

На правах рукописи

**МАРТЫНОВИЧ**  
**Владимир Леонидович**

**РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ  
МАТЕРИАЛА ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА  
ОБЪЕКТОВ ГАЗОПЕРЕРАБОТКИ**

05.26.03. – Пожарная и промышленная безопасность  
(нефтегазовая отрасль, технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тюмень 2005

Работа выполнена в Тюменском государственном нефтегазовом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Пермяков Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Тарасенко Александр Алексеевич  
кандидат технических наук  
Хоперский Геннадий Григорьевич

Ведущее предприятие: ОАО «Институт «Нефтегазпроект»,  
г. Тюмень

Защита диссертации состоится «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2005г. в \_\_\_\_\_ ч.  
на заседании диссертационного совета Д 212.273.02 при Тюменском государственном нефтегазовом университете по адресу: 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного нефтегазового университета по адресу: 625039, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 72.

Отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, с подписью составителя и заверенный печатью организации просим направлять в адрес диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2005г.

Ученый секретарь  
доктор технических наук

С.И. Челомбитко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность диссертационной работы

Более половины парка сосудов и аппаратов газоперерабатывающих предприятий Тюменской области отработали свой нормативный срок службы. До десяти процентов от общего числа дефектов и повреждений, выявленных при техническом диагностировании, составляют дефекты деформационного происхождения (вмятины, гофры, выпучины). Под воздействием эксплуатационных термомеханических воздействий изменяются механические свойства металла оборудования.

При превышении геометрических размеров вмятин значений, установленных нормативно-технической документацией, возможность дальнейшей эксплуатации сосуда с деформационным дефектом определяется по результатам расчета прочности.

Существующие методики расчета прочности сосудов с вмятиной не позволяют в полной мере учесть все факторы, влияющие на прочность и остаточный ресурс.

Настоящая работа направлена на совершенствование (развитие) и создание методов расчета прочности и остаточного ресурса сосудов и аппаратов газоперерабатывающих предприятий с учетом локального деформационного дефекта, технологической дефектности, фактических условий изменения внутреннего давления, изменения механических свойств металла.

**Цель работы** заключается в разработке расчетных характеристик состояния и свойств материала для оценки прочности и остаточного ресурса газоперерабатывающего оборудования, отработавшего нормативный срок службы.

### Задачи исследования

1. Провести анализ нагруженности и дефектности сосудов и аппаратов газоперерабатывающих предприятий.
2. Оценить изменение механических свойств металла сосудов и аппаратов

газоперерабатывающих предприятий вследствие длительного воздействия рабочей среды и эксплуатационных режимов.

3. Провести натурное и численное исследование напряженно-деформированного состояния в зоне локального деформационного дефекта.

4. Разработать методику расчета прочности и остаточного ресурса оборудования, преимущественно отработавшего нормативный срок службы, с учетом локального деформационного дефекта, технологической дефектности, фактических условий изменения внутреннего давления и температуры, изменения механических свойств металла.

5. Разработать новые устройства для определения формы и геометрических параметров локального деформационного дефекта, а также для имитации циклического изменения внутреннего давления при испытании поврежденных оболочечных конструкций.

### **Методы исследований**

При исследовании напряженно-деформированного состояния использованы методы теории упругости и механики деформирования, метод конечных элементов. Для оценки нагруженности и дефектности оборудования применялись методы статистической обработки данных, при экспериментальных исследованиях – методы разрушающего и неразрушающего контроля.

### **Научная новизна**

- на основе статистического анализа ретроспективных данных изменения эксплуатационных режимов для сосудов и аппаратов объектов газопереработки получены функции распределения воздействий давления и температуры;

- исследовано изменение механических свойств материала сосудов и аппаратов газоперерабатывающего оборудования за период нормативного срока службы, а так же приведшего к авариям и разрушению;

- на основе численного моделирования, лабораторных и натурных исследований получены зависимости напряженно-деформированного состояния в зоне деформационного дефекта от его геометрических параметров;

- разработана методика оценки прочности и остаточного ресурса сосудов и трубопроводов, отработавших нормативный срок службы и характеризующихся наличием локальных деформационных неоднородностей;

- разработаны новые устройства для определения геометрических размеров и формы локального деформационного дефекта и проведения испытаний поврежденных оболочечных конструкций на циклическую прочность.

### **Практическая ценность работы**

Разработанная методика позволяет проводить оценку прочности и остаточного ресурса инженерных объектов металлоконструкций сосудов и аппаратов с учетом статической и малоцикловой нагруженности, наличия локального деформационного дефекта, для нефтяной, газовой, нефтехимической и нефтегазоперерабатывающей промышленности.

Разработанные устройства позволяют более точно определять форму и основные геометрические параметры локальных деформационных дефектов, моделировать выявленные дефекты и оценивать работоспособность конструкции в целом; имитировать реальное циклическое изменение внутреннего давления при испытании поврежденных оболочечных конструкций.

Получение расчетными и экспериментальными методами характеристик эксплуатационных напряженно-деформированных состояний и предельных состояний дает возможность определения прямых количественных данных о прочности и остаточном ресурсе, являющимися сутью работы.

**Внедрение результатов исследований** осуществлено в Научно-технологическом Центре нефтегазопромышленников, ООО «Тобольск-Нефтехим» при оценках остаточного ресурса оборудования газоперерабатывающих и нефтехимических предприятий, а также в учебном процессе для студентов специальности «Безопасность технологических процессов и производств» Тюменского государственного нефтегазового университета, что подтверждается соответствующими актами внедрения.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается: методологией исследований, основанных на трудах зарубежных и отечественных ученых, ис-

пользованием статистических данных и сопоставлением результатов расчетов с результатами других авторов.

**Личный вклад автора** заключается в постановке и реализации задач данной работы, разработке основных положений научной новизны и практической значимости, сборе и обработке статистических данных нагруженности и дефектности газоперерабатывающего оборудования, оценке изменения механических свойств металла газоперерабатывающего оборудования, разработке методики расчета прочности и остаточного ресурса сосудов с деформационным повреждением, разработке новых устройств определения формы и размеров вмятины, имитации циклического нагружения оболочечных конструкций.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертационной работы представлены на 5-й Всероссийской научно-технической конференции «Перспективные материалы, технологии, конструкции» (Красноярск, 1999г.); 7-й Всероссийской конференции «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф» (Красноярск, 2003г.); 3-й Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (Красноярск, 2003г.); Международной научно-технической конференции «Нефть и газ Западной Сибири» (Тюмень, 2003г.); 3-й Всероссийской научно-технической конференции «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна» (Тюмень, 2004г.); 4-й региональной научно-практической конференции «Новые технологии – нефтегазовому региону» (Тюмень, 2005г.).

По теме диссертационной работы опубликовано 16 работ (1 статья, 11 тезисов, 4 патента).

### **Объем и структура работы**

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, основных выводов, библиографического списка литературы и приложения. Основное содержание работы изложено на 156 страницах машинописного текста. Диссертация содержит 72 рисунка и 18 таблиц. Список литературы состоит из 109 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, приведена научная новизна и практическая ценность работы, дана общая характеристика диссертационной работы.

**В первом разделе** проведен анализ литературных данных, посвященных оценке возможности эксплуатации сосудов и аппаратов с локальным деформационным дефектом типа вмятина (выпучина).

Вопросами определения прочности сосудов с вмятинами посвящены работы Буренина А., Зайнуллина Р.Х., Иванова Г.П., Копысицкой Л.Н., Лихмана В.В., Махутова Н.А., Муратова В.М., Перельгина О.А., Пермякова В.Н.

В работах Лихмана В.В., Копысицкой Л.Н., Муратова В.М. о результатах экспериментальных и теоретических исследований напряженно-деформированного состояния цилиндрических и сферических резервуаров с вмятинами при действии внутреннего давления отмечено, что происходит перераспределение напряжений и деформаций в зонах концентрации напряжений и начиная со второго цикла при повторно-статическом нагружении внутренним давлением оболочки с вмятиной устанавливается постоянный размах деформаций; увеличение относительной глубины вмятины приводит к росту максимальных напряжений  $\sigma_{\max}$ , зона которых смещается от центра вмятины к ее границе, а в вершине вмятины при больших значениях  $h_b/s$  ( $h_b$  – глубина вмятины,  $s$  – толщина стенки) происходит разгрузка; увеличение радиуса вмятины в плане  $r_b$  при постоянной относительной глубине  $h_b/s$  приводит к росту коэффициента концентрации напряжений  $\alpha_\sigma$ ; увеличение радиуса вмятины  $r_b$  приводит к увеличению  $h_b/s$ , при котором максимальные напряжения  $\sigma_{\max}$  действуют в вершине вмятины, а не на ее границе.

В работе специалистов НПО «Техкранэнерго» предложена методика расчета прочности с использованием оригинальных табулированных коэффициентов концентрации напряжений в зоне вмятины, которые зависят не только от радиуса  $r_b$  и толщины стенки сосуда  $s$ , длины, ширины и глубины вмятины  $h_b$ ,

но и от ее ориентации относительно продольной оси сосуда (угол наклона наибольшей оси вмятины к его образующей). Это позволяет решать более сложные задачи при исследовании общих дефектов, присущих сосудам, получившим механические повреждения.

В серии статей коллектива авторов Казанского государственного технологического университета с помощью компьютерного комплекса ANSYS подтверждены данные о том, что при упругопластическом деформировании обечачек с дефектами формы напряжения перераспределяются в области концентраторов напряжений и уже после второго цикла нагружения разгрузка и повторное нагружение происходит практически упруго.

Анализ литературных источников указывает на отсутствие единой методики расчета прочности и остаточного ресурса, отработавшего нормативный срок службы оборудования, учитывающей комплекс факторов: наличие деформационного дефекта, изменения механических свойств металла, фактического режима нагружения.

**Во втором разделе** проведен анализ изменения эксплуатационных параметров (давление, температура) для различного оборудования, используемого на газоперерабатывающих предприятиях (емкости, аппараты колонного типа, сепараторы). Наиболее распространенным аппаратом на газоперерабатывающих предприятиях является сепаратор.

Нормативный прочностной расчет сосудов и аппаратов, применяющихся на газоперерабатывающих предприятиях, предусматривает, преимущественно, статический характер изменения внутреннего давления и температуры. Однако в действительности, как отмечено в диссертации, давление и температура в ходе эксплуатации не постоянны, они изменяются вследствие неизбежного изменения условий технологического процесса.

На рис. 1 представлен график изменения внутреннего давления, построенного по данным из режимных листов за 182 суток (2184 показаний). Эксплуатационные параметры фиксируются и отражаются в режимных листах круглосуточно с интервалом в 2 часа. За шесть месяцев было реализовано 308 полных

циклов с наибольшим размахом 0,18 МПа при рабочем давлении 0,2 МПа, таким образом, за весь срок эксплуатации может быть реализовано до  $1,2 \div 1,5 \cdot 10^5$  циклов, следовательно, сепаратор работает в условиях циклической нагруженности. Очевиден дрейф среднемесячного значения давления в сторону его увеличения с увеличением значения стандартного отклонения. В весенний период наблюдаются увеличение месячного количества циклов и интенсивности колебания давления в рабочем режиме.

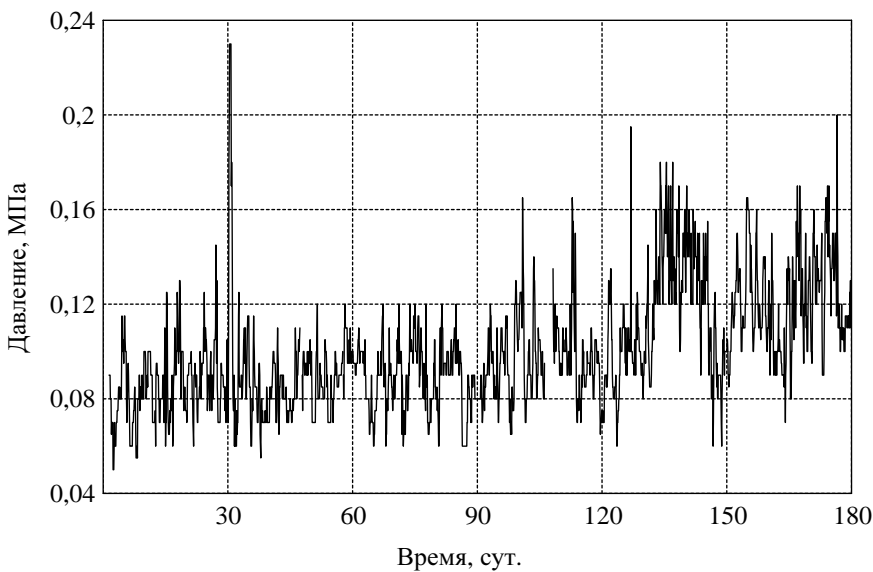


Рис. 1. Типичный график изменения давления в технологической емкости

Анализ данных частоты реализации значений давления за период наблюдения свидетельствует, что чаще всего сепаратор находился под внутренним давлением из интервала  $0,08 \div 0,1$  МПа, в тоже время выявлен случай превышения разрешенного рабочего давления на 0,03 МПа.

Разбив всю область изменения давления ( $0,05 \div 0,23$  МПа) на интервалы, равные 0,02 МПа, строим гистограмму накопленных частот давления (рис. 2). Отмечена хорошая сходимость эмпирического распределения значений давления с нормальным законом распределения (закон Гаусса).

Используя метод «дождя» для схематизации случайного процесса изменения давления, получена функция распределения амплитуд полуциклов давления, представленная на рис. 3, эмпирические данные хорошо аппроксимируются степенной функцией, описываемой уравнением  $y = 0,9267x^{-1,6465}$ . Амплиту-

ды, величина которых превышает  $0,15P_{\text{раб.}}$ , составляют 9,6% от общего числа амплитуд, реализованных за время наблюдения.

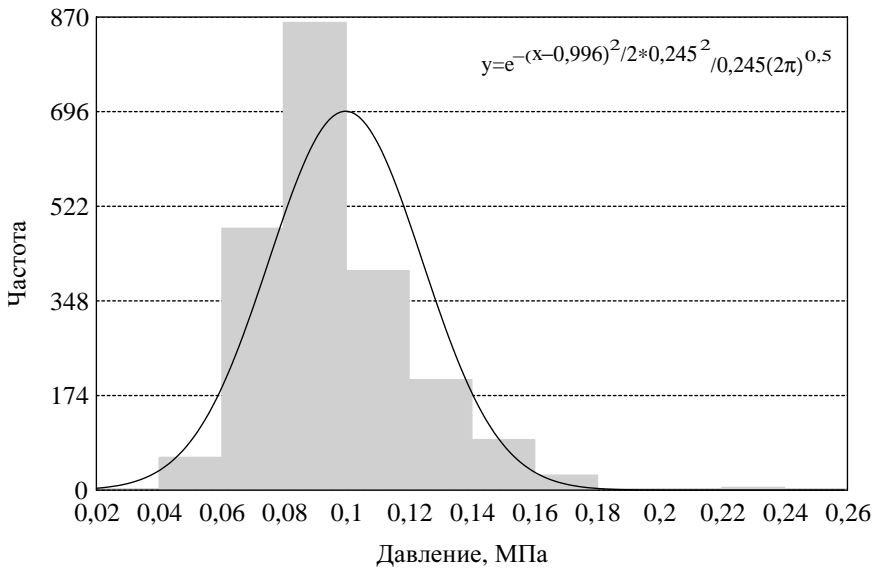


Рис. 2. Частота реализации величины давления в сепараторе

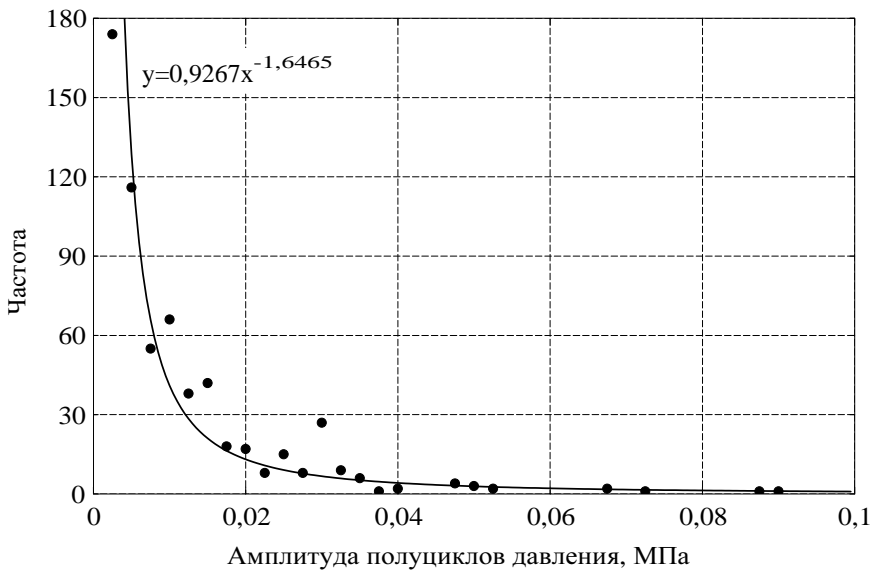


Рис. 3. Распределение амплитуд полуциклов давления в сепараторе

Опытные данные показывают, что при статистической обработке данных за весь период эксплуатации изменяются только параметры функции распределения амплитуд, а закон распределения амплитуд остается практически неизменным. Следовательно, возможен прогноз накопления повреждаемости за период запроектной эксплуатации с учетом определенного закона распределения.

Указанные выше данные о перепадах давлений и температур должны быть введены в расчеты прочности и остаточного ресурса сосудов и аппаратов.

Проведен статистический анализ дефектности сварных швов более 600 сосудов и аппаратов, использующихся на газоперерабатывающих предприятиях. Неразрушающим контролем сварных соединений выявлено более 350 недопустимых дефектов (трещины, непровары и т.п.) и более 1800 допустимых дефектов (поры, шлаковые включения и т.п.). На рис. 4. представлено распределение количества выявленных недопустимых дефектов по каждой группе оборудования.

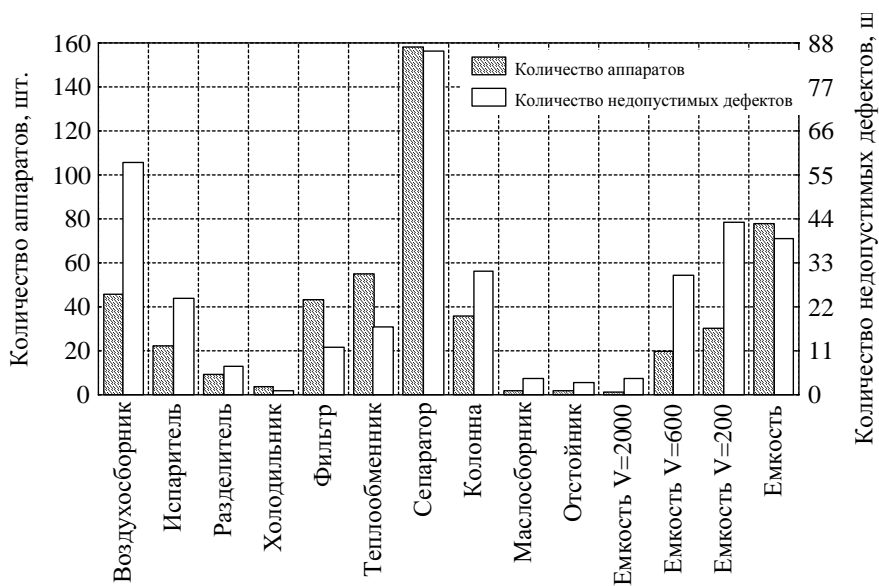


Рис. 4. Повреждаемость технологического оборудования газоперерабатывающего производства

В сварных соединениях сепараторов обнаружено более 25% от общего числа выявленных недопустимых дефектов. Местоположение выявленных недопустимых дефектов: кольцевой сварной шов (53%); продольный сварной шов (26%); сварной шов приварки штуцера (19%), сварной шов на днище (2%).

Проведенный анализ данных дефектоскопии газоперерабатывающего оборудования свидетельствует о необходимости учета показателя дефектности при оценке прочности, остаточного ресурса и условий дальнейшей эксплуатации отработавшего нормативный срок высокорискового оборудования.

В третьем разделе проведена оценка изменения механических свойств металла сосудов и трубопроводов, длительное время эксплуатирующихся на газоперерабатывающих предприятиях. Для этого использованы данные исследований причин разрушения двух технологических трубопроводов и материалы исследований металла сепарационной емкости ГЗУ «Спутник».

Согласно результатам испытаний на осевое растяжение и ударный изгиб продольных и поперечных образцов, вырезанных из основного металла (вне зоны разрушения) технологических трубопроводов, находящихся в эксплуатации более 8 лет, основные показатели прочности ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_T$ ) и пластичности ( $\delta$ ,  $\psi$ ) соответствуют требованиям ГОСТ для данного класса стали (таблица 1). Материал исследуемых фрагментов трубопроводов обнаруживает высокий уровень ударной вязкости вплоть до температур испытания минус 60°C.

Средние значения твердости основного металла труб вне зон разрушения составляют 163...165HV, что соответствует временному сопротивлению 536...546 МПа и отвечает требованиям ГОСТ для данного класса стали.

Таблица 1. Результаты испытаний образцов на растяжение и ударный изгиб

Показатель механических свойств	Результаты испытаний		Требования ГОСТ 20295
	труба КГПП	труба НГПЗ	
Предел прочности, МПа	520÷536	534÷560	$\sigma_b \geq 485$
Предел текучести, МПа	453÷488	376÷440	$\sigma_T \geq 343$
Относительное удлинение, %	21,7÷24,7	23,1÷28,7	$\delta_5 \geq 20\%$
Ударная вязкость, КСУ <sup>-60°C</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	43,2÷55,6	76,8÷178,4	$\geq 29,4$
Ударная вязкость, КСВ <sup>-5°C</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	38,9÷46,6	-	$\geq 29,4$

Микроструктура металла труб вне зоны разрушения феррито-перлитная, близкая к равновесной; зерна феррита полиэдрические, строчечность феррита встречается редко. Неметаллических включений немного, в основном это хрупкие разрозненные частицы, но также наблюдаются плоские пластичные нематаллические включения, расположенные преимущественно в центральной части сечения стенки трубы.

Согласно результатам испытаний на осевое растяжение и ударный изгиб продольных и поперечных образцов, вырезанных из основного металла сепарационной емкости ГЗУ «Спутник», находящейся в эксплуатации более 20 лет, основные показатели прочности ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_T$ ), пластичности ( $\delta$ ,  $\psi$ ) и твердости также соответствуют требованиям ГОСТ для данного класса стали (табл. 2).

Однако следует отметить, что показатели ударной вязкости при испытании на ударный изгиб некоторых поперечных образцов при температуре минус 40°С ниже требуемых по ГОСТ.

Таблица 2. Результаты испытаний образцов на растяжение и ударный изгиб

Показатель механических свойств	Результаты испытаний		Требования ГОСТ 20295
	продольн.	поперечн.	
Предел прочности, МПа	570	550	$\sigma_B \geq 450$
Предел текучести, МПа	325	400	$\sigma_T \geq 325$
Относительное удлинение, %	27	30	$\delta_5 \geq 23\%$
Относительное сужение, %	58	70	
Твердость, НВ	165÷169	153÷159	120÷200
Ударная вязкость, КСУ <sup>-40°С</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	53÷82	29÷45	$\geq 34$
Ударная вязкость, КСВ <sup>+20°С</sup> , Дж/см <sup>2</sup>	129÷135	61÷63	$\geq 59$

Микроструктурным исследованием установлено, что все образцы, вырезанные из металла сепарационной емкости, имеют мелкозернистую феррито-перлитную структуру частично видманштеттового характера. Балл зерна по ГОСТ 5639-82 составляет 6...7, балл полосчатости по ГОСТ 5640-68 равен 2,0 для поперечных образцов и 3,0 для продольных образцов, балл видманштетта – 1,0. Значительных изменений структуры не выявлено.

Представлены результаты замера твердости основного металла, металла сварных швов и околошовной зоны снаружи и изнутри различных типов оборудования, отработавшего нормативный срок службы (емкости, аппараты колонного типа, сепараторы и др.). Установлено, что средние значения твердости основного металла и металла сварного шва, полученные измерениями изнутри горизонтальных резервуаров, на 5÷15% ниже средних значений твердости, полученных снаружи резервуаров. Среднее значение твердости металла составляет для шаровых емкостей 131...149НВ, для воздухосборника – 142...156НВ, для колонны – 151НВ. Эти значения соответствуют требованиям ГОСТ для данного класса стали. Пример распределения значений твердости металла сварного шва горизонтальной емкости представлен на рис. 5.

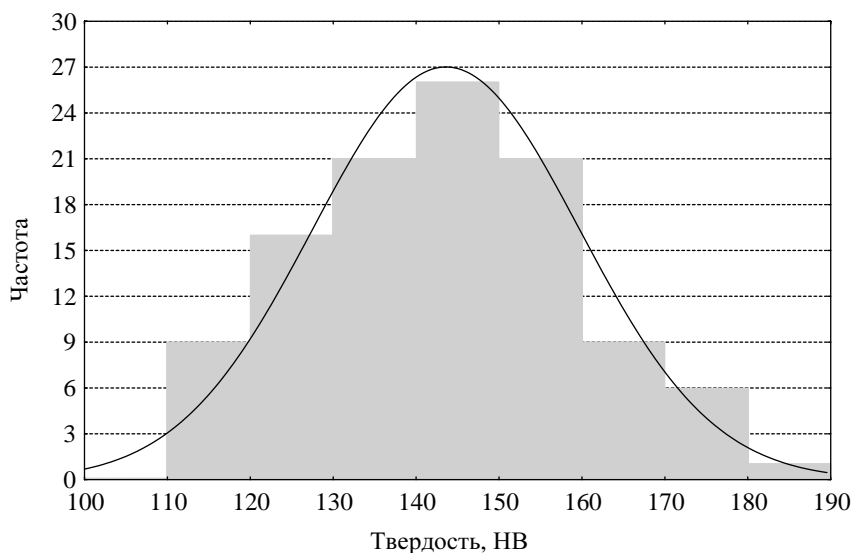


Рис. 5. Твердости сварного шва внутренней поверхности горизонтальной емкости

При проведении прочностных расчетов сосудов механические свойства металла принимаются стандартными, однако, как отмечено в работах Н.А. Махутова, Л.Р. Ботвиной и установлено в диссертации, механические свойства не остаются постоянными – они изменяются вследствие ряда факторов (длительное воздействия рабочей среды, эксплуатационные параметры). Изменение механических свойств металла, особенно ударной вязкости, необходимо учитывать при проведении поверочных прочностных расчетов на стадии определения остаточного ресурса газоперерабатывающего оборудования, отработавшего нормативный срок службы.

Микроструктурные исследования и измерение микротвердости металла в зоне вмятины на трубопроводе, образовавшейся в результате удара ковшем экскаватора показали, что по всему периметру вмятины проходит темная полоса структурно уплотненного материала – зерна измельчены и вытянуты, а по мере удаления от края вмятины микроструктура теряет признаки деформационной текстуры, обретая структуру исходного состояния.

Исследований изменения механических свойств металла в зонах локальных деформационных дефектов по отношению к свойствам недеформированного металла и к исходным механическим свойствам не много. В тоже время локальное изменение механических свойств материала элемента конструкции

может привести к возникновению аварийной ситуации, хрупкому и лавинному разрушению.

**В четвертом разделе** отражены теоретические и экспериментальные аспекты оценки прочности цилиндрических оболочечных конструкций с вмятиной в условиях статического нагружения.

Моделирование процесса образования дефектов типа вмятина проводилось на плоских образцах и цилиндрических оболочках вдавливанием индентора. Исследования проводились в упругой и упругопластической области. Диаграмма деформирования материала характеризовалась наличием линейного упрочнения.

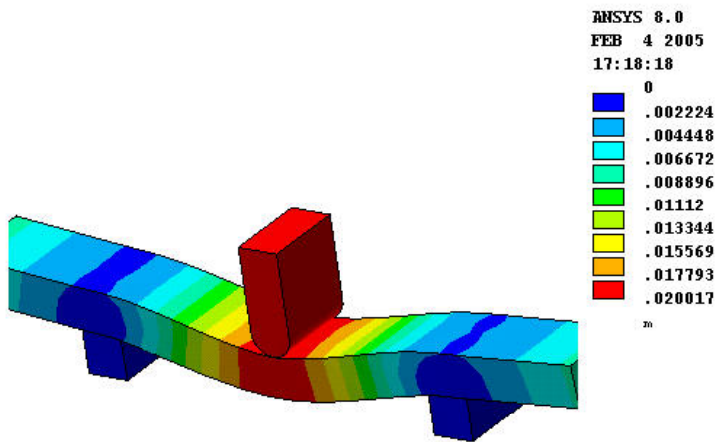
Определены зависимости эквивалентных напряжений и деформаций от относительной глубины прогиба ( $h_b/s$ ) для плоского образца и относительной глубины вмятины для оболочек различного диаметра и толщины стенки. Определены предельные геометрические параметры вмятины, при которых эквивалентные напряжения в оболочке (образце) достигают предела прочности материала.

Пример численного моделирования напряженно-деформированного состояния плоского образца при прогибе и цилиндрической оболочки при внедрении индентора, осуществленного методом конечных элементов с помощью компьютерного комплекса ANSYS представлены на рис. 6.

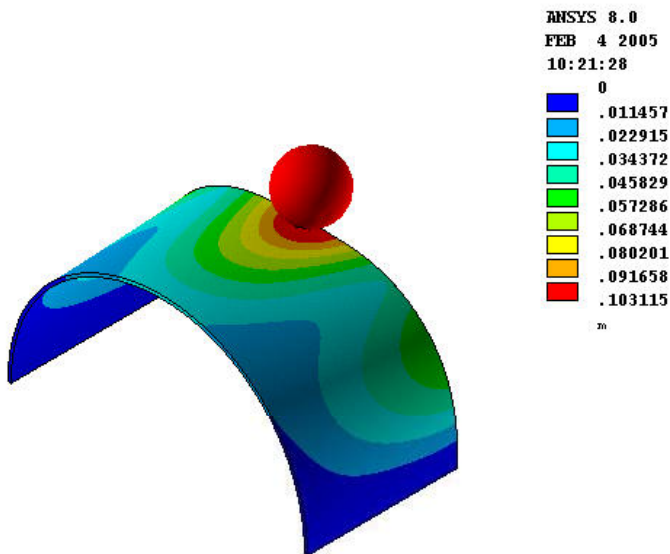
Полученные с помощью ANSYS данные о напряженно-деформированном состоянии в зоне прогиба плоских образцов согласуются с результатами натуральных исследований напряженно-деформированного состояния плоских образцов при статическом нагружении, описанными Пермяковым В.Н.

С целью определения полей напряжений и деформаций в зоне вмятины проводилось исследование напряженно-деформированного состояния плоских образцов с помощью хрупких тензочувствительных покрытий. Плоские образцы с геометрическими размерами 200x40, изготавливались из стали Ст20 толщиной 2 мм. С помощью сферического индентора воспроизводили вмятину

глубиной 1,5...2,0s (s – толщина образца). После нанесения хрупкого канифольного покрытия образцы подвергались изгибу и растяжению.



а)



б)

Рис. 6. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния широкого плоского образца при прогибе (а) и цилиндрической оболочки при внедрении индентора (б)

Траектория трещин сформирована таким образом, что наибольшая концентрация напряжений находится на расстоянии 2-3 диаметров вмятины от границы вмятины, а в зоне самой вмятины действуют напряжения сжатия, причем их значения (по абсолютной величине) превышают значения прикладываемых растягивающих напряжений, поэтому трещины в покрытии на поверхности самой вмятины отсутствуют.

Анализ НДС в зоне вмятин производился на моделях плоских образцов, цилиндрических и сферических оболочек с вмятиной (рис. 7), при этом нагружение задавалось по внутренней поверхности, имитируя действие внутреннего давления. Определены зоны наибольшей концентрации напряжения, характер их распределения.

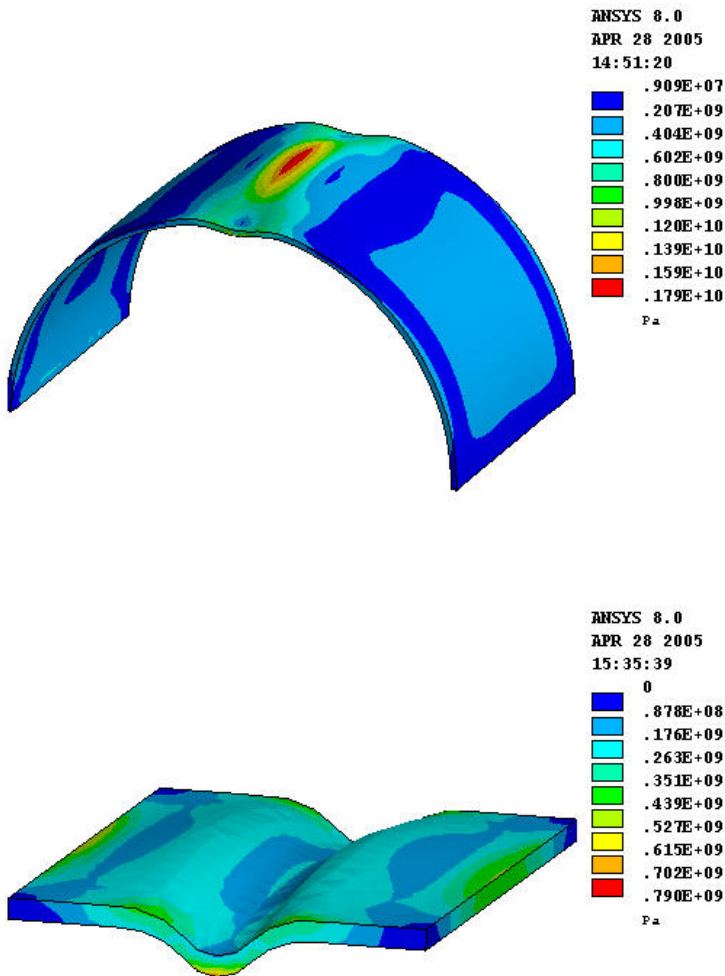


Рис. 7. Распределение напряжений в зоне вмятины на цилиндрической оболочке и плоском образце под действием внутреннего давления

Анализ упругих и упругопластических напряжений, полученных в результате численного исследования, позволил выявить как особенности, так и общие закономерности, свойственные локальному напряженно-деформированному состоянию.

Моделирование упругого и упругопластического деформирования оболочек свидетельствуют о возможности проведения инженерной оценки прочности сосудов с локальными дефектами по результатам численного исследования НДС с помощью компьютерного комплекса ANSYS.

Представлена расчетная методика определения прочности и остаточного ресурса на примере сепаратора с вмятиной на обечайке, при условии изменения механических свойств металла и циклического режима изменения давления.

Для цилиндрических оболочек с геометрическими параметрами  $R/s=50\div 250$ , имеющих круглые в плане вмятины с относительной глубиной  $h_b/s > 1,0$ , теоретический коэффициент концентрации напряжений в зоне вмятины определялся по известной формуле:

$$\alpha_{\sigma} = 1 + A \left( \frac{h_b}{s} \right)^m, \quad (1)$$

$$\text{где } A = -0,117 \cdot \left( \frac{r_b}{\sqrt{Rs}} \right)^2 + 0,711 \cdot \left( \frac{r_b}{\sqrt{Rs}} \right) + 1,05;$$

$$m = 0,158 \cdot \left( \frac{r_b}{\sqrt{Rs}} \right) + 0,358.$$

При расчетах упругопластических деформаций использовалась модель упругопластического тела со степенным упрочнением, для которой при  $e > e_T$

$$\sigma = \sigma_T \left( \frac{e}{e_T} \right)^m, \quad (2)$$

$$\text{где } m = 0,75 \frac{\lg \left[ \frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}} (1 + 1,4\psi_K) \right]}{\lg \left[ \left( 10^5 \ln \frac{1}{1 - \psi_K} \right) / (200 + 0,5\sigma_{0,2}) \right]}; \quad \sigma_T = \left[ \frac{\sigma_{0,2}}{(E \cdot 0,2 \cdot 10^{-2} + \sigma_{0,2})^m} \right]^{\frac{1}{1-m}}$$

Учитывалось изменение механических свойств металла сепаратора вследствие: эффекта рассеяния свойств, масштабного фактора, а также экспертные данные по изменению свойств в результате более чем двадцатилетнего воздействия рабочей среды и эксплуатационных параметров.

Анализ данных изменения давления и температуры в ходе технологического процесса сепаратора свидетельствует о цикличности эксплуатационных параметров, что также нашло отражение в расчете.

Число циклов нагружения до возникновения трещины определялось по уравнению Н.А. Махутова

$$\sigma_a = \frac{E}{(4N)^m + \frac{1+r^*}{1-r^*}} \ln \frac{100}{100-\psi} + \frac{\sigma_{-1}}{1 + \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B} \frac{1+r}{1-r}}, \quad (3)$$

где  $E$  – модуль продольной упругости;  $\psi$  – относительное поперечное сужение образца в шейке;  $m$  – показатель упрочнения материала;  $r^*$ ,  $r$  – коэффициент асимметрии цикла упругих и пластических деформаций;  $\sigma_{-1}$  – предел выносливости на базе  $10^6$  циклов;  $\sigma_B$  – предел прочности материала;  $\sigma_a$  – амплитуда напряжений;  $N$  – долговечность.

Расчетом установлено, что наличие вмятины на обечайке более чем в 40 раз снижает остаточный ресурс сепаратора.

Данная методика реализована в среде MathCAD, что позволяет, варьируя значениями геометрических параметров вмятины, а также механическими свойствами металла (исходными, приобретенными), определять ресурс сосуда с деформационным повреждением.

Используя методику расчета, определен остаточный ресурс сепаратора в зависимости от геометрических параметров вмятины. Результаты расчета представлены на рис. 8.

**В пятом разделе** представлены вновь разработанные устройства и способы, предназначенные для получения необходимых условий и данных для оценки несущей способности и расчета остаточного ресурса сосуда с вмятиной: устройство для определения формы и размеров деформационного дефекта на трубопроводе; устройство для определения радиуса и центрального угла полусферической вмятины на трубопроводе; способ испытания оболочек, преимущественно поврежденных, внутренним давлением и устройство для его осуществления; устройство и способ определения оси заглубленного трубопровода.

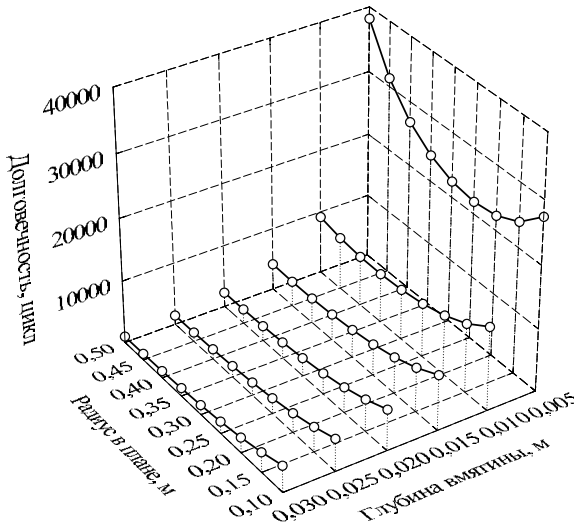


Рис. 8. Зависимость остаточного ресурса сосуда от геометрических параметров ВМЯТИНЫ

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Статистический анализ данных изменения давления и температуры сосудов и аппаратов газоперерабатывающих предприятий свидетельствует о цикличности изменения эксплуатационных параметров. Число циклов изменения давления различных амплитуд, за нормативный срок службы, например, для сепаратора может достигать  $N=1,5 \cdot 10^5$  циклов, а число циклов изменения температуры для аппаратов колонного типа за нормативный срок службы может составить  $1,5 \cdot 10^4$  циклов.

При оценке остаточного ресурса сосудов и аппаратов предложено использовать функции распределения амплитуд полуциклов давления, позволяющих более полно описывать реальную картину нагружения объекта.

2. Исследовано изменение механических свойств металла сосудов и аппаратов длительное время эксплуатирующихся на газоперерабатывающих предприятиях. Установлено, что наиболее существенному снижению подвергается, повышающая склонность металла к хрупкому разрушению, ударная вязкость, а твердость, пластические и прочностные показатели изменяются в пределах 5-12%.

При оценке остаточного ресурса сосудов и аппаратов целесообразно использование характеристик механических свойств с учетом поправочных коэффициентов, отражающих фактическое состояние металла после длительной эксплуатации.

3. Используя модели упругого и упругопластического деформируемого тела, методом конечных элементов, получены зависимости напряжений и деформаций в зонах деформационного дефекта для различных геометрических параметров.

4. Разработана система построения, определения и использования базовых расчетных характеристик состояния и свойств. Предложена методика расчета прочности и остаточного ресурса сосудов и аппаратов, отработавших нормативный срок службы, учитывающая изменения механических свойств металла под воздействием рабочей среды, фактический режим нагружения внутренним давлением и напряженно-деформированное состояние при возникновении локальных деформационных дефектов (недопустимых по действующей нормативно-технической документации).

5. В рамках данной диссертационной работы разработаны новые устройства для более точного определения геометрических размеров и формы локальных деформационных дефектов; для испытания оболочечных конструкций, преимущественно поврежденных.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ**

1. Пермяков В.Н. Оценка технического состояния товарных парков хранения углеводородов / В.Н. Пермяков, В.Л. Мартынович, П.В. Пермяков, С.Г. Орлов // Нефть и газ. Известия высших учебных заведений. – 2004. – №6. – С. 81-86.

2. Пермяков В.Н. Получение исходных расчетных характеристик для обоснования остаточного ресурса объектов энергетики и нефтехимии / В.Н. Пермяков, В.Л. Мартынович // Перспективные материалы, технологии конст-

рукции: Материалы 5-й Всероссийской научно-технической конф. 27-29 мая 1999г. – Красноярск, 1999. – С. 450-451.

3. Пермяков В.Н. О чрезвычайных ситуациях в нефтегазохимической промышленности Тюменской области / В.Н. Пермяков, В.Л. Мартынович, П.В. Пермяков, С.Г. Орлов // Нефть и газ Западной Сибири: Материалы Международной научно-технической конф., 12-13 ноября 2003г. – Тюмень, 2003. – Т.2.– С. 164.

4. Пермяков В.Н. Ресурс сосудов и трубопроводов с локальными деформационными дефектами / В.Н. Пермяков, В.Л. Мартынович, П.В. Пермяков, С.Г. Орлов // Нефть и газ Западной Сибири: Материалы Международной научно-технической конф., 12-13 ноября 2003г. – Тюмень, 2003. – Т.1.– С. 154.

5. Пермяков В.Н. Предотвращение тяжелых аварий и катастроф на трубопроводном транспорте / В.Н. Пермяков, П.В. Пермяков, С.Г. Орлов, В.Л. Мартынович // Нефть и газ Западной Сибири: Материалы Международной научно-технической конф., 12-13 ноября 2003г. – Тюмень, 2003. – Т.1.– С. 155.

6. Пермяков В.Н. Оценка рисков систем трубопроводного транспорта / В.Н. Пермяков, П.В. Пермяков, С.Г. Орлов, В.Л. Мартынович // VII Всероссийская научная конференция с участием иностранных ученых «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф», III Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»: Тез. докл., 13-17 октября 2003г. – Красноярск, 2003. – Т.2. – С. 210-211.

7. Пермяков В.Н. Анализ нагруженности объектов газопереработки / В.Н. Пермяков, В.Л. Мартынович, С.Г. Орлов, П.В. Пермяков // VII Всероссийская научная конференция с участием иностранных ученых «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф», III Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного ха-

рактера»: Тез. докл., 13-17 октября 2003г. – Красноярск, 2003. – Т.2. – С. 211-214.

8. Пермяков В.Н. Исследование материала трубопроводов в локальных зонах повреждений / В.Н. Пермяков, С.Г. Орлов, В.Л. Мартынович, П.В. Пермяков // VII Всероссийская научная конференция с участием иностранных ученых «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф», III Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»: Тез. докл., 13-17 октября 2003г. – Красноярск, 2003. – Т.2. – С. 214-215.

9. Пермяков В.Н. Оценка запроектного состояния парков хранения углеводородов / В.Н. Пермяков, В.Л. Мартынович, С.Г. Орлов, П.В. Пермяков // VII Всероссийская научная конференция с участием иностранных ученых «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф», III Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»: Тез. докл., 13-17 октября 2003г. – Красноярск, 2003. – Т.2. – С. 215-216.

10. Пермяков В.Н. Повышение промышленной безопасности нефтегазохимических предприятий / В.Н. Пермяков, В.Л. Мартынович, С.Г. Орлов, П.В. Пермяков // 3-я Всероссийская научно-техническая конференция «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна»: Тез. докл., 25-27 февраля 2004г. – Тюмень, 2004. – С. 84.

11. Пермяков В.Н. Безопасность эксплуатации нефтепроводов с локальными деформационными дефектами / В.Н. Пермяков, В.Л. Мартынович, С.Г. Орлов, П.В. Пермяков // 3-я Всероссийская научно-техническая конференция «Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна»: Тез. докл., 25-27 февраля 2004г. – Тюмень, 2004. – С. 85.

12. Мартынович В.Л. Расчетные характеристики состояния и свойств материала для обоснования остаточного ресурса объектов газопереработки // 4-я

региональная научно-практическая конференция «Новые технологии – нефтегазовому региону»: Тез. докл., 25-30 апреля 2005г. – Тюмень, 2005. – С. 38.

13. Пат. №37203, МПК 7 G01B 5/28. Устройство для определения формы и размеров деформационного дефекта на заглубленном трубопроводе / Пермяков В.Н., Мартынович В.Л., Пермяков П.В., Орлов С.Г. // Изобретения и полезные модели. – 2004. – №10.

14. Пат. №39397, МПК 7 G01B 5/20. Устройство для определения радиуса и центрального угла полусферической вмятины на трубопроводе / Пермяков В.Н., Мартынович В.Л., Пермяков П.В. // Изобретения и полезные модели. – 2004. – №21.

15. Пат. №2242739, МПК 7 G01N 3/12. Способ испытания оболочек и устройство для его осуществления / Пермяков В.Н., Теплоухов О.Ю., Пермяков П.В., Орлов С.Г., Мартынович В.Л. // Изобретения и полезные модели. – 2004. – №35.

16. Пат. №2253839, МПК 7 G01C 15/06. Устройство и способ определения положения оси заглубленного трубопровода / Пермяков В.Н., Мартынович В.Л., Пермяков П.В., Орлов С.Г. // Изобретения и полезные модели. – 2005. – №16.

---

Подписано к печати

Заказ

Формат 60×84 1/16

Бумага тип №1

Тираж 100

Уч. -изд. л. 1,0

---

Издательство Тюменского государственного нефтегазового университета

625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.