

На правах рукописи



Лин Тхет

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК
ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ АВТОФРЕТИРОВАНИИ
С УЧЁТОМ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ

Специальность 1.1.8.

«Механика деформируемого твёрдого тела»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КНАГУ»)

Научный руководитель: **Андрианов Иван Константинович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Авиастроение и компьютерное проектирование», ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», г. Комсомольск-на-Амуре.

Официальные оппоненты: **Захаров Игорь Николаевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Сопротивление материалов», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград.

Козлов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой «Строительная механика», ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», г. Воронеж.

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», г. Владивосток.

Защита состоится «19» декабря 2025 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.316.03 при ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д. 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и на сайте www.knastu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах (заверенных печатью учреждения) просим присылать по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, д. 27, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», ученому секретарю диссертационного совета Д 24.2.316.03 и по адресу naj198282@mail.ru.

Автореферат разослан «__» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент

А.Л. Григорьева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В современный период одной из актуальных научных проблем представляется исследование упругопластического деформирования оболочечных элементов конструкций, среди которых особое внимание уделяется толстостенным оболочкам, прежде всего из высокопрочной стали, которые широко применяются в различных отраслях промышленности: судостроительной, аэрокосмической, нефтехимической и энергетической, в качестве сосудов под высоким давлением. На практике толстостенные цилиндрические оболочки часто подвергаются воздействию давления: в цилиндрах насосов или технологических реакторов, использующих сосуды высокого давления. У материала толстостенной цилиндрической оболочки вследствие воздействия повышенных давлений наблюдается изменение его механических свойств, а также возникновение вторичных пластических деформаций, которые могут привести к снижению прочности, долговечности, а также к разрушению оболочек в процессе эксплуатации. Кроме того, возрастающая потребность промышленности в толстостенных цилиндрах, используемых под высоким давлением, стимулирует проведение исследований, направленных на повышение их удельной прочности, увеличения их усталостного ресурса, повышения их несущей способности для высокотехнологичных применений.

Процесс автофретирования удовлетворяет решению этих задач. Автофретирование (автоскрепление) – технологическая процедура в металлургии и технике высоких давлений, при которой толстостенный цилиндр подвергается определенному предварительному внутреннему давлению выше рабочего, что приводит к частичной пластической деформации стенки и возникновению остаточных сжимающих напряжений, которые значительно снижают растягивающие напряжения рабочего давления, увеличивая тем самым удельную прочность или усталостный ресурс.

Очевидно, что для точного прогнозирования остаточных напряжений и расчёта напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек при действии рабочего давления требуется точное моделирование различных параметров, влияющих на процесс гидравлического автофретирования оболочек. Результаты данного вида автофретирования во многом зависят от свойств материала исходной цилиндрической заготовки и давления автофретирования.

Особую сложность при описании поведения материала в процессе гидравлического автофретирования создаёт эффект Баушингера. После пластической деформации материал становится упругопластически анизотропным, т.е. обладает различными упругопластическими свойствами при обратном и последующем прямом нагружении, которые сильно зависят от предшествующей пластической деформации. Сложность описания эффекта Баушингера создает трудности при моделировании процесса автофретирования,

в результате специалисты вынуждены использовать упрощенные модели материалов для получения аналитических или численных решений.

Поэтому, данная диссертационная работа, направленная на исследование напряженно-деформированного состояния толстостенных цилиндрических оболочек при гидравлическом автофретировании с учётом реальной диаграммы материала и упругопластической анизотропии, вызванной эффектом Баушингера, является актуальной. Решение данной проблемы позволит прогнозировать поведение автофретированных толстостенных цилиндров, корректно проектировать процесс гидравлического автофретирования на этапе технологической подготовки производства и, как следствие, повысить прочность и долговечность толстостенных цилиндрических оболочек.

Степень разработанности темы исследования. Первыми работами по исследованию упрочения оболочек при автофретировании можно считать работы Т.Д. Родмана и А.С. Лаврова. Дальнейшим развитием теоретических основ расчёта напряженно-деформированного состояния оболочек при автофретировании занимались российские и зарубежные ученые: Г.А. Смирнов-Аляев, В.В. Москвитин, А.А. Ильюшин, А. Надаи, Г. Генки, Р. Хилл, Н.Н. Малинин, Д.Д. Ивлев, Г.И. Быковцев, Ю.А. Работнов, Х.Л. Гао, М.В. Сторожев, С.И. Феокистов, А.А. Буренин, А.К. Синицкий, В.А. Ломакин, Л. Джейкоб, Н.А. Беляев, Х.П. Хуанг и другие. Часть выполненных исследований направлена на изучение эффекта Баушингера в условиях циклического нагружения. Некоторые исследования в данной области, основанные на применении метода конечных элементов, отражены в работах российских и зарубежных ученых, в том числе Л.С. Поляков, Х. Чжун, А.П. Паркер, С. Ван, У.С. Диксит, М.К. Гибсон и других.

В теории пластичности помимо аналитических методов для определения напряженно-деформированного состояния широко применяются приближенные методы, где решение упругопластических задач строится в последовательных приближениях. Среди некоторых приближенных методов решения задач по деформационной теории пластичности можно выделить принцип минимума полной энергии, принцип минимума дополнительной работы, принцип возможных изменений напряженного состояния, вариационные принципы и др. Как показал анализ зарубежных работ, посвящённых процессам автофретирования за несколько десятилетий, из всех применяемых численно-аналитических методов (кроме метода конечных элементов), наиболее универсальным методом принято считать разработанный зарубежными учёными (Хамид Джахед с соавторами) метод переменных свойств материала, который находит всё более широкое применение в решении упругопластических задач.

Стоит отметить, что практически отсутствуют численно-аналитические работы, в которых учитывается реальная диаграмма деформирования материала, как при нагрузке, так и при разгрузке с учётом влияния эффекта Баушингера на механические свойства материала и изменение граничных условий в процессе нагружения и разгрузки. Как следствие, отсутствуют

методики и алгоритмы, расчета остаточных напряжений и деформаций с учётом упругопластической анизотропии, вызванной эффектом Баушингера в процессе гидравлического автофретирования.

Таким образом, для решения упругопластических задач требуется разработать методику расчёта напряженно-деформированного состояния и остаточных напряжений толстостенных цилиндрических оболочек, учитывающую реальную схему нагружения, а также влияние эффекта Баушингера на механические свойства материала и изменение граничных условий при нагружении и разгрузке.

Цель диссертационной работы заключается в разработке методики расчета напряженно-деформированного состояния и остаточных напряжений толстостенных цилиндрических оболочек с учётом сжимаемости материала, реальной диаграммы деформирования материала и упругопластической анизотропии, вызванной эффектом Баушингера, при гидравлическом автофретировании цилиндрических оболочек с продольным растяжением и без продольного растяжения.

Для достижения поставленной цели в исследовании рассматривались **следующие задачи:**

1. Проведение фундаментальных теоретических исследований процессов автофретирования толстостенных цилиндров и выбор численно-аналитической методики оценки упругопластического напряженно-деформированного состояния;

2. Разработка алгоритма расчёта напряженно-деформированного состояния толстостенных цилиндрических оболочек в условиях гидравлического автофретирования внутренним давлением с учётом реальной диаграммы деформирования, сжимаемости материала и упругопластической анизотропии;

3. Проведение серий численных расчетов гидравлического автофретирования толстостенных цилиндрических оболочек и сравнение с результатами, полученными другими авторами, для оценки достоверности разработанной математической модели;

4. Определение эффективного давления автофретирования по предлагаемой методике, позволяющего достичь наибольших остаточных окружных сжимающих напряжений на внутренней поверхности оболочки.

Научная новизна диссертационного исследования:

1. Построена математическая модель расчета напряженно-деформированного состояния толстостенных осесимметричных цилиндров, нагруженных внутренним давлением на основе совместного решения методом переменных параметров упругости интегральных уравнений равновесия и совместности деформаций, записанных в координатах Эйлера для нелинейной меры деформации Генки. Предложена методика расчета напряженно-деформированного состояния и остаточных напряжений толстостенных цилиндрических оболочек при гидравлическом автофретировании с

продольным растяжением и без, позволяющая учесть упругопластическую анизотропию, вызванную эффектом Баушингера.

2. Разработан алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния и остаточных напряжений толстостенных цилиндрических оболочек при гидравлическом автофретировании с продольным растяжением и без, позволяющий учесть упругопластическую анизотропию, вызванную эффектом Баушингера.

3. Разработана методика определения эффективного давления автофретирования, обеспечивающего наибольшее рабочее давление цилиндрической толстостенной оболочки.

Теоретическая значимость исследования обусловлена вкладом в развитие методик оценки напряженно-деформированного состояния толстостенных цилиндров с учётом реальной диаграммы деформирования материала и эффекта Баушингера в условиях гидравлического автофретирования внутренним давлением на основе совместного решения методом переменных параметров упругости интегральных уравнений равновесия и совместности деформаций, записанных в координатах Эйлера для нелинейной меры деформации Генки.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения полученных результатов численного моделирования при проектировании элементов конструкций в виде полых цилиндрических оболочек, прежде всего, из высокопрочных сталей, работающих под высоким давлением. Реализация полученных результатов позволит обеспечить повышение прочности и долговечности высокопрочных цилиндрических оболочек, а также повысить эффективность процедуры гидравлического автофретирования за счет возможности расчета эффективного давления автофретирования.

Методология и методы исследования. Теоретическое исследование гидравлического автофретирования проводилось с использованием положений теории упругости и деформационной теории пластичности. Вычислительные алгоритмы строились на основании численного метода переменных параметров упругости. Численная верификация предложенной методики осуществлялась с помощью специализированных программных модулей, разработанных и реализованных в системе компьютерной математики MathCAD.

Для проведения сравнительного анализа результатов на основании разработанной численной методики были использованы результаты, полученные различными авторами и различными методами расчёта при аналогичных исходных данных, для различных моделей упрочнения: кинематической изотропной и нелинейно-кинематической, характерной для реального материала.

Положения, выносимые на защиту:

1. Полученные интегральные уравнения совместности деформаций и интегральные уравнения равновесия, записанные в координатах Эйлера для нелинейной меры деформации Генки с учетом сжимаемости материала, для

исследования процесса гидравлического автофретирования толстостенных цилиндрических оболочек с продольным растяжением и без.

2. Алгоритм расчёта напряженно-деформированного состояния и остаточных напряжений в толстостенных цилиндрических оболочках в условиях гидравлического автофретирования внутренним давлением с учётом реальной диаграммы деформирования, сжимаемости материала и упругопластической анизотропии вызванной эффектом Баушингера.

3. Результаты серии численных экспериментов по гидравлическому автофретированию толстостенных цилиндрических оболочек и сравнение полученных результатов с результатами других авторов.

4. Методика определения эффективного давления автофретирования, позволяющая повысить рабочее давление цилиндрической толстостенной оболочки.

Степень достоверности научных положений и выводов, приведенных в работе, подтверждается применением апробированного методологического базиса, аргументацией вводимых в модель допущений, применением корректных математических методов для решения поставленных задач, а также согласованностью результатов вычислительного моделирования с теоретическими предпосылками и удовлетворительным совпадением результатов численных расчётов с опубликованными ранее результатами других авторов по методу переменных свойств материала и моделированию методом конечных элементов.

Апробация результатов исследования. Основные положения и результаты исследования докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях:

1. Международная научно-практическая конференция «Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению» (г. Комсомольск-на-Амуре, 07-11 февраля 2022 г.).

2. V Всероссийская национальная научная конференция молодых учёных «Молодежь и наука: Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (г. Комсомольск-на-Амуре, 11-15 апреля 2022 г.).

3. VI Дальневосточная конференция с международным участием «Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в металлургии и машиностроении» (г. Комсомольск-на-Амуре, 5-7 октября 2022 г.).

4. XXIII Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2023) (Московский авиационный институт, г. Москва, 04–10 сентября 2023 г.).

5. VII Всероссийская национальная научная конференция молодых учёных «Молодежь и наука: Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (г. Комсомольск-на-Амуре, 08-12 апреля 2024 г.).

6. VIII Всероссийская национальная научная конференция молодых учёных «Молодежь и наука: Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований» (г. Комсомольск-на-Амуре, 07-11 апреля 2025 г.).

В исследовании отражены результаты в рамках гранта Российского научного фонда №25-79-10135 «Разработка моделей гидравлического автофретирования осесимметричных оболочек с учетом деформационной анизотропии и вторичных пластических деформаций».

Публикации. Основные результаты данного исследования опубликованы в 12 работах, в том числе: 3 статьи из перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ, 9 научно-технических статей и докладов РИНЦ.

Личный вклад автора в выполненное совместно с научным руководителем исследование заключается в формулировке постановок задач исследования, разработке математических моделей для решения поставленных задач, создании вычислительных алгоритмов и программных средств, подготовке публикации по теме диссертационного исследования и проведение цикла расчетов с последующей обработкой и анализом результатов. Данные результаты исследований отражены в статьях в соавторстве.

Благодарности. Автор выражает благодарность Ивану Константиновичу Андрианову и Сергею Ивановичу Феокистову за помощь и ценные замечания в работе над диссертационным исследованием.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 84 наименований. Общий объём составляет 128 страниц и включает 43 рисунка и 1 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и степень разработанности темы исследования, определены цели и основные задачи работы, отражена научная новизна и значимость работы.

В первой главе проведён анализ наиболее распространенных процессов автофретирования толстостенных оболочек в различных отраслях промышленности, перечислены их типичные конструктивные схемы оформления крепления и заделки концов. Рассмотрены методы переменных свойств материала и переменных параметров упругости при решении осесимметричной задачи упругопластического деформирования. Обзор литературных источников и научных трудов показал, что в большинстве известных решений рассматривается упругопластическая модель материала без упрочнения или с линейным упрочнением, которая не учитывает эффект Баушингера или учитывает в идеальной форме с учетом принципа Мазинга. Сделан вывод о необходимости расчёта напряженно-деформированного состояния толстостенных цилиндров при гидравлическом автофретировании с использованием модели реальной диаграммы деформирования материала с учётом упругопластической анизотропии.

Во второй главе проведено аналитическое описание эффекта Баушингера при разгрузке и последующем нагружении усилием обратного знака с использованием экспериментальных данных и обобщенного принципа Мазинга. Полученные соотношения могут быть использованы в случае

гидравлического автофретирования толстостенных цилиндрических оболочек, когда вторичные пластические деформации незначительны, и отсутствуют экспериментальные данные о кривых разгрузки материала. Для высокопрочной стали А723-1130 (аналог стали 38ХНЗМФА) на основании экспериментальных данных, полученных А.П. Паркером, построены диаграммы деформирования при одноосном растяжении и последующем сжатии для разных уровней нагружения с учетом упругопластической анизотропии (рисунок 1). На рисунке 2 показано изменение коэффициента эффекта Баушингера и модуля упругости при обратном нагружении в зависимости от величины предшествующей деформации.

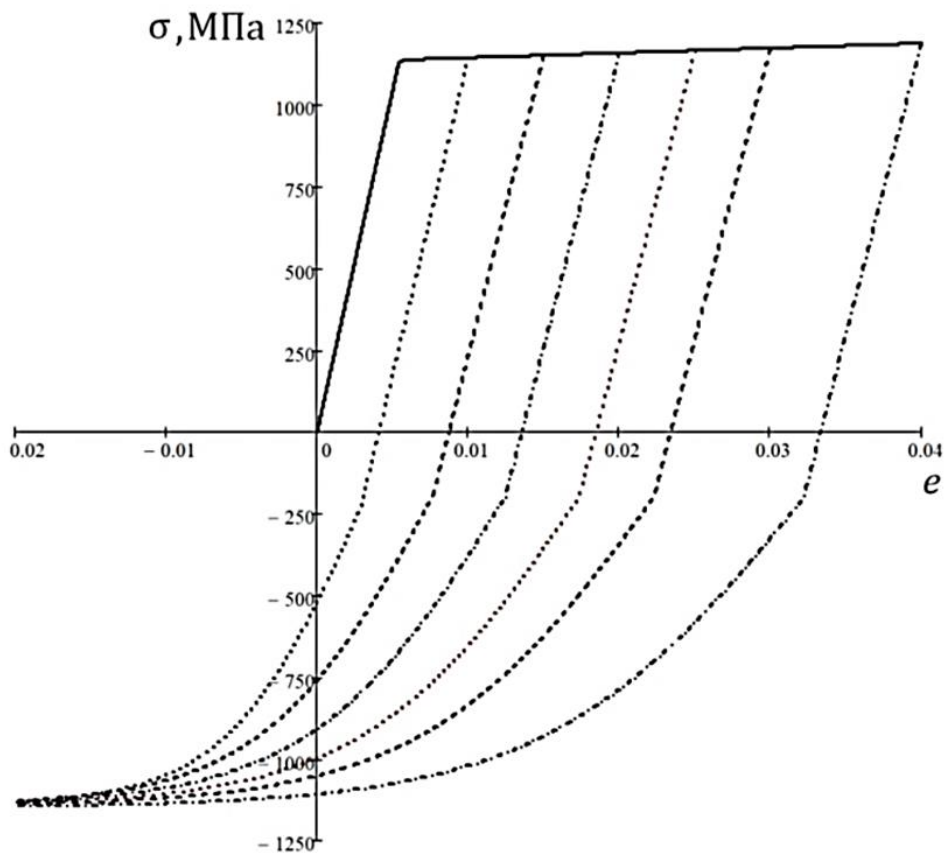


Рисунок 1 – Диаграммы деформирования стали А723-1130 при одноосном растяжении и последующем сжатии для различных уровней деформации при нагружении

В третьей главе на основе метода переменных параметров упругости построены математические модели расчета напряженно-деформированного состояния толстостенных оболочек при гидравлическом автофретировании с продольным растяжением и без продольного растяжения. При решении задачи о напряженно-деформированном состоянии цилиндрической оболочки в процессе гидравлического автофретирования были использованы соотношения деформационной теории пластичности.

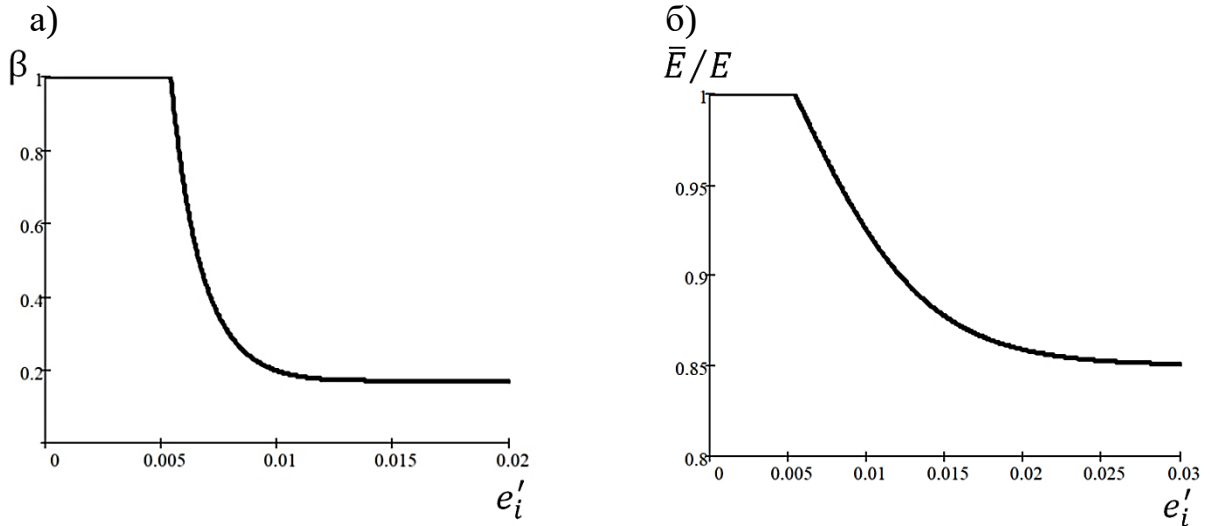


Рисунок 2 – Изменение коэффициента эффекта Баушингера – а) и модуля упругости – б) при разгрузке в зависимости от величины предшествующей деформации при нагружении e_i' для стали А723-1130

Уравнение совместности деформаций Генки было записано в координатах Эйлера

$$\frac{de_\theta}{d\rho} = \frac{1 - \exp(e_\theta - e_\rho)}{\rho}, \quad (1)$$

где e_θ, e_ρ – окружные, радиальные деформации Генки, ρ – радиальная координата.

С учетом физических соотношений по методу переменных параметров упругости уравнение (1) представлено в интегральной форме в напряжениях:

$$\sigma_\theta = \mu^*(\sigma_z + \sigma_\rho) + E^* \ln \left(-\rho \int_R^\rho \frac{1}{\rho^2} \exp \left\{ \frac{1}{E^*} [(2 + \mu^*)\sigma_\theta - (1 + 2\mu^*)\sigma_\rho - \mu^*\sigma_z] \right\} d\rho + \frac{\rho}{R_0} \right), \quad (2)$$

где $\sigma_\theta, \sigma_\rho, \sigma_z$ – окружные, радиальные, осевые напряжения, R_0, R – наружный радиус оболочки до и после деформации, E^*, μ^* – переменные параметры упругости:

$$E^* = \frac{E_{\text{сек}}}{1 + \frac{1 - 2\mu}{3\bar{E}} E_{\text{сек}}}, \quad \mu^* = \frac{\frac{1}{2} - \frac{1 - 2\mu}{3\bar{E}} E_{\text{сек}}}{1 + \frac{1 - 2\mu}{3\bar{E}} E_{\text{сек}}},$$

где $E_{\text{сек}} = \sigma_i / e_i$ – секущий модуль, $\sigma_i = \Phi(e_i)$ – диаграмма деформирования материала, которая различна при нагрузке и разгрузке, а также при разгрузке изменяется в зависимости от величины предшествующей деформации, σ_i – интенсивность напряжений, e_i – интенсивность деформаций Генки, $\bar{E}$ – переменный модуль Юнга, который изменяется в зависимости от величины

предшествующей деформации (см. рисунок 2), E – модуль Юнга, $\mu = \text{const}$ – коэффициент Пуассона.

Уравнения (1) и (2) справедливы при нагрузке и разгрузке. В случае гидравлического автофретирования цилиндра с продольным растяжением, осевая деформация принималась равной нулю ($e_z = 0$), и интегральное уравнение совместности деформаций (2), выраженное в напряжениях, принимало вид:

$$\sigma_\theta = \frac{\mu^*}{(1 - \mu^*)} \sigma_\rho + \frac{1}{(1 - \mu^{*2})} E^* \ln \left(-\rho \int_R^\rho \frac{1}{\rho^2} \exp \left\{ \frac{1}{E^*} [(2 + \mu^* - \mu^{*2}) \sigma_\theta - (1 + 2\mu^* + \mu^{*2}) \sigma_\rho] \right\} d\rho + \frac{\rho}{R_0} \right).$$

При гидравлическом автофретировании цилиндра без продольного растяжения осевое напряжение принималось равным нулю ($\sigma_z = 0$), и уравнение (2) принимало вид:

$$\sigma_\theta = \mu^* \sigma_\rho + E^* \ln \left(-\rho \int_R^\rho \frac{1}{\rho^2} \exp \left\{ \frac{1}{E^*} [(2 + \mu^*) \sigma_\theta - (1 + 2\mu^*) \sigma_\rho] \right\} d\rho + \frac{\rho}{R_0} \right).$$

Ввиду геометрической изменяемости толстостенной оболочки в рамках рассматриваемой задачи краевые условия на её граничных поверхностях при нагружении и разгрузке различаются:

- граничные условия при нагружении:

$$\sigma_\rho|_{\rho=R'} = 0, \quad (3)$$

$$\sigma_\rho|_{\rho=r'} = -p_{\text{авт}}, \quad (4)$$

$$u|_{\rho=R'} = R' - R_0, \quad e_\theta|_{\rho=R'} = \ln \left(\frac{R'}{R_0} \right) \quad (5)$$

- граничные условия при разгрузке:

$$\sigma_\rho|_{\rho=R''} = 0, \quad (6)$$

$$\sigma_\rho|_{\rho=r''} = p_{\text{авт}}, \quad (7)$$

$$u|_{\rho=R''} = R'' - R', \quad e_\theta|_{\rho=R''} = \ln \left(\frac{R''}{R'} \right). \quad (8)$$

где $p_{\text{авт}}$ – давление автофретирования; R', r' – наружный и внутренний радиусы оболочки после нагружения; R'', r'' – наружный и внутренний радиусы оболочки после разгрузки.

Расчёт напряженно-деформированного состояния толстостенных цилиндров в процессе автофретирования проводился в последовательных приближениях, путем задания малых перемещений наружного радиуса цилиндра в сторону увеличения: $\Delta R^{(j)} = R^{(j)} - R^{(j-1)}$, где j – номер приближения. На каждой итерации расчета напряженно-деформированного состояния цилиндра рассчитывалось внутреннее давление, при котором

произошло заданное перемещение наружного радиуса согласно граничному условию на внутренней поверхности: $p^{(j)} = -\sigma_\rho^{(j)}|_{\rho=r^{(j)}}$, где r – внутренний радиус оболочки. В соответствии с методом переменных параметров упругости, решение по определению напряжённого состояния при автофретировании толстостенного цилиндра проводилось методом последовательных приближений по рекуррентной схеме, где k – номер приближения, при гидравлическом автофретировании с продольным растяжением:

$$\begin{aligned}\sigma_\theta^{(k+1)} &= \frac{\mu^{*(k)}}{(1 - \mu^{*(k)})} \sigma_\rho^{(k)} + \\ &+ \frac{1}{(1 - \mu^{*(k)2})} E^{*(k)} \ln \left(-\rho \int_R^\rho \frac{1}{\rho^2} \exp \left\{ \frac{1}{E^{*(k)}} [(2 + \mu^{*(k)} - \mu^{*(k)2}) \cdot \right. \right. \\ &\quad \cdot \sigma_\theta^{(k)} - (1 + 2\mu^{*(k)} + \mu^{*(k)2}) \sigma_\rho^{(k)}] \} d\rho + \frac{\rho}{R_0} \Bigg), \\ \sigma_\rho^{(k+1)} &= \frac{1}{\rho} \int_R^\rho \sigma_\theta^{(k+1)} d\rho, \quad \sigma_z^{(k+1)} = \mu^{*(k)} (\sigma_\rho^{(k+1)} + \sigma_\theta^{(k+1)}), \\ \sigma_i^{(k+1)} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_\rho^{(k+1)} - \sigma_\theta^{(k+1)})^2 + (\sigma_\theta^{(k+1)} - \sigma_z^{(k+1)})^2 + (\sigma_z^{(k+1)} - \sigma_\rho^{(k+1)})^2},\end{aligned}$$

при гидравлическом автофретировании без продольного растяжения:

$$\begin{aligned}\sigma_\theta^{(k+1)} &= \mu^{*(k)} \sigma_\rho^{(k)} + E^{*(k)} \ln \left(-\rho \int_R^\rho \frac{1}{\rho^2} \exp \left\{ \frac{1}{E^{*(k)}} [(2 + \mu^{*(k)}) \sigma_\theta^{(k)} - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - (1 + 2\mu^{*(k)}) \sigma_\rho^{(k)}] \right\} d\rho + \frac{\rho}{R_0} \right), \quad \sigma_\rho^{(k+1)} = \frac{1}{\rho} \int_R^\rho \sigma_\theta^{(k+1)} d\rho, \\ \sigma_i^{(k+1)} &= \sqrt{(\sigma_\theta^{(k+1)})^2 + \sigma_\rho^{(k+1)} \sigma_\theta^{(k+1)} + (\sigma_\rho^{(k+1)})^2}.\end{aligned}$$

По результатам численного расчёта напряжённого состояния, определялось деформированное состояние, при гидравлическом автофретировании с продольным растяжением:

$$\begin{aligned}e_\rho^{(k+1)} &= \frac{1}{E^{*(k)}} [(1 - \mu^{*(k)2}) \sigma_\rho^{(k+1)} - \mu^{*(k)} (1 + \mu^{*(k)}) \sigma_\theta^{(k+1)}], \\ e_\theta^{(k+1)} &= \frac{1}{E^{*(k)}} [(1 - \mu^{*(k)2}) \sigma_\theta^{(k+1)} - \mu^{*(k)} (1 + \mu^{*(k)}) \sigma_\rho^{(k+1)}], \\ e_i^{(k+1)} &= \frac{2}{3} \sqrt{(e_\theta^{(k+1)})^2 + e_\rho^{(k+1)} e_\theta^{(k+1)} + (e_\rho^{(k+1)})^2},\end{aligned}$$

при гидравлическом автофретировании без продольного растяжения:

$$e_\rho^{(k+1)} = \frac{1}{E^{*(k)}} (\sigma_\rho^{(k+1)} - \mu^{*(k)} \sigma_\theta^{(k+1)}), \quad e_\theta^{(k+1)} = \frac{1}{E^{*(k)}} (\sigma_\theta^{(k+1)} - \mu^{*(k)} \sigma_\rho^{(k+1)}),$$

$$e_z^{(k+1)} = -\frac{\mu^{*(k)}}{E^{*(k)}}(\sigma_\rho^{(k+1)} + \sigma_\theta^{(k+1)}),$$

$$e_i^{(k+1)} = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{\left(e_\rho^{(k+1)} - e_\theta^{(k+1)}\right)^2 + \left(e_\theta^{(k+1)} - e_z^{(k+1)}\right)^2 + \left(e_z^{(k+1)} - e_\rho^{(k+1)}\right)^2}.$$

Затем уточнялись значения секущего модуля: $E_{\text{сек}}^{(k+1)} = \Phi(e_i^{(k+1)})/e_i^{(k+1)}$ и переменных параметров упругости согласно формулам:

$$E^{*(k+1)} = \frac{E_{\text{сек}}^{(k+1)}}{1 + \frac{1-2\mu}{3\bar{E}} E_{\text{сек}}^{(k+1)}}, \quad \mu^{*(k+1)} = \frac{\frac{1}{2} - \frac{1-2\mu}{3\bar{E}} E_{\text{сек}}^{(k+1)}}{1 + \frac{1-2\mu}{3\bar{E}} E_{\text{сек}}^{(k+1)}}.$$

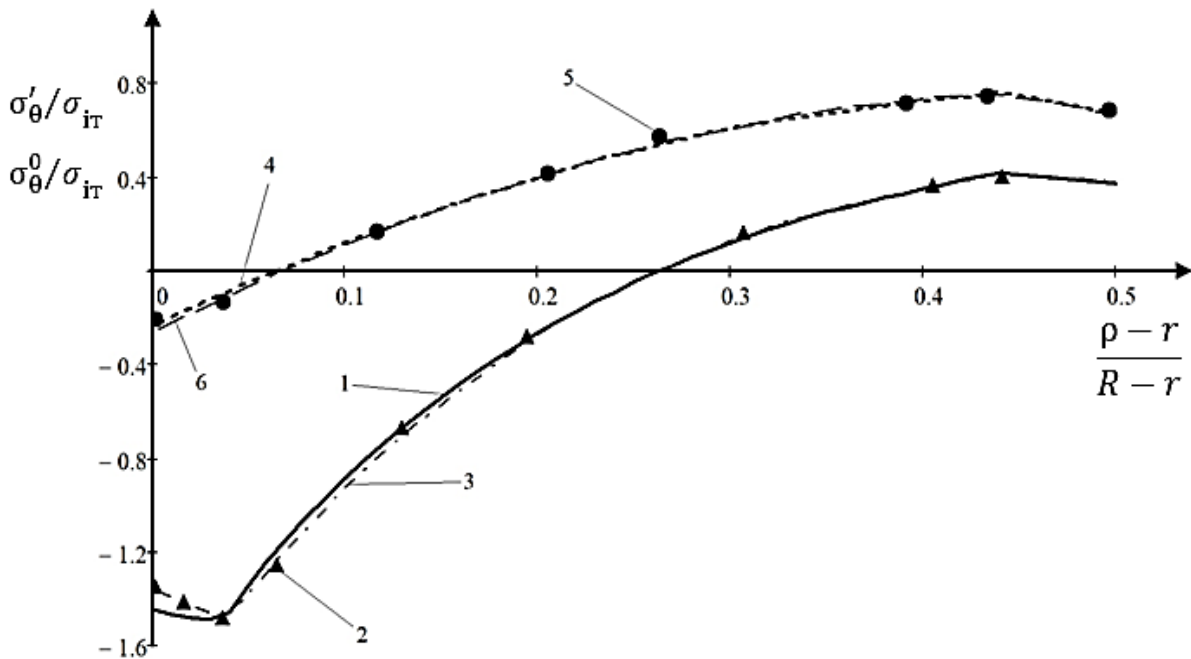
Контроль сходимости процесса проводился по значениям интенсивностей напряжений: $|\sigma_i^{(k+1)} - \sigma_i^{(k)}|/\sigma_i^{(k+1)} \leq \Delta\sigma_i$, где $\Delta\sigma_i$ – точность. Расчёт положения внутренней поверхности оболочки в процессе деформирования определялся согласно уравнению: $r^{(j)} = r_0 \exp\left(e_\theta^{(j)}\right)|_{\rho=r^{(j)}}$.

При нагружении расчет проводился с учетом граничных условий (3) – (5), а при разгрузке – с учетом граничных условий (6) – (8). Для определения остаточных напряжений при автофретировании использовалась теорема о вторичных пластических деформаций: $\sigma_{ij}^0 = \sigma'_{ij} + \bar{\sigma}_{ij}^0$, $e_{ij}^0 = e'_{ij} + \bar{e}_{ij}^0$, где σ_{ij}^0, e_{ij}^0 – остаточные напряжения и остаточные деформации, сохранившиеся в теле после упругопластического деформирования, σ'_{ij}, e'_{ij} – напряжения и деформации, существовавшие в упругопластическом теле в момент разгрузки, $\bar{\sigma}_{ij}^0, \bar{e}_{ij}^0$ – фиктивные величины, существующие в фиктивном упругопластическом теле при его упругопластическом деформировании внешними силами с обратным знаком, которые были приложены к данному телу перед началом разгрузки. Для расчёта остаточных напряжений и деформаций брался деформированный цилиндр с R' и r' , полученными при расчёте напряженно-деформированного состояния при нагружении давлением автофретирования $p_{\text{авт}}$. Затем определялось напряженно-деформированное состояние $\bar{\sigma}_{ij}^0$ и $\bar{e}_{ij}^0$ фиктивного тела. В соответствии с принятым алгоритмом, последовательные приближения проводились при перемещении наружного радиуса цилиндра в сторону уменьшения до тех пор, пока фиктивное давление не достигнет значения давления автофретирования с обратным знаком ($-p_{\text{авт}}$).

В четвертой главе представлены результаты расчета напряженно-деформированного состояния толстостенных цилиндров при гидравлическом автофретировании с учетом упругопластической анизотропии и сопоставлены полученные результаты с расчётами других авторов при аналогичных исходных данных для оценки достоверности разработанной модели данного исследования. Для расчётов был взят цилиндр с отношением радиусов $R_0/r_0 = 4,63$. На рисунках 3 – 6 представлено сравнение результатов расчёта окружных напряжений в нагруженном состоянии и остаточных окружных, радиальных и осевых напряжений как для изотропного упрочнения, так и для

кинематического упрочнения, полученных с применением разработанной методики с результатами, полученными по методу переменных свойств материала (МПСМ) и методу конечных элементов (МКЭ). Как видно из графиков, результаты хорошо согласуются, несмотря на различия в методах анализа. Небольшое отклонение в расчётах обусловлено тем, что при определении остаточных напряжений в предложенном методе учитывается изменение геометрии цилиндра в процессе разгрузки. Это несколько увеличивает величину пластической области по толщине цилиндра.

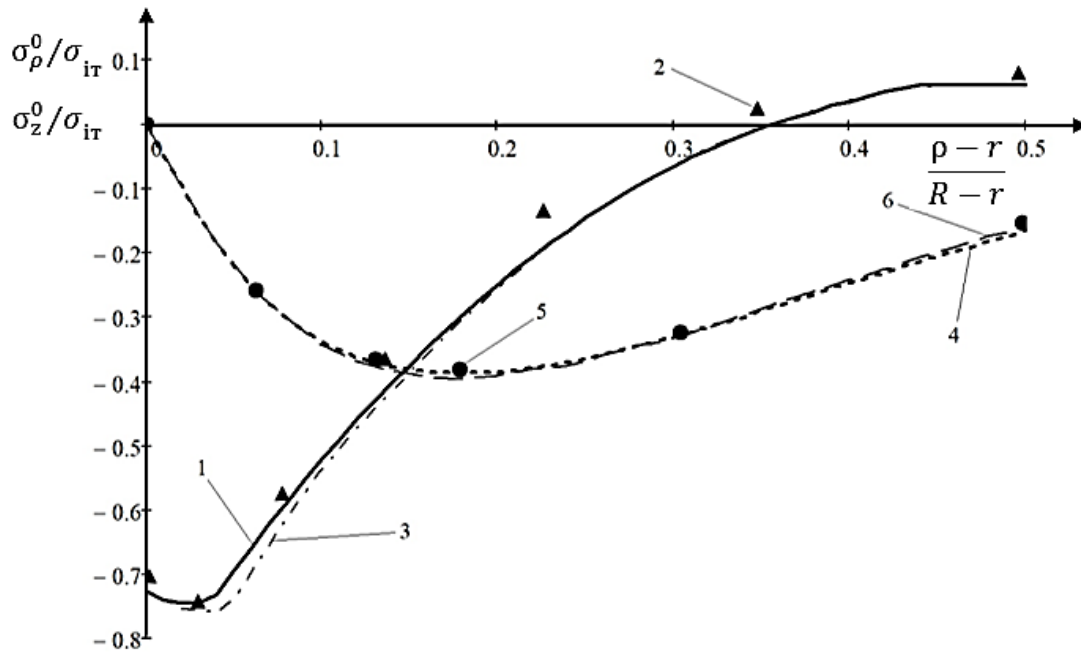
При расчёте остаточных напряжений с учётом упругопластической анизотропии реального материала, были использованы экспериментальные данные стали А723-1130. На рисунке 7, 8 представлены результаты расчётов параметров, характеризующих изменение механических свойств материала, таких как модуль упругости $\bar{E}$ и предел пластичности $\bar{\sigma}_{it}$, по толщине цилиндрической оболочки вследствие пластических деформаций и эффекта Баушингера при различных значениях величины пластической области при автофретировании. Эти параметры определяют приобретенную упругопластическую анизотропию.



1, 4 – по методике исследования; 2, 5 – методом конечных элементов¹;
3, 6 – методом переменных свойств материала¹

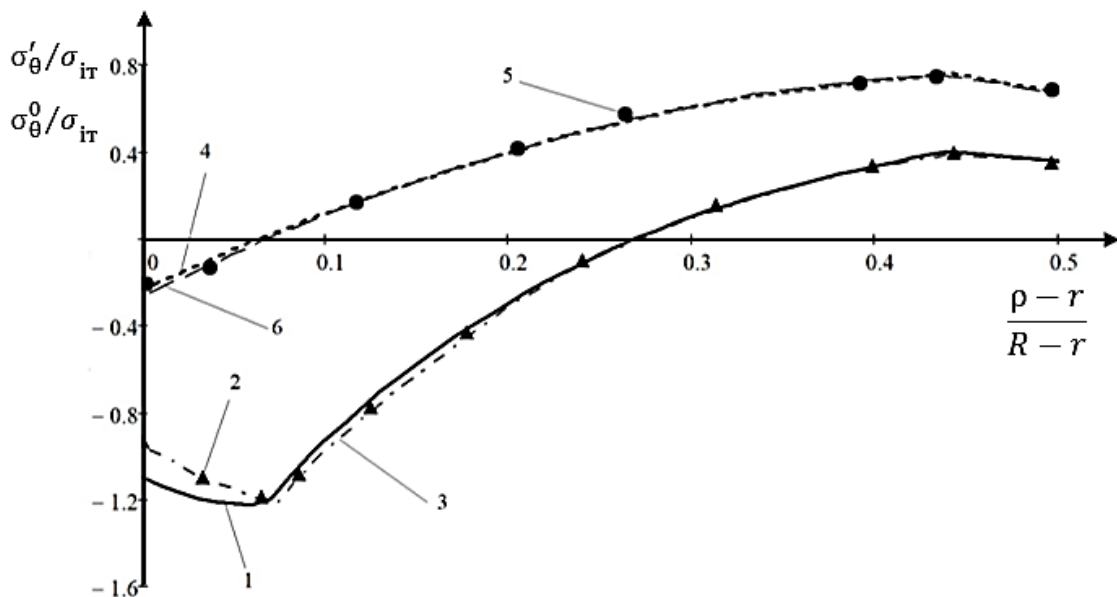
Рисунок 3 – Сопоставление результатов расчета окружных напряжений σ'_θ в нагруженном состоянии (4, 5, 6) и остаточных окружных напряжений σ^0_θ (1, 2, 3) для изотропного упрочнения при $p_{авт} = 1679$ МПа; $S_{гр.отн} = 0,44$

¹ Jahed H. An Axisymmetric Method of Elastic-Plastic Analysis Capable of Predicting Residual Stress Field / Jahed H., Dubey R. N. // J. Press. Vessel Technol. – 1997. - Vol. 119, No. 3. - pp. 264–273.



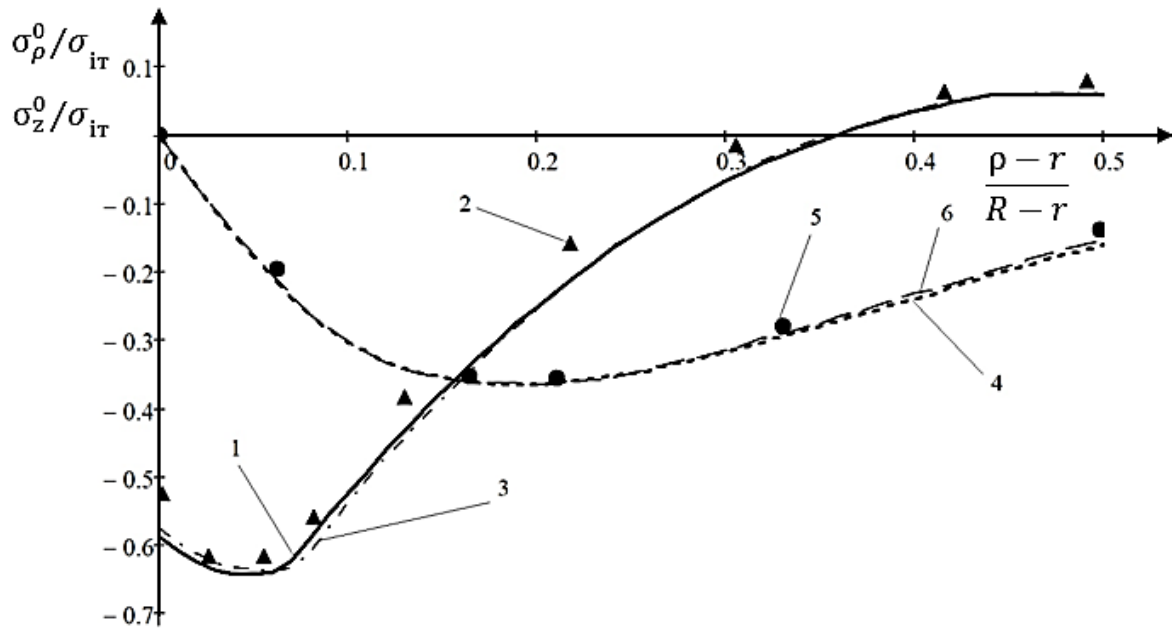
1, 4 – по методике исследования; 2, 5 – методом конечных элементов¹; 3, 6 – методом переменных свойств материала¹

Рисунок 4 – Сопоставление результатов расчёта остаточных радиальных σ_ρ^0 (4, 5, 6) и осевых σ_z^0 напряжений (1, 2, 3) для изотропного упрочнения при $p_{авт} = 1679$ МПа; $S_{гр.отн} = 0,44$



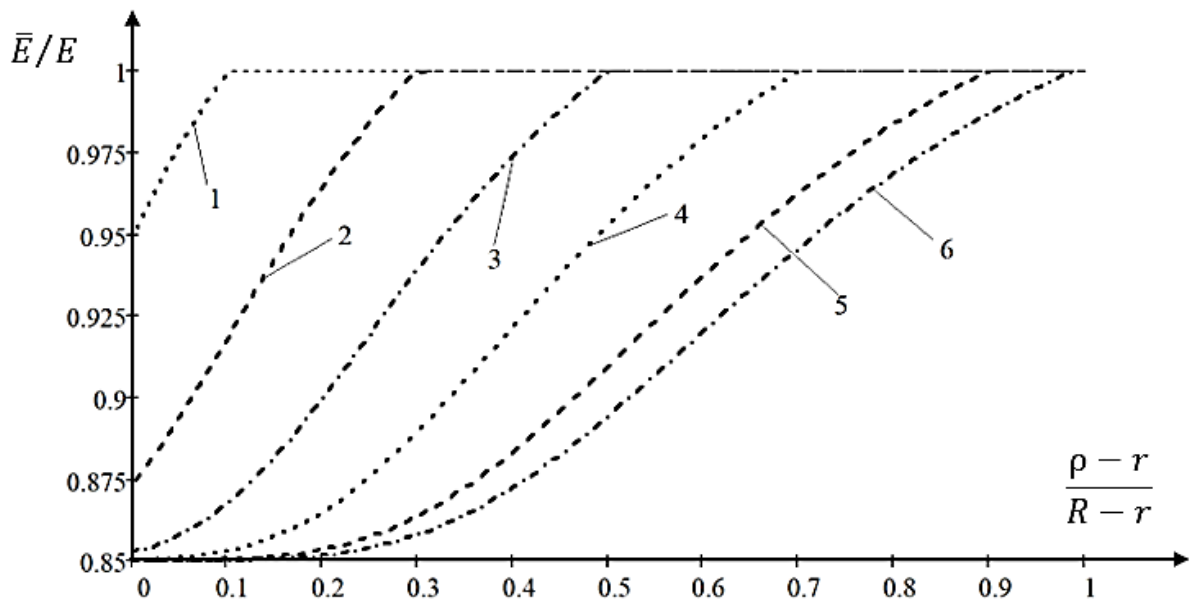
1, 4 – по методике исследования; 2, 5 – методом конечных элементов¹; 3, 6 – методом переменных свойств материала¹.

Рисунок 5 – Сопоставление результатов расчёта окружных напряжений σ_θ' в нагруженном состоянии (4, 5, 6) и остаточных окружных напряжений σ_θ^0 (1, 2, 3) для кинематического упрочнения при $p_{авт} = 1679$ МПа; $S_{гр.отн} = 0,44$



1, 4 – по методике исследования; 2, 5 – методом конечных элементов¹;
3, 6 – методом переменных свойств материала¹.

Рисунок 6 – Сопоставление результатов расчёта остаточных радиальных σ_ρ^0 (4, 5, 6) и осевых напряжений σ_z^0 (1, 2, 3) для кинематического упрочнения при $p_{авт} = 1679$ МПа; $S_{гр.отн} = 0,44$



1 – $S_{гр.отн} = 0,1$; 2 – $S_{гр.отн} = 0,3$; 3 – $S_{гр.отн} = 0,5$;
4 – $S_{гр.отн} = 0,7$; 5 – $S_{гр.отн} = 0,9$; 6 – $S_{гр.отн} = 1,0$

Рисунок 7 – Относительное изменение модуля упругости $\bar{E}$ при разгрузке по толщине оболочки при различных значениях величины пластической области при автофретировании для $R_0/r_0 = 3$

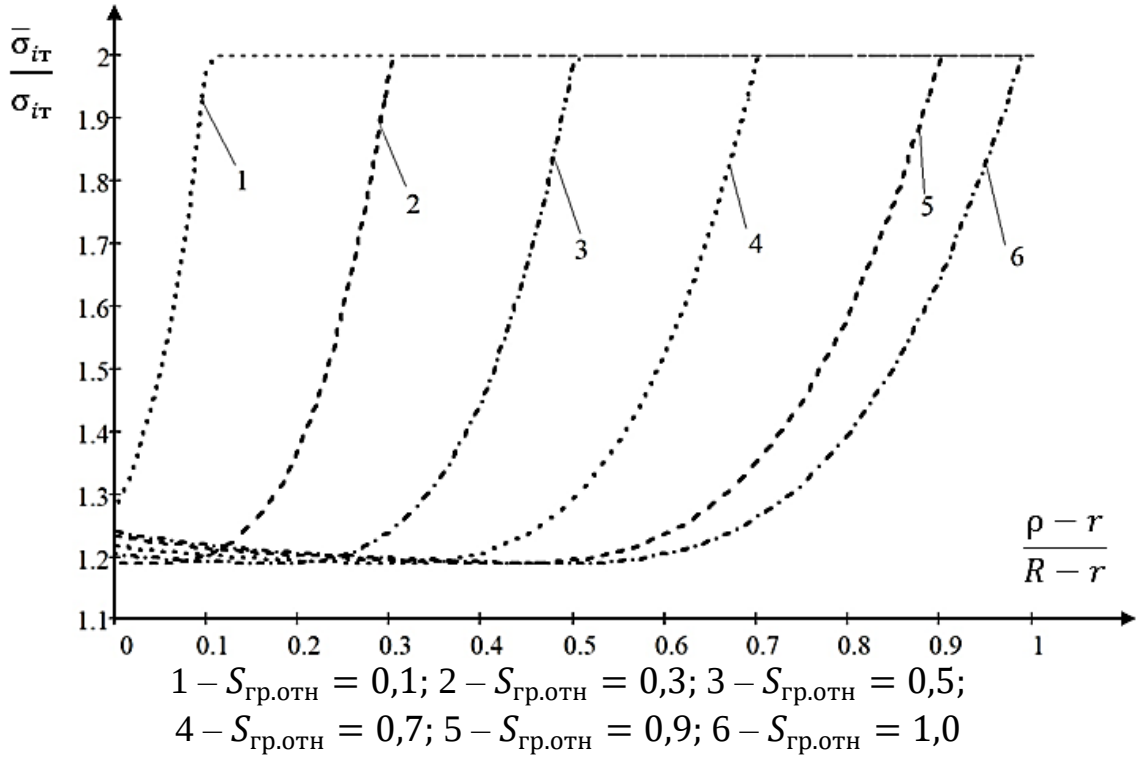


Рисунок 8 – Относительное изменение предела текучести $\bar{\sigma}_{it} = \alpha_t \sigma_{it}$ при разгрузке по толщине оболочки при различных значениях величины пластической области при автофретировании для $R_0/r_0 = 3$

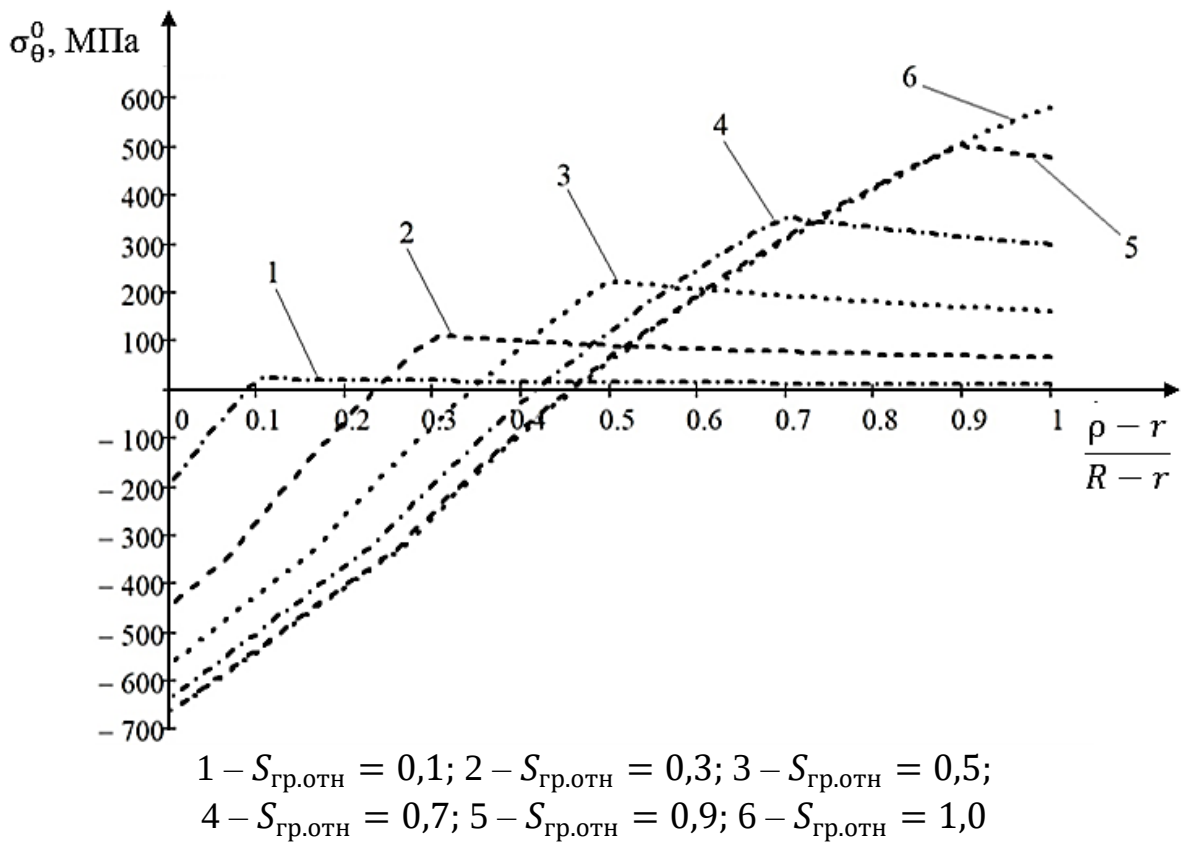
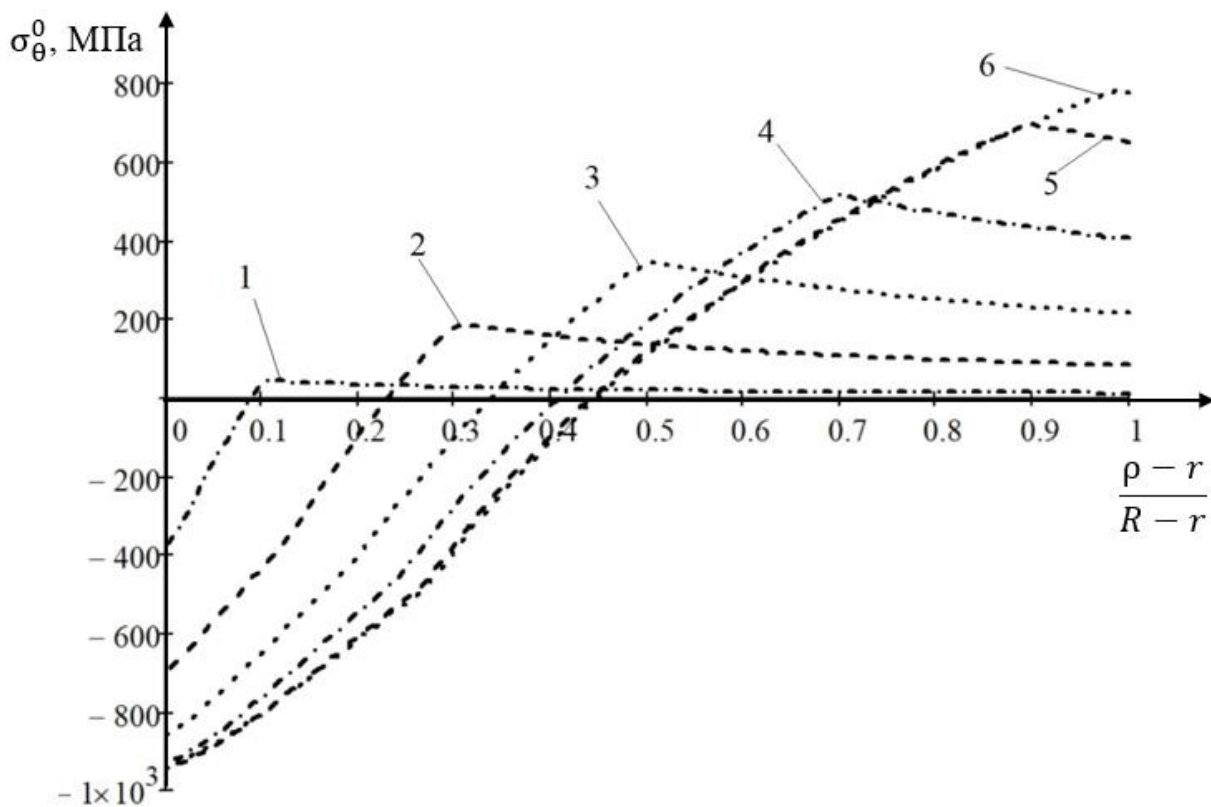


Рисунок 9 – Распределение остаточных окружных напряжений σ_{θ}^0 по толщине оболочки при различных значениях величины пластической области при автофретировании для $R_0/r_0 = 2$

На рисунке 9 и 10 представлены графики изменения остаточных сжимающих окружных напряжений σ_{θ}^0 по толщине оболочки при различных значениях величины пластической области при гидравлическом автофретировании для различных толщин оболочки: $R_0/r_0 = 2$, $R_0/r_0 = 3$. Как видно из рисунков, при увеличении пластической области величина остаточных окружных напряжений $\sigma_{\theta}^0|_{\rho=r}$ на внутренней поверхности цилиндра сначала увеличивается, затем остаётся практически постоянной. Причём, при увеличении толщины цилиндра такая стабилизация происходит раньше.

Для определения характера изменения сжимающих остаточных окружных напряжений на внутренней поверхности цилиндра при изменении величины пластической области были построены графики для различных толщин цилиндра. Эти графики представлены на рисунках 11 и 12. Как видно из рисунков, при $R_0/r_0 = 2$ стабилизация сжимающих остаточных окружных напряжений на внутренней поверхности цилиндра наблюдается при $S_{\text{гр.отн}} \approx 0,9$, а при $R_0/r_0 = 3$ при $S_{\text{гр.отн}} \approx 0,8$.



1 – $S_{\text{гр.отн}} = 0,1$; 2 – $S_{\text{гр.отн}} = 0,3$; 3 – $S_{\text{гр.отн}} = 0,5$;
4 – $S_{\text{гр.отн}} = 0,7$; 5 – $S_{\text{гр.отн}} = 0,9$; 6 – $S_{\text{гр.отн}} = 1,0$

Рисунок 10 – Распределение остаточных окружных напряжений σ_{θ}^0 по толщине оболочки при различных значениях величины пластической области при автофретировании для $R_0/r_0 = 3$

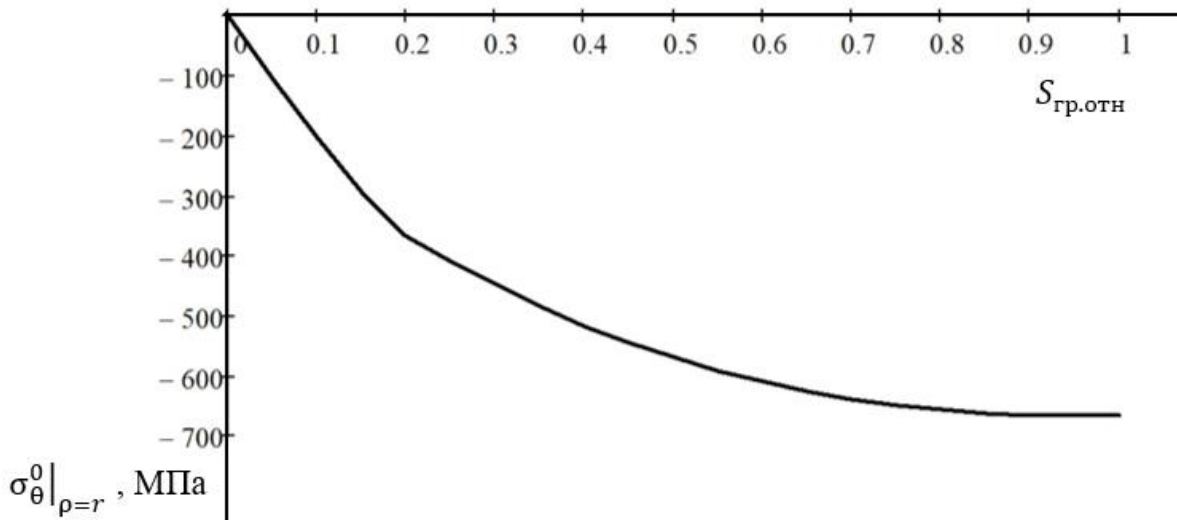


Рисунок 11 – Изменение сжимающих остаточных окружных напряжений $\sigma_{\theta}^0|_{\rho=r}$ на внутренней поверхности оболочки при изменении величины пластической области при автофретировании для $R_0/r_0 = 2$.

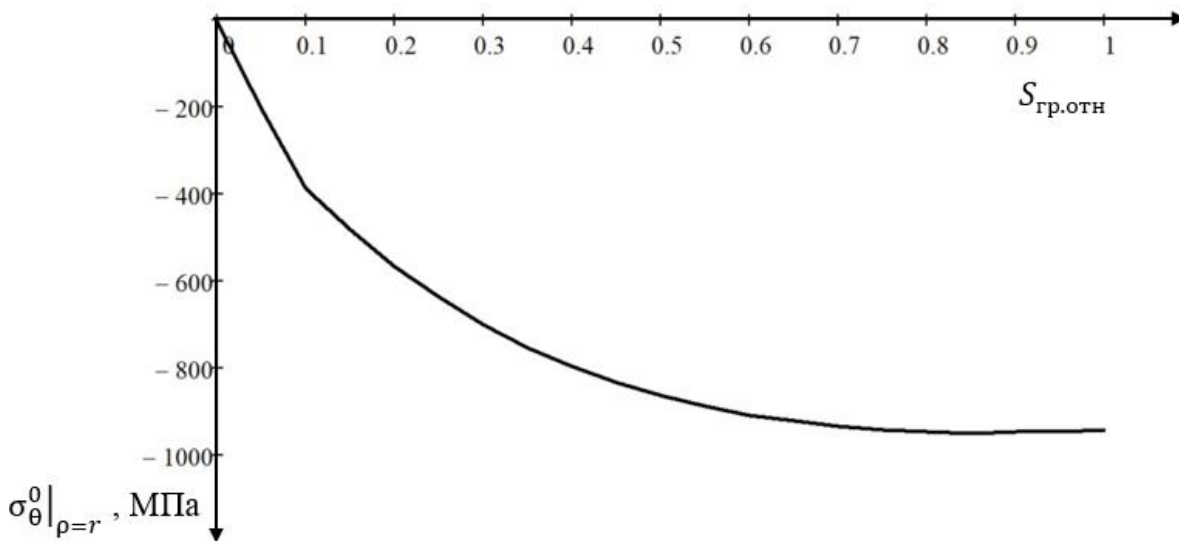


Рисунок 12 – Изменение сжимающих остаточных окружных напряжений $\sigma_{\theta}^0|_{\rho=r}$ на внутренней поверхности оболочки при изменении величины пластической области при автофретировании для $R_0/r_0 = 3$.

Таким образом, можно говорить о рациональном размере пластической области и, соответственно, о давлении автофретирования, при котором дальнейшее увеличение давления не даёт увеличения несущей способности цилиндра. Так, например, для цилиндра из стали А723-1130 при $R_0/r_0 = 2$ это соответствует пластической области при давлении $p_{авт} \approx 892$ МПа, а для $R_0/r_0 = 3$ – при $p_{авт} \approx 1388$ МПа.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

– Предложен численный подход для расчета напряженно-деформированного состояния при упругопластическом деформировании толстостенных цилиндрических оболочек в процессе гидравлического автофретирования с учётом сжимаемости материала и изменения граничных условий, что значительно уменьшает погрешность вычислений в упругопластической области и значительно повышает точность расчетов.

– Построенная методика позволяет использовать реальную диаграмму деформирования материала, полученную на основе экспериментальных исследований, как при нагрузке, так и при разгрузке, а также учитывать упругопластическую анизотропию.

– На основании метода переменных параметров упругости разработана численная методика расчёта остаточных напряжений в толстостенных цилиндрических оболочках с учётом возникающей в процессе нагружения упругопластической анизотропии, вызванной эффектом Баушингера, при гидравлическом автофретировании с продольным растяжением и без.

– Остаточные напряжения, определённые предложенным методом, достаточно хорошо согласуются с результатами, полученными различными авторами и различными методами расчёта для реального материала с учётом возникающей в процессе нагружения упругопластической анизотропии, вызванной эффектом Баушингера, что подтверждает достоверность построенной модели.

– Анализ современных методов определения напряженно-деформированного состояния показал, что предложенный метод является более точным и простым, с точки зрения реализации, так как не требует предварительного решения упругой задачи, а позволяет использовать интегральные уравнения равновесия и совместности деформаций, которые записаны в координатах Эйлера для нелинейной меры деформации Генки.

– Построенная методика расчета позволяет определить рациональный размер пластической области в стенке толстостенной цилиндрической оболочки и, соответственно, давление автофретирования, при котором дальнейшее увеличение давления не обеспечивает увеличения несущей способности оболочки.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Лин Тхет, Феоктистов С. И., Андрианов И. К. Моделирование гидравлического автофретирования толстостенных цилиндрических оболочек с учётом упругопластической анизотропии, вызванной эффектом Баушингера // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2025. – № 2. – С. 149-178. – DOI 10.31857/S1026351925020094. (RSCI, РИНЦ, Белый список).

[переводная версия: Lin T., Feoktistov S. I., Andrianov I. K. Modeling of Hydraulic Autofrettage of Thick-Walled Cylindrical Shells Taking into Account Elastoplastic Anisotropy Caused by the Bauschinger Effect // *Mechanics of Solids*. – 2025. – Vol. 60, No. 2. – P. 891-911. – DOI 10.1134/S0025654424603367]. (**Scopus, Web of Science**)

2. Лин Тхет, Феоктистов С. И., Андрианов И. К. Влияние эффекта Баушингера и упрочнения материала на возникновение вторичных пластических деформаций при автофретировании толстостенного цилиндра // *Труды МАИ*. – 2024. – № 135. (**ВАК, РИНЦ, Белый список**)

3. Лин Тхет, Феоктистов С. И., Андрианов И. К. Оценка погрешности аналитического метода расчёта упругопластического состояния толстостенных осесимметричных оболочек при линейном упрочнении материала // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. – 2023. – № 1(54). – С. 3-10. – DOI 10.24866/2227-6858/2023-1/3-10. (**ВАК, РИНЦ, Белый список**)

Публикации в других изданиях

1. Лин Тхет, Андрианов И. К., Феоктистов С. И. Моделирование напряжённо-деформированного состояния толстостенных цилиндрических оболочек с учётом физической нелинейности материала // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. – 2022. – № 3(59). – С. 12-20. – DOI 10.17084/20764359-2022-59-12.

2. Лин Тхет, Феоктистов С. И., Андрианов И. К. Аппроксимация диаграммы деформирования металла в области упругопластических деформаций с нелинейным упрочнением // *Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета*. – 2022. – № 7(63). – С. 8-13. – DOI 10.17084/20764359-2022-63-8.

3. Лин Тхет, Феоктистов С. И., Андрианов И. К. Метод аппроксимации диаграммы деформирования металла в области упругопластических деформаций // *Фундаментальные и прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в металлургии и машиностроении: материалы VI Дальневосточной конференции с международным участием, Комсомольск-на-Амуре, 05–07 октября 2022 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 210-216.*

4. Лин Тхет, Андрианов И. К., Феоктистов С. И. Предельное состояние толстостенной цилиндрической цилиндра при нелинейном законе упрочнения // *Материалы XXIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2023) : Материалы конференции, с. Дивногорское, Краснодарский край, 04–10 сентября 2023 года. – Москва: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2023. – С. 156-158*

5. Лин Тхет, Андрианов И. К., Феоктистов С. И. Определение относительной деформации, соответствующей началу образования шейки при испытании алюминиевых сплавов на разрыв // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы V Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 11–15 апреля 2022 года. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 157-160.

6. Лин Тхет, Феоктистов С. И., Андрианов И. К. Построение диаграммы деформирования третьего рода с учётом сжимаемости материала и её свойство // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: Материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля 2022 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 528-531.

7. Лин Тхет, Андрианов И. К., Феоктистов С. И. Прогнозирование поля остаточных напряжений при автофретировании толстостенных цилиндрических оболочек с учётом упругопластической неоднородности // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы VII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 08–12 апреля 2024 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2024. – С. 470-473.

8. Лин Тхет, Андрианов И. К., Феоктистов С. И. Подходы к описанию напряжённно-деформированного состояния цилиндрических оболочек при гидравлическом автофретировании // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований: Материалы VIII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 7–11 апреля 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2025.

9. Лин Тхет, Андрианов И. К., Феоктистов С. И. Погрешность при аналитическом расчете упруго-пластических задач для толстостенных оболочек без учета сжимаемости материала // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : Материалы VI Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных. В 3-х частях, Комсомольск-на-Амуре, 10–14 апреля 2023 года. Том Часть 1. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 66-69.

Подписано в печать 20.10.2025.

Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$. Бумага 80 г/м^2 . Ризограф EZ570E.

Усл. печ. л. 1,40. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ

Полиграфическая лаборатория
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»
681013, Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27.