния колонного аппарата необходимо составление карты зон повышенных напряжений, являющихся потенциальными зонами образования дефектов. Эти сведения могут быть использованы инженерами служб диагностики при назначении точек контроля неразрушающими методами.

## **Список используемых источников**

- 1 Гуляев А. П. *Металловедение*. 5-е изд., перераб. М.: Металлургия, 1978. 660 с.
- 2 Кириллова Н.Ю. *Оценка остаточного ресурса длительно эксплуатируемого реакционного оборудования из углеродистой стали с учетом охрупчивания: автореферат дис.... канд. техн. наук. Уфа, 2006. 150 с.*
- 3 ГОСТ Р 52857.1-2007. *Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования*. М., 2007. 26 с.
- 4 ГОСТ Р 52857.2-2007. *Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек*. М., 2007. 44 с.
- 5 ГОСТ Р 52857.3-2007. *Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и внешнем давлении. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер*. М., 2007. 29 с.
- 6 Гатин Р.Н. *Совершенствование метода назначения зон неразрушающего контроля при оценке технического состояния аппаратов колонного типа: автореферат дис.... канд. техн. наук. Уфа, 2010. 27 с.*

## References

- 1 Guljaev A. P. Metallovedenie, 5-e izd., pererab. M.: Metallurgija, 1978. 660 s. [in Russian].
- 2 Kirillova N.Ju. Ocenka ostatochnogo resursa dlitel'no jekspluatiruemogo reakcionnogo oborudovanija iz uglerodistoj stali s uchetom ohrupchivanija: avtoreferat dis. kand. tehn. nauk. Ufa, 2006. 150 s. [in Russian].
- 3 GOST R 52857.1-2007. Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost'. Obshhie trebovanija. 26 s. [in Russian].
- 4 GOST R 52857.2-2007. Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost'. Raschet cilindricheskih i konicheskih obechaek, vypuklyh i ploskih dnishh i kryshek. 44 s. [in Russian].
- 5 GOST R 52857.3-2007. Sosudy i apparaty. Normy i metody rascheta na prochnost'. Ukreplenie otverstij v obechajkah i dnishhah pri vnutrennem i vneshnem davlenii. Raschet na prochnost' obechaek i dnishh pri vneshnih staticheskikh nagruzkah na shtucer. 29 s. [in Russian].
- 6 Gatin R.N. Sovershenstvovanie metoda naznachenija zon nerazrushajushhego kontrolja pri ocenke tehničeskogo sostojanija apparatov kolonnogo tipa: avtoreferat dis. kand. tehn. nauk. Ufa, 2010. 27 s. [in Russian].

## **Сведения об авторах**

### **About the authors**

Закирничный Г.Е., аспирант кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

G.E. Zakirnichny, Postgraduate Student of the Chair “Processing Machinery and Equipment”, FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Айбатуллин Р.Г., магистрант гр. ММО31-11-01 кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

R.G. Aibatullin, Master Student of Group ММО31-11-01 of the Chair “Processing Machinery and Equipment”, FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

Мавлеткулов У.Р., магистрант гр. ММО31-12-01 кафедры «Технологические машины и оборудование», ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

U.R. Mavletkulov, Master Student of Group ММО31-12-01 of the Chair “Processing Machinery and Equipment”, FSBEI HPE USPTU, Ufa, the Russian Federation

e-mail: mavletkulovmmo@gmail.com