

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»

**НГУЕН ЗУЙ КЫОНГ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА  
ЭКСПАНДИРОВАНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ  
ТРУБ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА**

Специальность 05.16.05 – Обработка металлов давлением

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Доцент, кандидат технических наук  
Ефремов Дмитрий Борисович

**Москва – 2021**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Магистральные трубы большого диаметра должны соответствовать высоким требованиям по геометрии и по свойствам металла. Даже при незначительном отклонении формы поперечного сечения трубы от окружности могут возникать проблемы с качеством сварных швов встык. При всех способах формовки труб контур поперечного сечения в той, или иной мере отличается от правильного круга заданного диаметра, который регламентирован весьма строгими стандартами и ТУ. Сегодня штрипс может поставляться на трубные заводы от разных поставщиков из разных регионов планеты. Исходный металл может выплавляться с существенными отклонениями по химическому составу, прокатываться при разных температурно-скоростных условиях, отличаться структурой и свойствами. Таким образом, на трубные заводы штрипс поступает, имея значительную дисперсию механических свойств, разброс по толщине, поперечную и продольную разнотолщинность.

На линии подготовки кромок и при дальнейших операциях формования трубы возможен учёт только основных констант металла заготовки в виде усреднённых показателей. При всех последующих операциях формовки и при сварке продольным швом добавляются новые источники нестабильности в виде отклонения контура тела от заданной конфигурации.

Экспандирование является ключевой операцией на завершающей стадии производства труб большого диаметра и предназначено для устранения погрешностей, накопленных заготовкой на всех предыдущих переделах.

Однако, механическое экспандирование, применяемое сегодня, имеет ряд принципиальных проблем в виде ограниченного количества сегментов экспандерной головки и необходимости их достаточно большого радиального перемещения, неизбежно также изменение величины контактного трения при экспандировании. Фактором нестабильности формы изделий является дисперсия параметров геометрии контура заготовки для экспандирования, которая наследует упомянутые выше источники отклонений геометрии и свойств металла. Перечисленные условия экспандирования являются результатом действия факторов длинной технологической цепочки по производству трубной заготовки. Они влияют на геометрию конечного изделия и в целом на качество труб большого диаметра.

Выбранная тема диссертации вызвана актуальностью исследования упругопластической деформации металла при экспандировании заготовок, имеющих типовые дефекты формы, свойственные предыдущим операциям обработки, а также возможностей повышения стабильности производства и качества магистральных труб большого диаметра.

### **Цель и задачи работы.**

Целью диссертационной работы являются моделирование и оптимизация процесса экспандирования при производстве труб большого диаметра на базе исследования влияния начальных, граничных условий деформации, а также разброса механических свойств металла и формы заготовок на геометрию изделий.

Для достижения поставленной цели в работе определены следующие задачи:

1. Проведение анализа современных способов производства прямошовных сварных труб большого диаметра (ТБД), изучение ТУ, ГОСТов, характерных дефектов.
2. Разработка математической модели процесса экспандирования, учитывающей наличие контактного деформационного трения, переменных зазоров между сегментами,

дисперсию механических свойств металла и геометрии заготовки.

3. Создание физической модели процесса экспандирования в лаборатории и проведение параллельного конечно-элементного моделирования в условиях экспериментов.

4. Установление зависимости неравномерности распределения напряжений и деформаций металла (НРНД) от условий экспандирования.

5. Разработка конечно-элементной модели экспандирования и изучение влияния начальной формы, ширины штрипса, начальной овальности трубной заготовки, коэффициента трения между сегментами и поверхностью трубной заготовки на геометрию ТБД после экспандирования.

6. Создание стохастической модели процесса экспандирования на базе дисперсии механических свойств штрипса, начальных и граничных условий процесса, разработка метода, дающего возможность оценивать стабильность геометрии изделий и повышать качество ТБД.

7. Разработка программного обеспечения для оптимизации параметров процесса экспандирования при производстве труб большого диаметра.

### **Научная новизна**

1. Построена математическая модель для определения напряженно-деформированного состояния металла при экспандировании с учётом количества сегментов экспандерной головки, переменных зазоров между ними, коэффициента контактного трения между сегментами и трубной заготовкой, а также механических свойств материала трубной заготовки.

2. Разработаны критерии неравномерности распределения напряжений и деформаций, характеризующие процесс экспандирования.

3. Разработан ряд подпрограмм на языке LUA для комплекса QForm, позволяющих исследовать влияние фактической исходной геометрии штрипса, начальной овальности трубной заготовки и коэффициента трения на параметры процесса экспандирования.

4. Предложен критерий в виде «коэффициента остаточной эластичности» в качестве показателя стабильности геометрии изделий после их калибровки механическим экспандированием.

5. Разработан метод исследования влияния механических свойств металла на диаметр ТБД и на коэффициент обратного пружинения при экспандировании.

6. Выявлена возможность повышения стабильности геометрии труб путем установки регламента на величину отношения предела текучести к модулю упругости.

7. Сформировано программное обеспечение на языке C# для автоматического расчета оптимальных параметров процесса экспандирования с целью повышения качества труб большого диаметра после экспандирования.

### **Методики и методы исследований.**

Теоретические исследования основаны на фундаментальных положениях обработки металлов давлением, теории дифференциальных уравнений, теории вероятностей и математической статистики.

Использованы специальные программы типа QForm, Autocad, Matlab и др., автором разработан ряд LUA-подпрограмм для расширения функционала программы QForm, анализа и оптимизации операций по производству ТБД.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать распределение параметров геометрии и напряженно-деформированного состояния металла применительно к условиям производства ТБД.

2. Предложены методы

- прогнозирования неравномерности напряженно-деформированного состояния металла на основе математической модели процесса калибровки для повышения качества продукции;

- расчёта коэффициента остаточной эластичности как средства оценки стабильности геометрии калибруемой продукции.

Методы могут быть использованы для прогнозирования качества ТБД и упреждающей коррекции технологических параметров производства продукции.

3. На основании компьютерного моделирования установлены закономерности трансформации типовых дефектов формы трубной заготовки при её экспандировании, на основании которых сформированы практические рекомендации.

4. Разработаны подпрограммы на языке программирования LUA в вычислительной среде QForm-VX8 для расчёта и отображения упругого изменения внешнего контура трубы, полей остаточных напряжений и деформаций, других параметров процесса экспандирования.

5. Изготовленная физическая модель процесса экспандирования, методы измерения, результаты теоретических и экспериментальных исследований используются при выполнении практических и лабораторных занятий студентами бакалавриата и магистратуры на кафедре ОМД НИТУ «МИСиС».

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Математическая модель для определения параметров напряженно-деформированного состояния при экспандировании;

2. Критерии, оценивающие степень неравномерности распределения параметров напряжений, деформаций при экспандировании, а также математическая зависимость величины этих показателей от числа сегментов экспандерной головки и коэффициента трения;

3. Критерий остаточной эластичности, позволяющей оценить стабильность процесса экспандирования заготовок с исходными дефектами формы;

4. Влияние ширины стального листа, начальной овальности, типа дефектов трубной заготовки и коэффициента трения на параметры процесса экспандирования;

5. Метод стохастического анализа влияния механических свойств и толщины штрипса, граничных условий процесса на геометрические характеристики ТБД после экспандирования.

### **Степень достоверности и апробация результатов обеспечивается:**

1. Использованием современных методов имитационного моделирования, а также лицензионных программных продуктов.

2. Доказанной сходимостью теоретических положений и результатов компьютерного моделирования.

3. Доказанной сходимостью результатов компьютерного моделирования и специальных экспериментов, проведенных в лаборатории кафедры ОМД НИТУ МИСИС.

4. Автореферат проверен на отсутствие плагиата с помощью сервиса «Антиплагиат» - <http://nitumisis.antiplagiat.ru>.

### **Публикации**

Основные результаты исследований опубликованы в 6 печатных изданиях, из них 5 - рекомендованных ВАК, 2 - входящих в международную базу данных Scopus.

### **Структура и объём диссертации**

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 81 наименования отечественных и зарубежных авторов, 4 приложения. Диссертация изложена на 131 страницах и включает 66 рисунков и 21 таблицу.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** дано обоснование актуальности темы диссертации, поставлена цель работы, обозначена научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** выполнены анализ состояния разработок в области технологий производства труб большого диаметра и постановка задач исследования.

Трубы большого диаметра проводятся для прокладки магистральных трубопроводов, применяются для транспортировки нефте- и газопроводов, а также в промышленных отраслях и инженерных коммуникациях. Описаны методы и операции по производству труб большого диаметра, дан анализ операций и методов холодной формовки на вальцах (RB), на прессах (UOE), на прессах способом шаговой формовки (JCOE).

Особая роль отведена в работе финишной операции, называемой «калибровкой», «раздачей» или «экспандированием», поскольку эта операция предназначена для исправления дефектов формы, накопленных на всех предыдущих переделах. Рассмотрены различные способы калибровки: раздачей внутренним давлением жидкости, протягиванием через трубу короткой оправки, либо специальной разжимной оправкой, т.е. сегментами.

Анализ литературных источников по теме диссертационной работы показал, что значительный вклад в решение задач оптимизации операций по производству труб большого диаметра на базе процесса экспандирования и эффективной эксплуатации механизированного процесса экспандирования внесли выдающиеся российские ученые: Коликов А.П., Самусев С.В., Шинкин В.Н., Фрункин Д.Б., Романцев Б.А..., и иностранные ученые: Jingda Cai, Zhengrong Fu, Shuhong Xiao, Xuliang Qu, и др., научные труды которых посвящены решению важнейших задач, связанных с обоснованием конструктивных параметров оборудования современных механизированных комплексов.

Однако эта актуальная проблема большой научной и практической значимости содержит ряд нерешенных задач, требующих проведения дальнейших исследований и разработок. В известных работах отсутствуют математические модели, с помощью которых возможно более полное описание влияния главных параметров, например таких, как геометрия и механические свойства трубной заготовки с типовыми дефектами формы, отсутствует возможность учёта количества сегментов экспандерной головки и влияние дисперсии коэффициента трения между сегментами и внутренней поверхностью трубной заготовки на напряженно-деформированное состояние, контактное давление, градиенты изменения толщины стенки трубной заготовки и изгибающего момента, возникающего на стенке при экспандировании.

В настоящей работе рассматриваются главные факторы, в значительной степени влияющие на стабильность геометрии изделий, как и на процесс экспандирования, что представлено на рисунке 1.

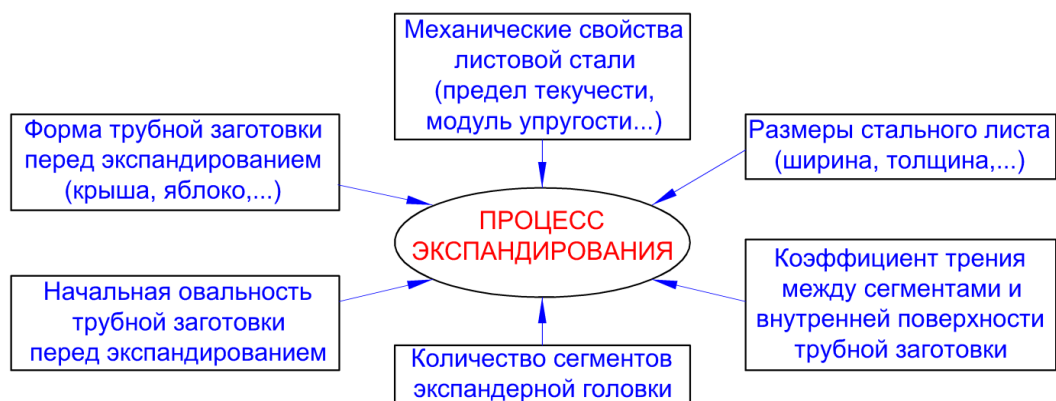


Рисунок 1 – Исследованные в работе главные факторы, влияющие на процесс экспандирования

**Во второй главе** представлена разработка математической модели и методика статистической обработки данных для определения параметров процесса экспандирования и оценки качества продукции.

На базе дифференциальных уравнений равновесия установлены математические зависимости распределения напряжений, деформаций и энергосиловых параметров по контуру трубы при экспандировании, учитывающие наличие сегментов экспандера и их количество, наличие зазоров между сегментами, а также условия трения. Схема расчёта параметров процесса экспандирования показана на рисунке 2, где  $R_c$  [мм] – радиус поверхности сегмента;  $R_t$  [мм] – внутренний радиус трубной заготовки;  $R_{op}$  [мм] – радиус описанной окружности сегментов экспандера;  $u$  [мм] – рабочий ход сегментов;  $\theta$  [рад.] – угловая координата рассматриваемого сечения в текущий момент от относительно центра сегмента;  $\theta_k$  [рад.] – угловая координата кромки сегмента, величина  $\theta_k$  определяется по выражению (1):

$$\cos \theta_k = \frac{u + R_t + R_{op} \left( \cos \frac{\alpha}{2} - 1 \right)}{\sqrt{\left( u + R_t - R_{op} \right)^2 + R_{op}^2 + 2 \left( u + R_t - R_{op} \right) R_{op} \cos \frac{\alpha}{2}}}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  [рад.] – угол между центрами соседних сегментов, равный углу между центрами зазоров.  $\frac{\alpha}{2} = \frac{\pi}{n}$  – угол между центром сегмента и центром зазора, где  $n$  – количество сегментов экспандера.  $\varepsilon$  – тангенциальная деформация в элементе;  $s$  [мм] – толщина стенки элемента в текущий момент,  $s = s_0 e^{-\varepsilon} \approx s_0 (1 - \varepsilon)$ ,  $s_0$  [мм] – начальная толщина стенки трубы;  $\sigma$  [МПа] – тангенциальное напряжение в элементе;  $\tau$  [МПа] – касательное напряжение в элементе;  $p$  [МПа] – давление сегмента на внутренней поверхности трубной заготовки в элементе (контактное давление);  $\gamma$  [МПа] – удельная сила трения сегмента на внутренней поверхности трубы в элементе.

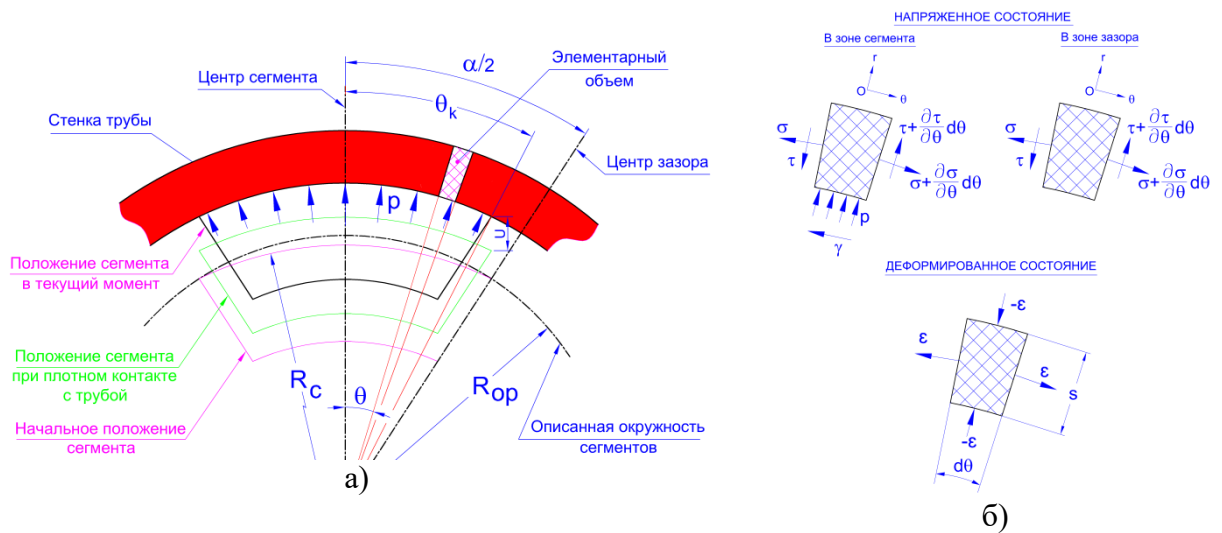


Рисунок 2 – Схема расчёта параметров процесса экспандирования  
 а – силовое воздействие сегмента на трубу; б – напряженно-деформированное состояние элементарного объёма

**Гипотезы для задачи экспандирования**

- В модели принят закон Амонтона–Кулона, согласно которому удельная сила трения  $\gamma$  пропорциональна контактному давлению  $p$  с коэффициентом пропорциональности, называемым коэффициентом трения между сегментами экспандера и внутренней поверхностью трубной заготовки  $\mu$ , т.е.  $\gamma = \mu p$ .

- Принимаем «плоскую схему» деформации, т.е. деформация вдоль оси трубы  $\epsilon_z$  равна нулю. Тогда  $\epsilon_r = -\epsilon_\theta = -\epsilon$  (см. рисунок 2б);

- Материал в пластическом состоянии и течение металла определено по условию пластичности Треска–Сен–Венана  $\sigma = \sigma_s = K \epsilon_p^x = K \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \epsilon \right)^x$ , где  $K$  и  $x$  – коэффициенты кривой сопротивления деформации, которые приближены по данным ГОСТа или испытания на растяжение образцов из исследуемого стали,  $\epsilon_p$  – степень пластической деформации;

- Сегменты контактируют с внутренней поверхностью трубы по всему контуру.

Из этих допущений получены дифференциальные уравнения равновесия [1, 2] в зоне

$$\text{сегмента } (0 \leq \theta \leq \theta_k): \begin{cases} \frac{\partial \tau}{\partial \theta} - \sigma = -p \frac{R_c}{s} \\ \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} + \tau = \mu p \frac{R_c}{s} \end{cases}, \text{ и в зоне зазора } (\theta_k < \theta \leq \frac{\alpha}{2}): \begin{cases} \frac{\partial \tau}{\partial \theta} - \sigma = 0 \\ \frac{\partial \sigma}{\partial \theta} + \tau = 0 \end{cases}.$$

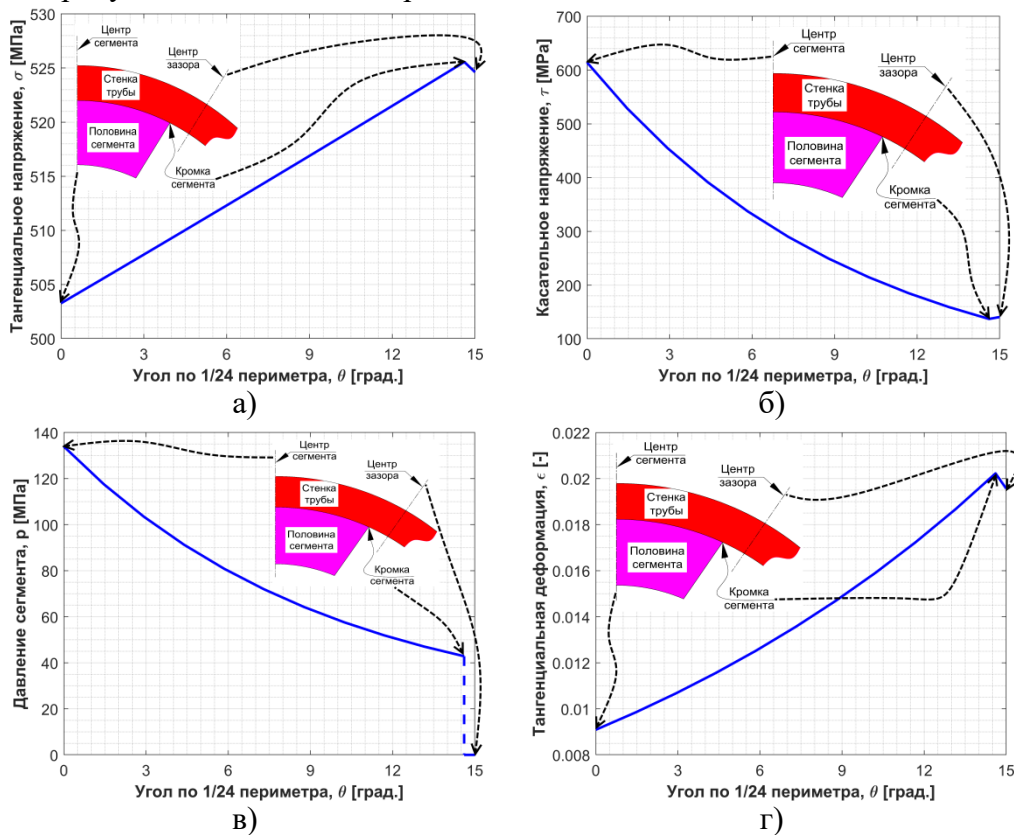
По условию геометрических границ решение заданных дифференциальных уравнений равновесия выражается выражениями (2):

$$\left[ \begin{array}{l} \sigma = \begin{cases} \sigma_c e^{\mu\theta} & \text{если } 0 \leq \theta \leq \theta_k \\ \sigma_c \frac{e^{\mu\theta_k}}{\cos \theta_k} \cos \theta & \text{если } \theta_k < \theta \leq \frac{\alpha}{2} \end{cases}; \quad \tau = \begin{cases} \tau_c e^{-\frac{\theta}{\mu}} & \text{если } 0 \leq \theta \leq \theta_k \\ \tau_c \frac{e^{-\frac{\theta_k}{\mu}}}{\sin \theta_k} \sin \theta & \text{если } \theta_k < \theta \leq \frac{\alpha}{2} \end{cases} \\ \varepsilon = \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{x}}; s = s_0 \left[ 1 - \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{\sigma}{K} \right)^{\frac{1}{x}} \right]; p = \begin{cases} \frac{s}{R_c} \left( \sigma + \frac{\tau}{\mu} \right) & \text{если } 0 \leq \theta \leq \theta_k \\ 0 & \text{если } \theta_k < \theta \leq \frac{\alpha}{2} \end{cases} \end{array} \right. \quad (2)$$

При  $s = s_c$  (т.е. где  $\theta = 0$  – в центре сегмента) расчетные параметры определяются по выражениям (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_c = \frac{s_c - s_0}{s_0}; \sigma_c = K \left( \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_c \right)^x \\ \tau_c = \sigma_c e^{\left( \mu + \frac{1}{\mu} \right) \theta_k} \tan \theta_k; p_c = \frac{s_c}{R_c} \left( \sigma_c + \frac{\tau_c}{\mu} \right) \end{array} \right. \quad (3)$$

По разработанной математической модели кривые изменения тангенциального и касательного напряжений, давления инструмента, тангенциальной деформации и толщины стенки при экспандировании трубной заготовки 1420x21,6 мм из стали К60 показаны на рисунке 3, и их данные представлены в таблице 1:





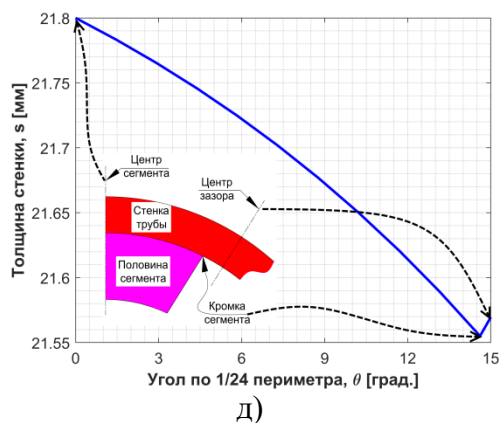


Рисунок 3 – Изменение тангенциального (а), касательного (б) напряжения, давления инструмента (в), тангенциальной деформации (г) и толщины стенки (д)

Из рисунков 3б и 3д видно, что касательное напряжение и толщина стенки ТБД распределяются по периметру аналогично, максимальное значение толщины достигается в центре сегментов, а минимальное значение соответствует кромке сегментов.

Соответственно рисункам 3а и 3г тангенциальные напряжение и деформация распределяются с увеличением от центра сегмента к его кромке. Поэтому повышенная деформация стенки происходит в зоне кромки и объясняет сильное уменьшение толщины стенки в этой зоне. На рисунках 3в показано уменьшение давления от центра сегментов до их кромки.

Таблица 1 – Результаты расчёта силовых параметров процесса экспандирования ТБД 1420x21,6 мм из стали К60

№	θ	σ	τ	p	s	ε
	[град.]	[МПа]	[МПа]	[МПа]	[мм]	[-]
1	0,0000	503,2620	614,1276	133,9163	21,8000	0,0091
2	1,4612	505,4486	528,5777	117,5237	21,7833	0,0098
3	2,9223	507,6447	454,9451	103,4272	21,7653	0,0107
4	4,3835	509,8503	391,5698	91,3064	21,7458	0,0116
5	5,8447	512,0655	337,0229	80,8854	21,7246	0,0125
6	7,3058	514,2903	290,0746	71,9269	21,7017	0,0136
7	8,7670	516,5248	249,6663	64,2265	21,6768	0,0147
8	10,2282	518,7690	214,8870	57,6086	21,6499	0,0159
9	11,6893	521,0229	184,9525	51,9215	21,6208	0,0172
10	13,1505	523,2866	159,1880	47,0351	21,5892	0,0187
11	14,6117	525,5602	137,0126	42,8372	21,5550	0,0202
12	14,6893	525,3740	137,7249	0,0000	21,5579	0,0201
13	14,7670	525,1868	138,4369	0,0000	21,5608	0,0200
14	14,8447	524,9987	139,1487	0,0000	21,5637	0,0198
15	14,9223	524,8096	139,8601	0,0000	21,5666	0,0197
16	15,0000	524,6196	140,5714	0,0000	21,5695	0,0196

Величины  $k_{\sigma} = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} = e^{\mu\theta_k}$  и  $k_{\epsilon} = \frac{\epsilon_{\max}}{\epsilon_{\min}} = e^{\frac{\mu\theta_k}{x}}$  назовём показателями

неравномерности напряжений и деформаций (НРНД) соответственно [2, 3], где  $\sigma_{\max}$ ,  $\epsilon_{\max}$  – максимальные значения напряжения и деформации, и  $\sigma_{\min}$ ,  $\epsilon_{\min}$  – минимальные в зоне одного сегмента соответственно. Чем ближе значения этих критериев к единице, тем более

равномерным является распределение НДС по контуру трубы, а также выше используются возможности операции экспандирования для калибровки трубной заготовки по всему её контуру. С целью повышения качества трубных изделий целесообразно снизить степени неравномерности напряжения и деформации до минимально возможного уровня.

На основе полученных ранее выражений можно установить, каким образом зависят степени неравномерности напряжения  $k_\sigma$  и деформации  $k_\varepsilon$  от коэффициента трения и от количества сегментов экспандера, что показано на рисунках 4а и 4б. Очевидно, что при меньших значениях коэффициента трения число сегментов экспандера мало влияет на степени неравномерности напряжения и деформации. При высоком контактном трении нужно увеличивать количество сегментов экспандера для снижения степени неравномерности напряжения и деформации для повышения качества ТБД. При ограниченном числе сегментов экспандера в практике обычно снижают коэффициент трения до минимально возможного значения путём подачи воды и выбора рациональных смазок.

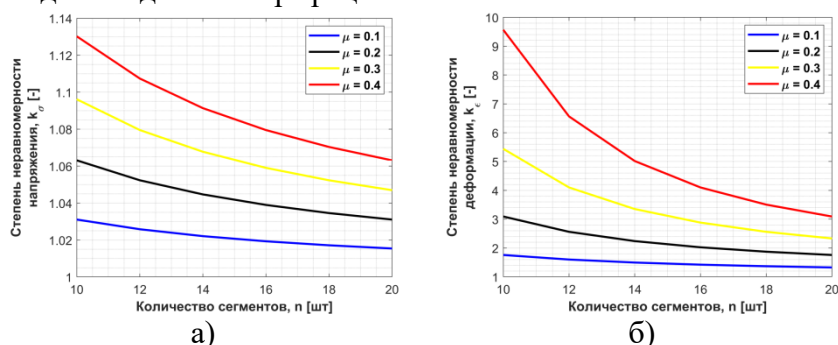


Рисунок 4 – Зависимость показателей неравномерности напряжения (а) и неравномерности деформации (б) от количества сегментов и коэффициента трения

Можно предположить наличие корреляционной связи между качеством труб и показателями НРНД. На этой основе уровень прогнозируемого качества ТБД предлагается классифицировать по группам, что при  $k_\sigma \leq [k_\sigma]$  и  $k_\varepsilon \leq [k_\varepsilon]$  можно ожидать повышенное качество ТБД, где  $[k_\sigma]$  и  $[k_\varepsilon]$  (оба всегда  $\geq 1$ ) связаны с уровнем качества продукции, их величины можно определить путём сопоставления результатов расчёта или моделирования НДС металла при экспандировании с данными, полученными при сканировании геометрии изделий при поточном производстве труб.

Механические свойства материала характеризуются модулем упругости  $E$  (МПа), пределом текучести  $\sigma_{0,2}$  [МПа], пределом прочности  $\sigma_b$  [МПа] и относительным удлинением при разрыве  $\delta_5$  (%). Материал для производства ТБД должен обеспечивать

по ТУ 14–3–1573–96 величину отношения  $\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_b} \leq 0,9$ . При аппроксимации кривой

сопротивления деформации показатель степени для кривой упрочнения стали определяется выражением  $x = \frac{\ln \sigma_b - \ln \sigma_{0,2}}{\ln \left( \frac{\delta_5}{100} - \frac{\sigma_b}{E} \right) - \ln 0,002}$ . Т.е. показатели неравномерности

напряжений  $k_\sigma$  и деформаций  $k_\varepsilon$  представляют собой функции от совокупности аргументов  $Q(E, \sigma_{0,2}, \sigma_b, \delta_5, \mu)$ .

Производство штрипса связано с большим количеством случайных воздействий на процесс формирования структуры и свойств металла. Разработана методика стохастического моделирования для оценки качества ТБД по степени НРНД при калибровке труб экспандированием. Коэффициенты корреляции степеней неравномерности напряжения  $r_{\sigma w}$  и деформации  $r_{\varepsilon w}$  определяются формулой (4), где:  $N$  - количество случайных испытаний,  $w$  может быть параметром  $E, \sigma_{0,2}, \sigma_b, \delta_5, \mu$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{\sigma w} = \frac{N \sum_{i=1}^N k_{\sigma i} w_i - \left( \sum_{i=1}^N k_{\sigma i} \right) \left( \sum_{i=1}^N w_i \right)}{\sqrt{\left[ N \sum_{i=1}^N k_{\sigma i}^2 - \left( \sum_{i=1}^N k_{\sigma i} \right)^2 \right] \left[ N \sum_{i=1}^N w_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N w_i \right)^2 \right]}} \\ r_{\varepsilon w} = \frac{N \sum_{i=1}^N k_{\varepsilon i} w_i - \left( \sum_{i=1}^N k_{\varepsilon i} \right) \left( \sum_{i=1}^N w_i \right)}{\sqrt{\left[ N \sum_{i=1}^N k_{\varepsilon i}^2 - \left( \sum_{i=1}^N k_{\varepsilon i} \right)^2 \right] \left[ N \sum_{i=1}^N w_i^2 - \left( \sum_{i=1}^N w_i \right)^2 \right]}} \end{array} \right. \quad (4)$$

Блок схемы алгоритма оценки качества продукции по степени НРНД с помощью случайного моделирования при экспандировании представлен на рисунке 5.



Рисунок 5 – Блок схемы алгоритма оценки качества ТБД по степени НРНД

Пример моделирования с исходными данными анализа для труб 1420x21,6 мм из стали К60 по ГОСТу 31447-2012 и анализу результатов измерений листов стана 5000 показан в таблице 2 и на рисунке 6а:

Таблица 2 – Результаты испытаний механических свойств металла, коэффициента трения и их распределения

Случайная величина	Интервал величины	Закон распределения	Коэффициент относительной асимметрии $\lambda$	
			$\lambda_1$	$\lambda_2$
$E$ [ГПа]	$210 \pm 5$	Симпсона	0	0,12
$\sigma_{0,2}$ [МПа]	$519 \pm 59$	Нормальный	0	-0,15
$\sigma_b$ [МПа]	$649 \pm 59$	Нормальный	0	0,30

$\delta_5$ [%]	$20 \pm 1$	Непрерывный равномерный	0	-0,20
$\mu$ [-]	$0,27 \pm 0,10$	Нормальный	0	-0,35

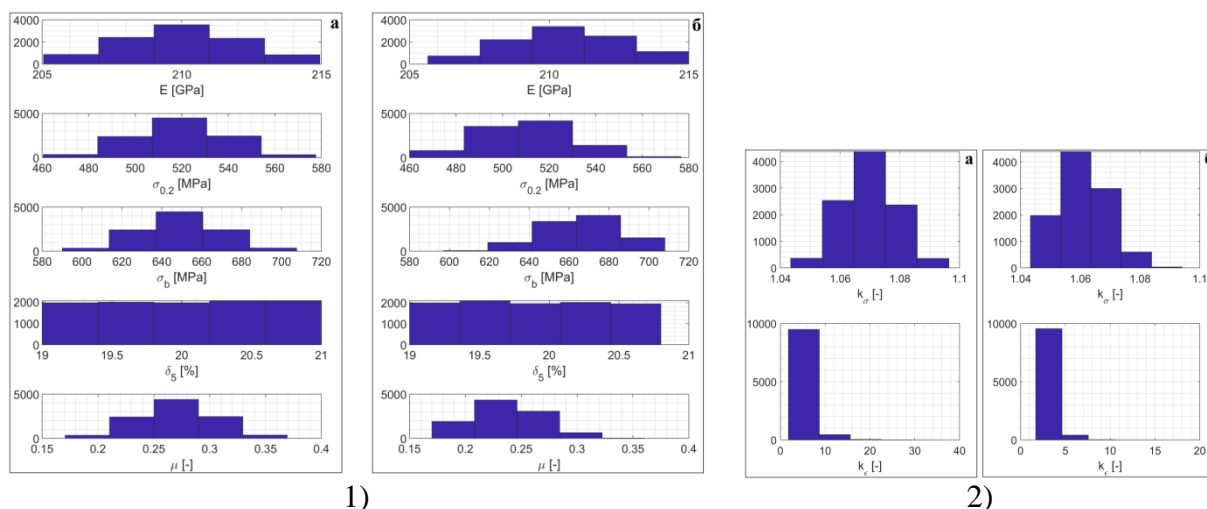


Рисунок 6 – Гистограммы распределения механических свойств и коэффициента трения для 10000 наборов исходных параметров (1) и распределения степеней НРД (2)  
а – при  $\lambda = \lambda_1$ ; б – при  $\lambda = \lambda_2$

Результаты моделирования представлены на рисунке 6б, в таблице 3 с предлагаемым уровнем качества  $[k_\sigma] = 1,07$  и  $[k_\epsilon] = 20$ :

Таблица 3 – Результаты моделирования для классификации и оценки качества партии из 10000 труб

<b>I. Степени неравномерности напряжения-деформации</b>				
Номер группы	$k_\sigma$	$k_\epsilon$	Количество деталей при	
			$\lambda = \lambda_1$	$\lambda = \lambda_2$
1	не более $[k_\sigma]$	не более $[k_\epsilon]$	5159	8638
2	не более $[k_\sigma]$	более $[k_\epsilon]$	0	0
3	более $[k_\sigma]$	не более $[k_\epsilon]$	4819	1362
4	более $[k_\sigma]$	более $[k_\epsilon]$	22	0
<b>II. Коэффициенты корреляции степеней неравномерности</b>				
Параметр	напряжения $r_{\sigma w}$		деформации $r_{\epsilon w}$	
	Величина	Оценка	Величина	Оценка
$E$	0	-	-0,0180	Очень слабая
$\sigma_{0,2}$	0	-	0,5594	Заметная
$\sigma_b$	0	-	-0,4542	Слабая
$\delta_5$	0	-	0,0227	Очень слабая
$\mu$	1	Идеальная взаимосвязь	0,3789	Слабая

Методом стохастического моделирования оценено качество ТБД после экспандирования, в примере при  $\lambda = \lambda_1$  число деталей группы 1 (группа высокого

качества) составляет около 52 % от общего объёма продукции, и при  $\lambda = \lambda_1$  составляет примерно 86 % на основе влияния механических свойств и условий трения.

Из величин коэффициентов корреляции в таблице 3 нетрудно видеть, что из 5 рассматриваемых факторов предел текучести металла и коэффициент трения значительно влияют на степень НРНД и также на качество продукции. С уменьшением коэффициента трения и предела текучести повышаются стабильность процесса экспандирования и растёт качество ТБД (это будет подтверждаться в главе 4). Причём по ТУ 14-3-1573-96 необходимо гарантировать  $\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_b} \leq 0,9$ .

**В третьей главе** выполнено экспериментальное исследование течения металла трубной заготовки при экспандировании в лаборатории. Проведены обоснования совпадения результатов между физическим и компьютерным моделированием.

Для экспериментальных исследований процессов механической калибровки труб была изготовлена 8-сегментная экспандерная головка. Использовались сварные трубные заготовки из трубной стали, а также специальные образцы из модельного алюминиевого сплава АД31, свойства которого представлены в таблице 4. Алюминиевый сплав был выбран для изучения процесса механической калибровки труб при широком интервале изменения коэффициента контактного трения.

Таблица 4 – Химический состав и механические свойства сплава АД31

Химический состав в % по ГОСТу 4784-97					
Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Примесей
≤ 0,5	0,2...0,6	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,15	Прочие, каждая 0,05; всего 0,15
Al	Cu	Mg	Zn		
97,65...99,35	≤ 0,1	0,45...0,9	≤ 0,2		
Механические свойства при температуре 20 <sup>0</sup> С по ГОСТу 18482-79					
E [МПа]	σ <sub>0,2</sub> [МПа]	σ <sub>b</sub> [МПа]		δ <sub>5</sub> [%]	
71000	60	130		12	

Проведен эксперимент на растяжение на машине Zwick Roell 200кН для определения кривой сопротивления деформации сплава АД31, представленной на рисунке 7.

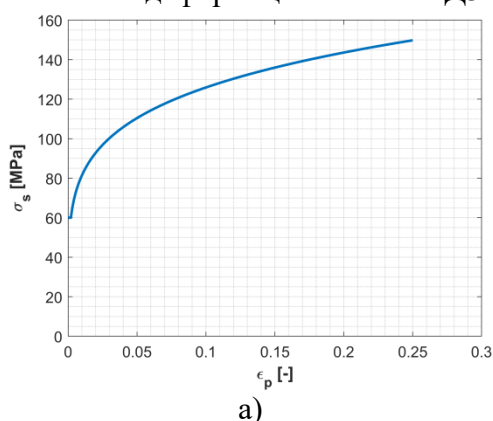


Рисунок 7 – Кривая сопротивления деформации сплава АД31 (а) при растяжении на испытательной машине Zwick Roell 200кН (б)

Координатная сетка на наружной поверхности трубных заготовок наносилась лазерной гравировкой, образцы и детали 8-сегментной экспандерной головки представлены на рисунке 8:



Рисунок 8 – Трубные заготовки после лазерной гравировки (а) и изготовленный инструмент (б) для физического моделирования

Образцы использовались в виде трубных заготовок  $\phi 60 \times 3$  из сварной стальной трубы, а также из алюминиевого сплава АД31. Образцы расширяли без смазки, со смазкой и со смазкой после предварительной дробеструйной обработки (ДО) внутренней поверхности трубы.

Эксперименты по определению коэффициента трения  $\mu$  проведены методом осадки кольцевых образцов. Использовались образцы, выточенные из горячекатаной трубной стали, а также из упомянутого сплава АД31. Диаграмма для определения коэффициента трения использована при соотношении размеров образцов  $D_0 : d_0 : h_0 = 6 : 3 : 1$  (рис.9).

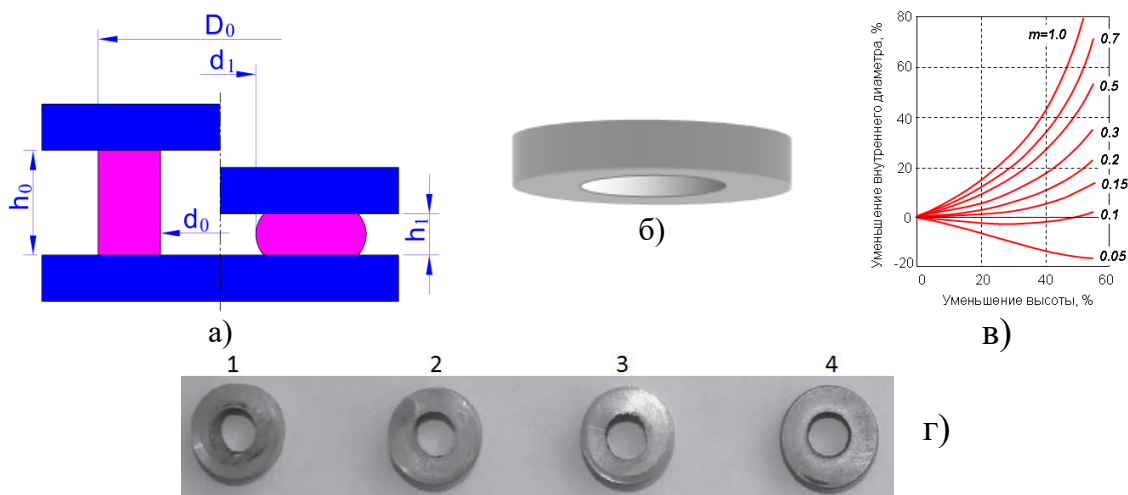


Рисунок 9 – Схема экспериментов для определения фактора трения с использованием процесса осадки (а, б) и стандартной диаграммы (в); трубные образцы из сплава АД31 при экспериментах (г):

Коэффициент трения  $\mu$  по фактору трения  $m$  определится формулой  $\mu = \frac{m}{\sqrt{3}}$ . Его значения показаны в таблице 5:

Таблица 5 – Измерение коэффициента трения между инструментом и алюминиевого сплава в разных состояниях поверхности

Состояние поверхности	№	Измеряемые величины								
		$d_0$	$d_1$	$h_0$	$h_1$	$\Delta d$	$\Delta h$	$m$	$\mu$	$\mu_{tb}$
Без смазки	1	21,0	17,7	7,0	4,8	15,8	31,2	0,452	0,261	<b>0,26</b>
	2	21,0	17,5	7,0	4,7	16,6	32,1	0,454	0,262	
	3	21,0	17,6	7,0	4,8	16,0	31,2	0,450	0,260	
	4	21,0	17,5	7,0	4,7	16,6	32,1	0,454	0,262	
	5	21,0	17,7	7,0	4,8	15,8	31,2	0,452	0,261	

Со смазкой	1	21,0	17,9	7,0	4,5	14,9	35,4	0,315	0,182	<b>0,18</b>
	2	21,0	18,0	7,0	4,5	14,5	35,4	0,312	0,180	
	3	21,0	17,9	7,0	4,5	14,9	35,4	0,315	0,182	
	4	21,0	17,9	7,0	4,5	14,9	35,4	0,315	0,182	
	5	21,0	17,8	7,0	4,6	15,2	36,3	0,315	0,182	
Смазка после ДО	1	21,0	18,6	7,0	4,3	11,2	38,1	0,225	0,130	<b>0,13</b>
	2	21,0	18,7	7,0	4,4	11,0	37,5	0,227	0,131	
	3	21,0	18,7	7,0	4,4	11,0	37,5	0,227	0,131	
	4	21,0	18,7	7,0	4,4	11,0	37,5	0,227	0,131	
	5	21,0	18,6	7,0	4,3	11,2	38,1	0,225	0,130	

Реализовано физическое моделирование процесса экспандирования на прессе ОМД-3 в лаборатории кафедры ОМД НИТУ МИСиС. Схема экспериментов показана на рисунке 10.

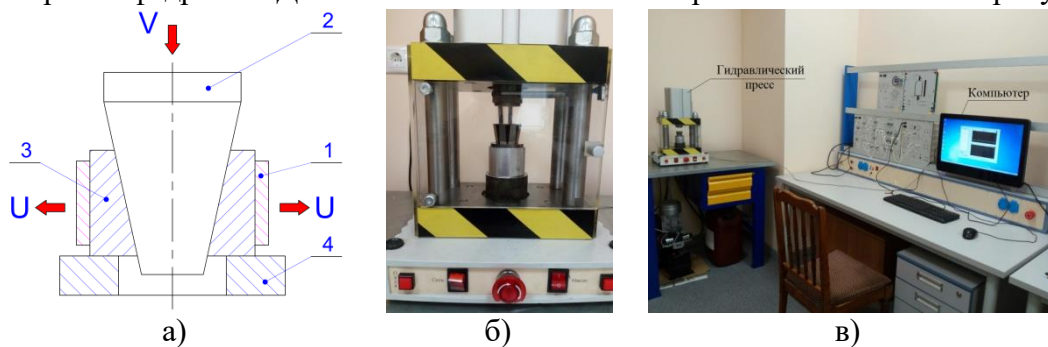


Рисунок 10 – Физическое моделирование процесса экспандирования на прессе ОМД-3 100 кН

а – схема деформирования; б, в – оборудование для моделирования  
1 – трубная заготовка; 2 – пирамида (пуансон);  
3 – сегменты головки; 4 – плита

Искажение сеток на поверхности трубной заготовки измерено современными средствами для определения тангенциальных деформаций, представленными на рисунке 11.

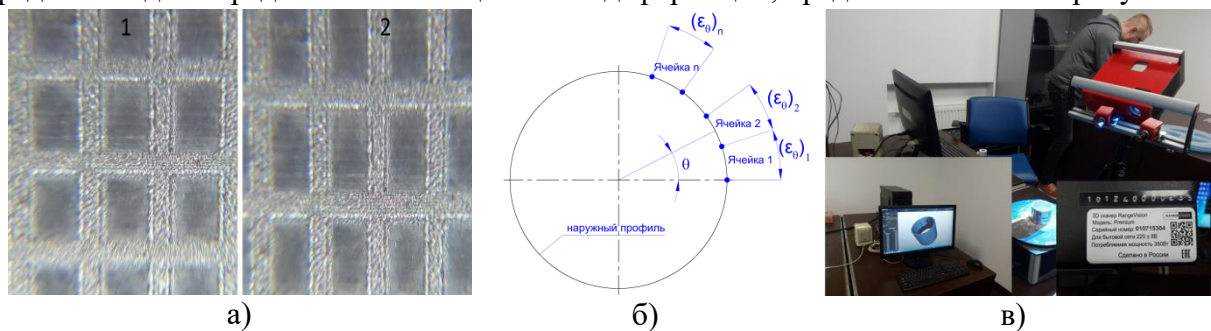


Рисунок 11 – Измерение тангенциальных деформаций в лаборатории  
а – сетка на трубной заготовке; б – схема измерения; в – 3d-сканер «Range Vision»  
1 – перед экспандированием; 2 – после экспандирования

Параллельно с физическим экспериментом проведено конечно-элементное моделирование в программе QForm-VX8 процесса экспандирования образцов, идентичных тем, которые совпадали с условиями лабораторного эксперимента (рис. 12). Целью являлась здесь проверка точности и возможная настройка параметров компьютерного моделирования. 2D-геометрические модели заготовки и инструмента построены на программном обеспечении AutoCad 2014.

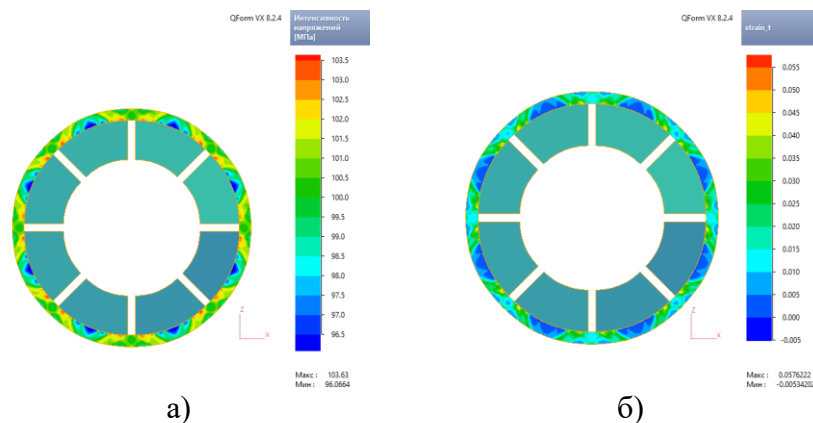


Рисунок 12 – Поля интенсивности напряжения (а) и тангенциальной деформации (б)

Для фиксированного рабочего хода сегментов экспандера  $u$  определялся периметр наружного контура образцов, он определялся до и после экспандирования ( $C_1$  и  $C_2$ ) для физического и компьютерного моделирования. Суммарная тангенциальная деформация по контуру выражается формулой:  $\varepsilon_{\theta}^{\Sigma} = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \cdot 100\%$ . Исходный периметр наружного контура трубной заготовки  $C_1 = \pi \cdot 60 = 188,4$  мм. Алгоритм компьютерного определения периметра контура после деформации основан на использовании координат поверхностных узлов конечно-элементной сетки.

Отличие компьютерного моделирования от физического определится выражением  $\Delta\varepsilon_{\theta} = \frac{\left| \left( \varepsilon_{\theta}^{\Sigma} \right)_M - \left( \varepsilon_{\theta}^{\Sigma} \right)_Э \right|}{\left( \varepsilon_{\theta}^{\Sigma} \right)_Э} \cdot 100\%$ , где:  $\left( \varepsilon_{\theta}^{\Sigma} \right)_M$  и  $\left( \varepsilon_{\theta}^{\Sigma} \right)_Э$  - суммарная тангенциальная деформация, полученная при компьютерном и физическом моделировании соответственно.

Результаты компьютерного моделирования (Мод.) и физического моделирования (Эксп.) при экспандировании трубных образцов представлены в таблице 6 и на рис.13.

Таблица 6 – Параметры наружной поверхности трубной заготовки после экспандирования

№	$u$ , мм	$C_2$ , мм		$\varepsilon_{\theta}^{\Sigma}$ , %		$\Delta\varepsilon_{\theta}$ , %	Примечание
		Мод.	Эксп.	Мод.	Эксп.		
1	0,5	191,9	191,6	1,86	1,72	<b>7,91</b>	Без смазки ( $\mu = 0,26$ )
2	1,0	193,7	193,4	2,81	2,66	<b>5,80</b>	
3	1,5	196,9	197,5	4,51	4,82	<b>6,34</b>	
4	2,0	201,1	201,7	6,74	7,04	<b>4,26</b>	
5	2,5	203,1	203,6	7,80	8,05	<b>3,15</b>	
6	0,5	191,4	191,1	1,59	1,46	<b>8,99</b>	Со смазкой ( $\mu = 0,18$ )
7	1,0	193,4	193,0	2,65	2,47	<b>7,43</b>	
8	1,5	196,6	196,3	4,35	4,22	<b>3,19</b>	
9	2,0	199,6	200,2	5,94	6,28	<b>5,45</b>	
10	2,5	202,7	203,1	7,59	7,81	<b>2,83</b>	
11	0,5	191,0	190,8	1,38	1,27	<b>8,52</b>	Смазка после “ДО” ( $\mu = 0,13$ )
12	1,0	193,2	192,8	2,55	2,34	<b>8,82</b>	
13	1,5	196,2	195,8	4,14	3,93	<b>5,41</b>	
14	2,0	199,3	198,9	5,79	5,55	<b>4,37</b>	
15	2,5	202,1	201,2	7,27	6,81	<b>6,72</b>	



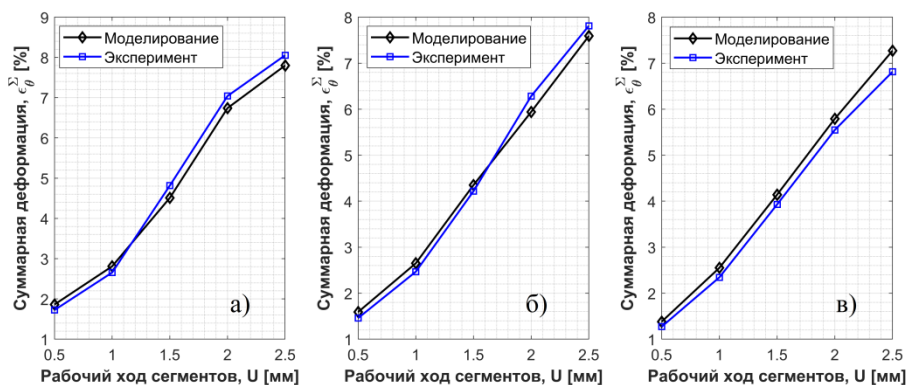


Рисунок 13 – График суммарной деформации при экспандировании трубной заготовки при разных условиях трения  
а – при  $\mu = 0,26$ ; б – при  $\mu = 0,18$ ; в – при  $\mu = 0,13$

Распределение значений тангенциальной деформации после физического и компьютерного моделирования для некоторых образцов показана на рисунке 14.

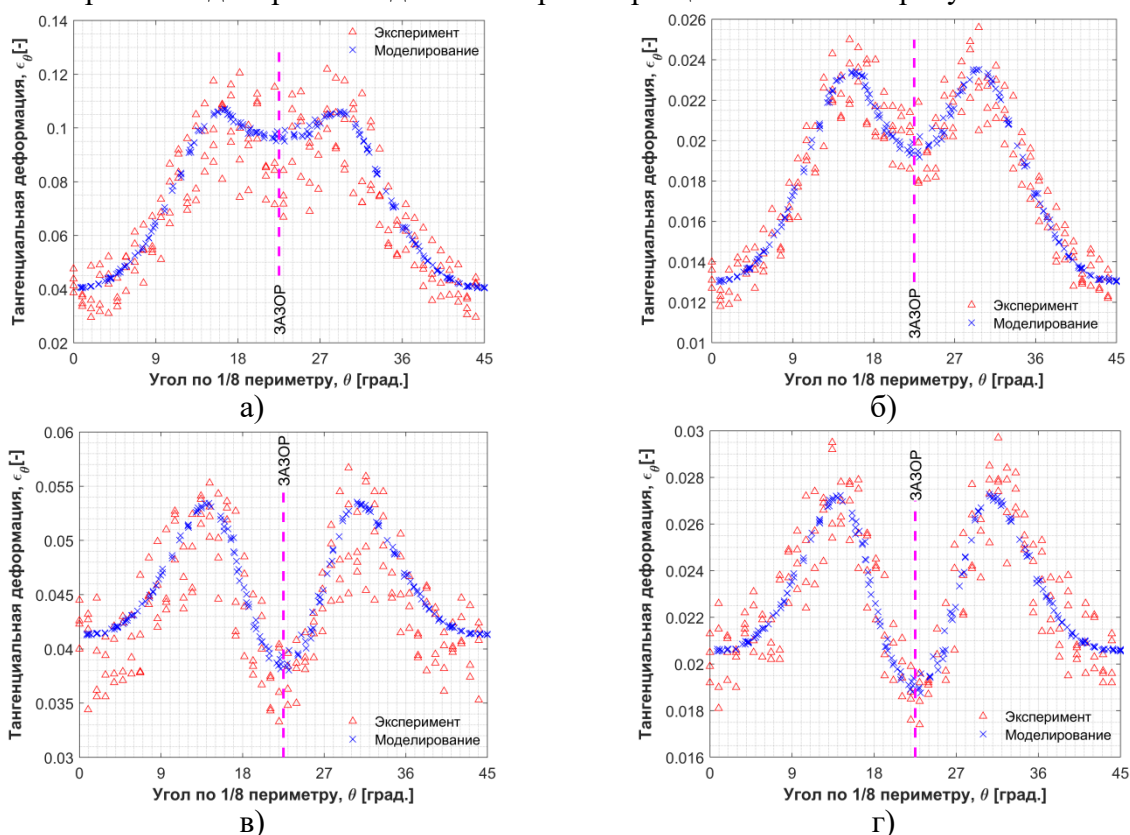


Рисунок 14 – Распределение тангенциальной деформации на наружной поверхности трубной заготовки по экспериментальным данным и результатам моделирования  
а – образец №1; б – образец №4; в – образец №6; г – образец №9

Полученные отличия компьютерного моделирования от физического (3–9) % показывают, что применение QForm позволяет с приемлемой точностью прогнозировать локальные значения параметров НДС при экспандировании трубной заготовки.

**В четвертой главе** разработана конечно-элементная модель процесса экспандирования ТБД методом конечных элементов в программе QForm. Установлен алгоритм с помощью программного языка LUA для определения геометрических параметров внешнего профиля (диаметр, периметр и овальность), напряжений, деформаций, давлений инструмента на трубу и других параметров. Исследовано влияние

формы заготовки, ширины стального листа, начальной овальности и коэффициента контактного трения на параметры процесса экспандирования.

В этой главе описано поведение коэффициента обратного пружинения при экспандировании, а также изменение (отклонение) диаметра ТБД, при наличии дисперсии механических свойств материала заготовки. В исследовании определен интервал параметров материала, позволяющих стабилизировать диаметр ТБД при экспандировании.

**Разработка метода определения характеристик внешней поверхности ТБД при экспандировании**

Решение задачи деформации при экспандировании выполняется методом 2D-конечных элементов в среде QForm, где построением сетки нужно обеспечить точность и сходимость решения. В созданной сетке есть два типа узлов: внутри и на поверхности заготовки. Поверхностные узлы сетки образуют геометрическую форму тела. В программном комплексе QForm нормальные векторы на внутренних узлах всегда равны вектору нуля  $\vec{0}$  и будут отличаться от него, если узлы находятся на поверхности заготовки (внутренней или внешней). Представлен следующий метод определения координат узлов на внешней поверхности [2].

На рисунке 15а показаны координаты поверхностных узлов  $P_i(x_i, z_i)$  и нормальные векторы в них  $\vec{n}_{P_i}(n_{xi}, n_{zi})$ , где  $i=1...N$ , а  $N$  – количество узлов на внешней поверхности на каждом шаге времени деформации. Видно, что, когда скалярное произведение векторов  $\vec{OP}_i$  и  $\vec{n}_{P_i}$  больше нуля или  $\vec{OP}_i \cdot \vec{n}_{P_i} = x_i n_{xi} + z_i n_{zi} > 0$ , то эти узлы находятся на внешней поверхности заготовки, в остальных случаях – на внутренней. Разработанная автором подпрограмма написана на языке LUA и предназначена для расчета пользовательских полей, которых изначально нет в списке полей QForm, и которая может быть выполнена после моделирования.

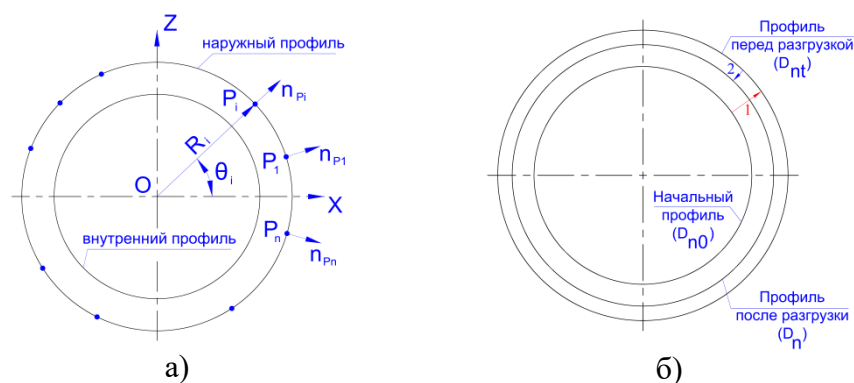


Рисунок 15 – Схема определения координат узлов (а) и коэффициента пружинения (б) на наружной поверхности трубной заготовки при экспандировании

Пользовательские поля рассчитываются в каждом узле и отображаются стандартными средствами просмотра или сохраняются. Поэтому координаты узлов внешней поверхности для всех этапов деформации после моделирования процесса экспандирования выполнены подпрограммой и записаны в файл данных. Некоторый код MATLAB используется для обработки этого файла и вычислений для получения геометрических параметров внешней поверхности трубы, таких как: радиус в  $i$ -ом узле равен  $R_i = \sqrt{x_i^2 + z_i^2}$ ; угол узла  $P_i$  определяется формулой  $\theta_i = \arctan\left(\frac{z_i}{x_i}\right)$ ; диаметр по

направлению  $D \approx 2R_i$ ; овальность  $\Delta = D_{\max} - D_{\min}$ , здесь  $D_{\max}$  и  $D_{\min}$ , соответственно, максимальное и минимальное значения наружных диаметров  $D$ , измеренных по радиальным направлениям поперечного сечения трубной заготовки; периметр всей внешней поверхности в рассматриваемый момент процесса деформации

$$C = \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}, \text{ с гипотезой } x_{N+1} = x_1 \text{ и } z_{N+1} = z_1; \text{ номинальный диаметр}$$

трубной заготовки в рассматриваемый момент процесса деформации  $D_n = \frac{C}{\pi}$ ; степень

экспандирования в рассматриваемый момент процесса деформации рассчитывается по формуле  $\varepsilon_{ex} = \frac{C - C_0}{C_0} 100\%$ , где  $C_0$  – периметр исходной заготовки (значение диаметра

исходной заготовки будет  $D_{n0} = \frac{C_0}{\pi}$ ).

### ***Коэффициент остаточной упругости при экспандировании***

Введём один показатель процесса экспандирования, отражающий наличие зон, где правка тангенциальным растяжением недостаточна для выравнивания формы тела. Безразмерную величину  $\xi$  можем назвать «коэффициент остаточной упругости/эластичности» сечения тела при экспандировании ( $0 \leq \xi \leq 1$ ):  $\xi = \frac{S_e}{S_{\Sigma}} \approx \frac{n_e}{n_{\Sigma}}$ , где:

$S_e$  – суммарная площадь упругих зон в поперечном сечении заготовки;  $S_{\Sigma}$  – суммарная площадь всего поперечного сечения трубы;  $n_e$  – количество узлов сетки, где эквивалентное напряжение не превышает предел текучести  $\sigma_{0,2}$  ( $\sigma_{0,2} = 460$  МПа для стали К60), здесь материал находится в «упругой» области, включая узлы, в которых пластическая деформация равна нулю;  $n_{\Sigma}$  – количество всех узлов в поперечном сечении тела. Коэффициент  $\xi$  определен подпрограммой на языке LUA для комплекса QForm с определением числа узлов  $n_e$  и  $n_{\Sigma}$ . После завершения процесса экспандирования некоторые зоны заготовки могут оставаться ещё в упругом состоянии, поэтому после сброса внешней нагрузки они могут «стремиться» к исходной геометрии заготовки и поэтому исказить форму ТБД после разгрузки. Можно ожидать, что чем меньше величина  $\xi$ , тем более предсказуемо калибруется заготовка и совершеннее в целом процесс экспандирования [3-6].

При исследовании процесса экспандирования также используются следующие параметры:  $\Delta_0$  – начальное значение овальности;  $B_0$  – ширина стального листа;  $\mu$  – коэффициент трения;  $\sigma_{itb}$  – средняя интенсивность напряжения в теле;  $p$  – среднее давление сегмента экспандера на трубу.

***Методика исследования влияния начальной формы, ширины стального листа, начальной овальности и коэффициента трения на параметры процесса экспандирования.***

Исследована кинематика экспандирования заготовок с типовым дефектом формы в виде «крыши дома» (типовой дефект формы, образованным нарушением угла сварки кромок). Рассмотрен процесс экспандирования труб  $\Phi 1420 \times 21,6$  мм из стали К60 с интервалами:  $B_0 = [4343 \dots 4371]$  мм;  $\Delta_0 = [5,8 \dots 13,5]$  мм и  $\mu = [0,05 \dots 0,25]$ . После аппроксимации полученных данных с помощью программного обеспечения OriginPro

2016 версией 64 bit результаты представлены в виде формул в таблице 7 и в виде графиков на рисунке 16.

Таблица 7 – Формулы аппроксимации для формы крыши

Формула	Единица	$R^2$ (*)
$\frac{\Delta}{\Delta_0} = 0,84564(0,68406\mu + 0,79233)\left(\frac{1000\Delta_0}{B_0}\right)^{-0,83249}$	–	<b>0,995</b>
$\varepsilon = -21,52669\frac{B_0}{1000} + 94,59875$	%	<b>≈ 1</b>
$\sigma_{itb} = 11,87504(-0,63122\mu + 42,65182)\varepsilon^{0,05689}$	МПа	<b>0,998</b>
$\xi = 0,07783(0,06921\mu + 0,01690)\varepsilon^{-2,48165}$	–	<b>0,711</b>
$p = 2,849(0,30406\mu + 3,03938)(2,13434\varepsilon + 0,04783)$	МПа	<b>0,940</b>
(*) Множественный коэффициент детерминации		

Видно, что с увеличением величины  $\mu$  увеличиваются величины  $\Delta$ ,  $\xi$ ,  $p$  и уменьшается  $\sigma_{itb}$ . С увеличением величины  $\Delta_0$  увеличивается  $\Delta$ . При увеличении  $B_0$  величины  $\varepsilon$ ,  $\sigma_{itb}$ ,  $p$  уменьшаются, а  $\xi$  увеличивается.

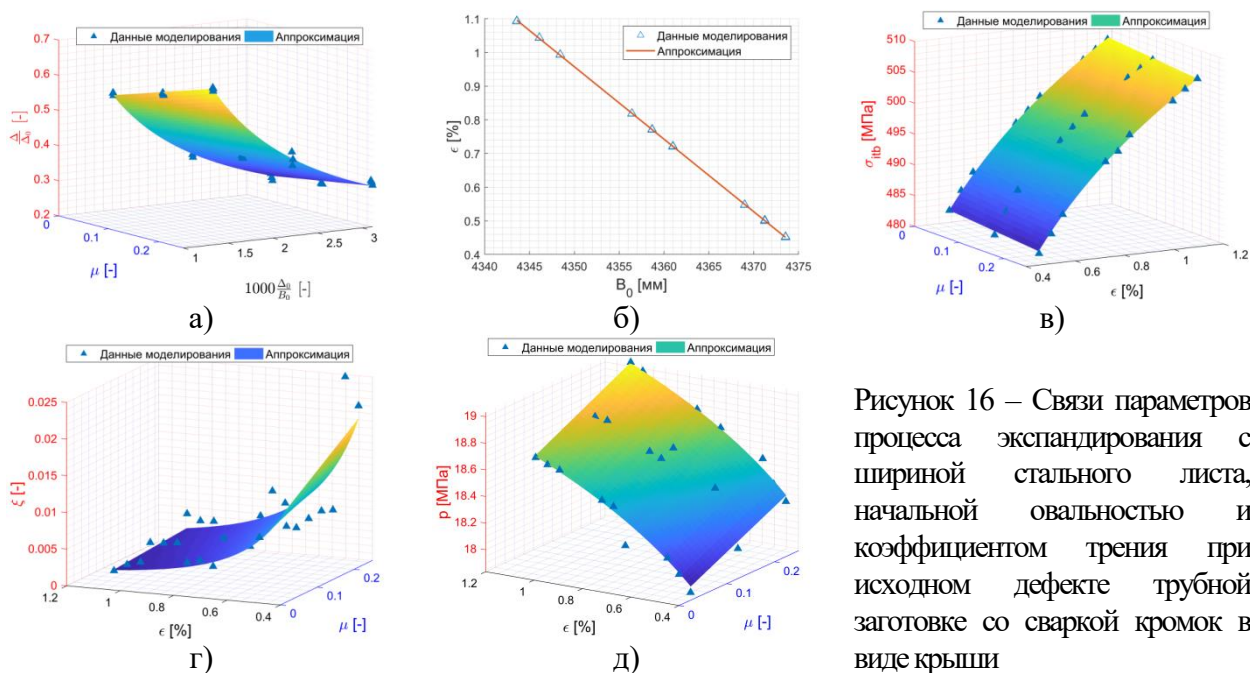


Рисунок 16 – Связи параметров процесса экспандирования с шириной стального листа, начальной овальностью и коэффициентом трения при исходном дефекте трубной заготовке со сваркой кромок в виде крыши

а – овальность; б – пластическая деформация; в – средняя интенсивность напряжений; г – коэффициент остаточной упругости; д – среднее давление сегмента на трубу

Пример распределения полей напряженно-деформированного состояния в зоне сварного шва при экспандировании с параметрами:  $B_0 = 4358,7$  мм;  $\Delta_0 = 9,7$  мм и  $\mu = 0,05$  показан на рисунке 17.

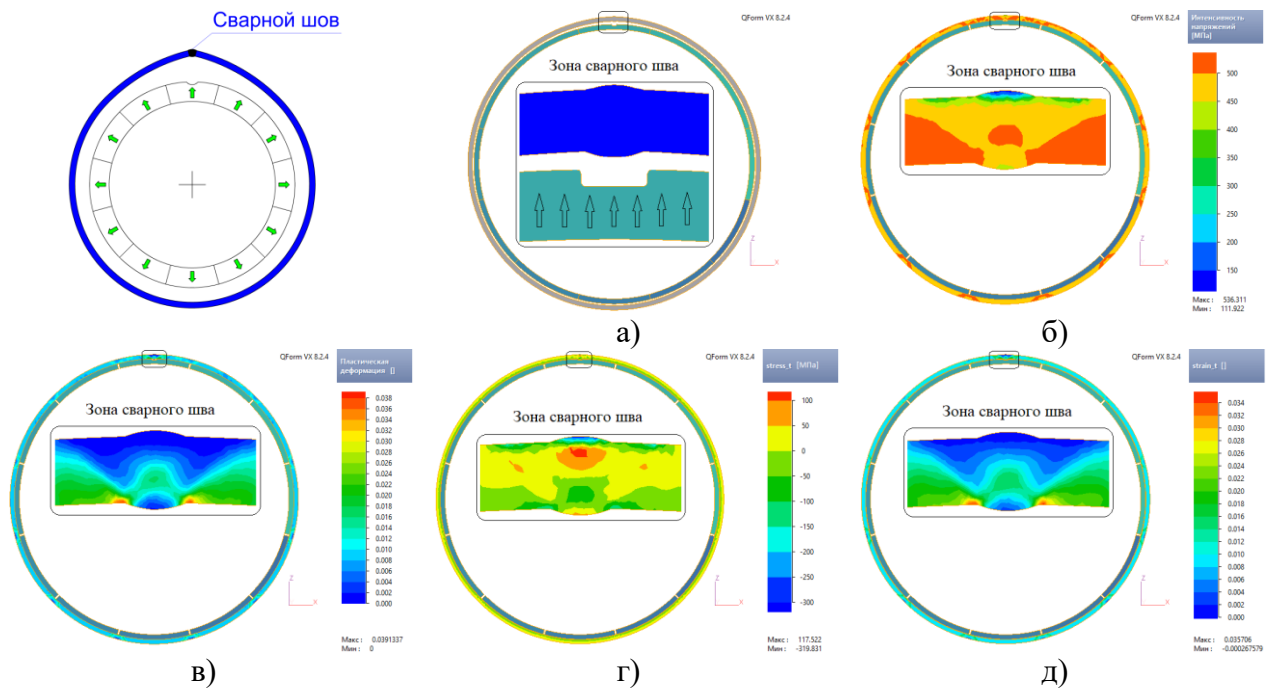


Рисунок 17 – НДС при экспандировании трубной заготовки в виде крыши  
 а – начальный контур заготовки в зоне шва; б – интенсивность напряжений;  
 в – пластическая деформация; г – остаточное тангенциальное напряжение;  
 д – остаточная тангенциальная деформация

Изменение во время деформации наружного диаметра и овальности трубной заготовки показаны на рисунке 18а. Видно, что диаметр всегда увеличивается до 1424 мм, и потом достигает до 1420,4 мм после снятия нагрузки от экспандера, а овальность уменьшается от начального значения до минимального (примерно до 2,8 мм) в первой стадии, во второй она больше, до 3,03 мм, а после разгрузки она увеличивается примерно на 0,4 мм.

Наружный профиль ТБД до и после экспандирования представлен на рисунке 18б.

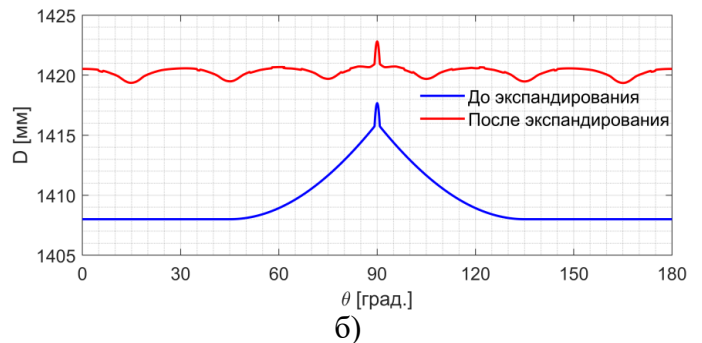
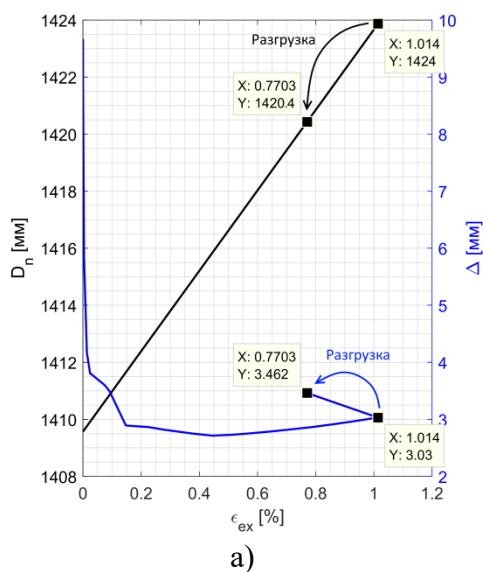


Рисунок 18 – Изменение наружного диаметра и овальности трубной заготовки во время экспандирования (а) и изменение наружного профиля до и после экспандирования (б)

При сварке кромок трубной заготовки в виде «яблока», аналогично работе с трубной заготовкой с дефектом в виде крыши, проведено моделирование процесса

экспандирования труб 1420x21,6 мм из стали К60 с интервалами:  $B_0 = [4338...4363]$  мм;  $\Delta_0 = [2,9...14,4]$  мм и  $\mu = [0,05...0,25]$ . После аппроксимации данных с помощью программного обеспечения OriginPro 2016 версией 64 bit результаты представлены в виде формул в таблице 8 и в виде графиков на рисунке 19.

Таблица 8 – Формулы аппроксимации для формы яблока

Формула	Единица	$R^2$ (*)
$\frac{\Delta}{\Delta_0} = 0,83623(0,57145\mu + 0,7906) \left( \frac{1000\Delta_0}{B_0} \right)^{-1,14359}$	–	<b>0,996</b>
$\varepsilon = -21,8193 \frac{B_0}{1000} + 95,87457$	%	<b>≈ 1</b>
$\sigma_{itb} = 13,4568(-0,51298\mu + 37,62442)\varepsilon^{0,05402}$	МПа	<b>0,999</b>
$\xi = 0,06131(0,0158\mu + 0,01882)\varepsilon^{-1,3451}$	–	<b>0,781</b>
$p = 2,849(0,25908\mu + 2,84914)(2,27735\varepsilon + 0,04884)$	МПа	<b>0,950</b>
(*) Множественный коэффициент детерминации		

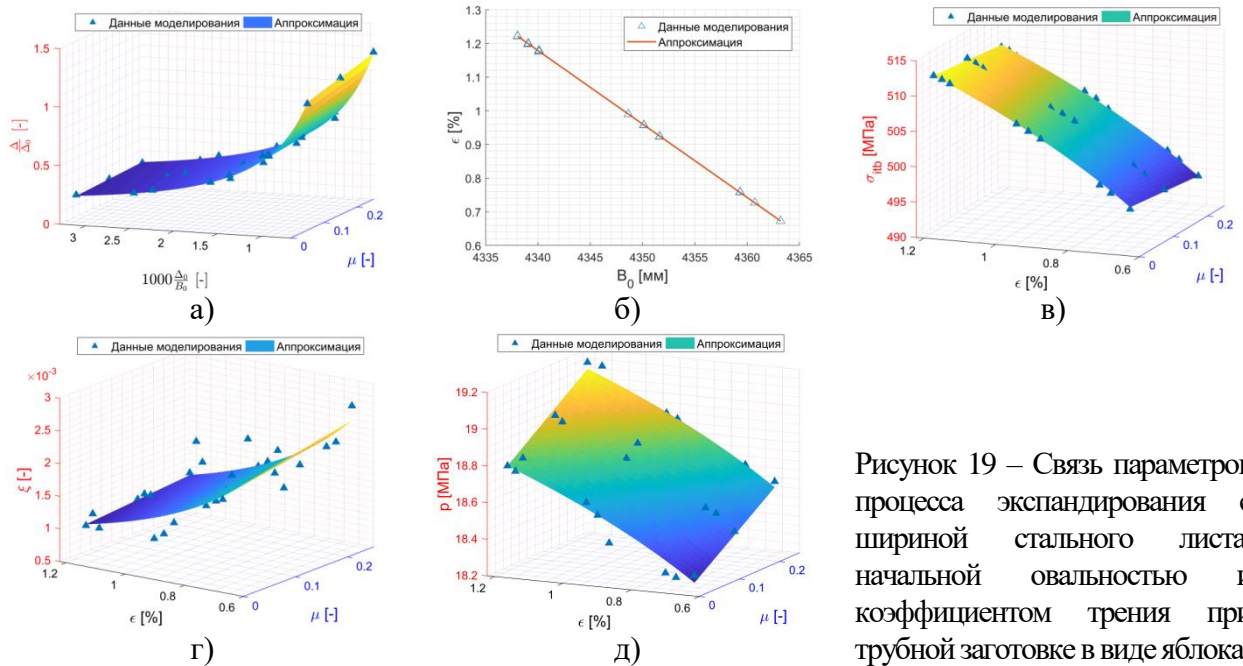


Рисунок 19 – Связь параметров процесса экспандирования с шириной стального листа, начальной овальностью и коэффициентом трения при трубной заготовке в виде яблока:

а – овальность; б – пластическая деформация; в – средняя интенсивность напряжений; г – коэффициент остаточной упругости тела; д – среднее давление сегмента на трубу

Пример распределения полей напряженно-деформированного состояния в зоне сварного шва при экспандировании с параметрами:  $B_0 = 4360,7$  мм;  $\Delta_0 = 11,5$  мм и  $\mu = 0,05$  показан на рисунке 20.

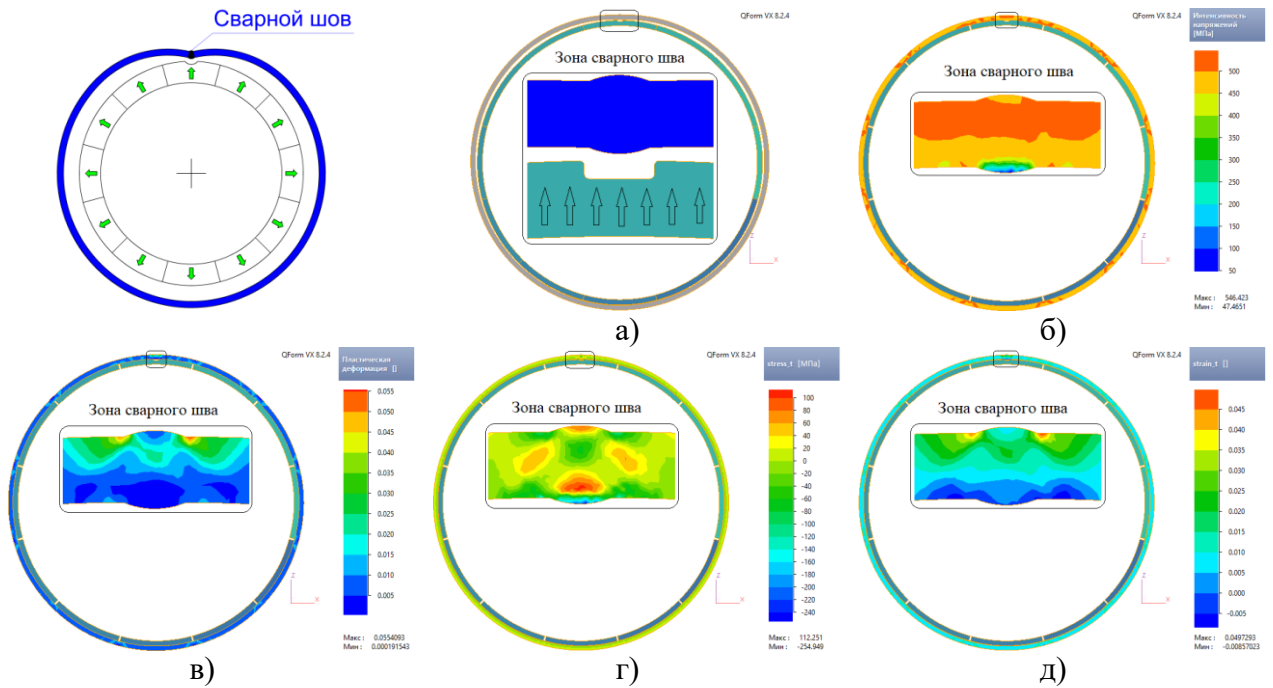


Рисунок 20 – НДС при экспандировании трубной заготовки в виде яблока:

а – начальное состояние; б – интенсивность напряжений; в – пластическая деформация; г – остаточное тангенциальное напряжение; д – остаточная тангенциальная деформация

Изменение во время деформации наружного диаметра и овальности трубной заготовки выражены на рисунке 21а. Видно, что диаметр всегда увеличивается до 1424 мм, и потом снижается до 1420,5 мм после снятия нагрузки от экспандера, а овальность быстро уменьшается от начального значения до минимального (примерно до 2,1 мм) в первой стадии, и в второй она увеличивается немного, до 2,897 мм, а после разгрузки она уменьшается на примерно 0,2 мм.

Наружный профиль ТБД до и после экспандирования представлен на рисунке 21б.

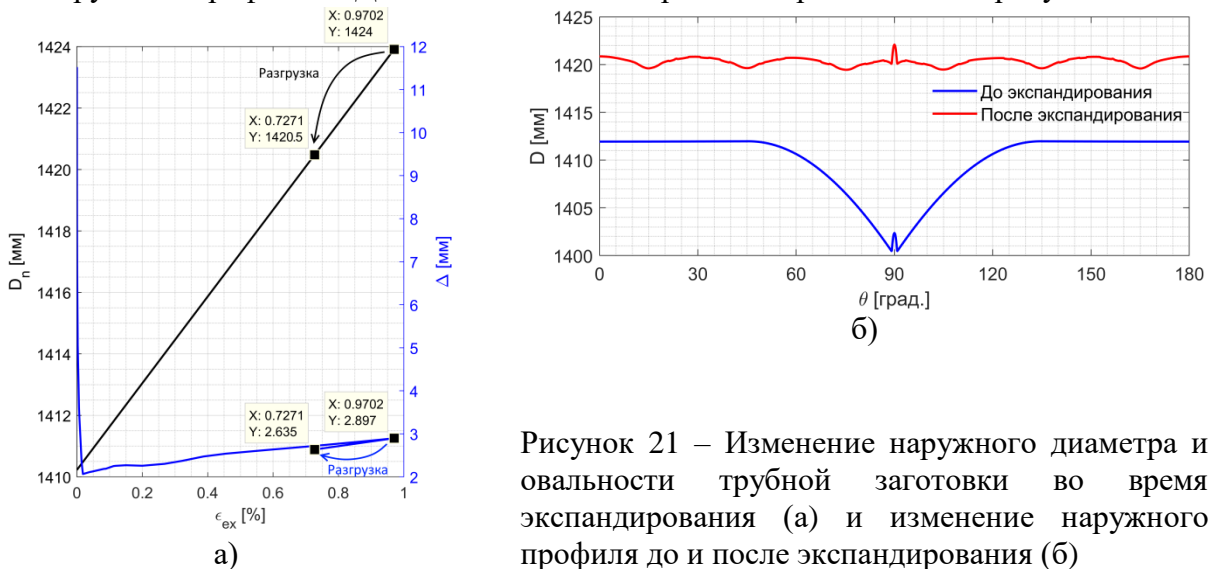


Рисунок 21 – Изменение наружного диаметра и овальности трубной заготовки во время экспандирования (а) и изменение наружного профиля до и после экспандирования (б)

Из регрессионных формул, представленных в таблицах 7 и 8, получим графики сравнения влияния величин  $B_0$ ,  $\Delta_0$ ,  $\epsilon$  на процесс экспандирования заготовок, которые имели начальные дефекты в виде крыши и яблока, они показаны на рисунке 23.

На рисунке 22а представлено изменение овальности ТБД (отношение  $\frac{\Delta}{\Delta_0}$ ) по отношению  $\frac{1000\Delta_0}{B_0}$ . На этом графике при  $\frac{1000\Delta_0}{B_0} < 0,9$  овальность для формы крыши выше, чем для формы яблока, и если  $\frac{1000\Delta_0}{B_0} > 0,9$  то овальность для формы крыши меньше для формы яблока. В практике отношение  $\frac{1000\Delta_0}{B_0}$  всегда больше 1, поэтому качество ТБД по овальности для начальной формы типа яблока можно считать предпочтительней по сравнению с дефектом формы типа крыши.

На рисунке 22б представлено изменение коэффициента остаточной эластичности  $\xi$  по пластической деформации  $\epsilon$ . На этом графике коэффициент остаточной эластичности для формы яблока всегда меньше, чем для формы крыши, поэтому для формы яблока можно прогнозировать более стабильную геометрию изделий после калибровки.

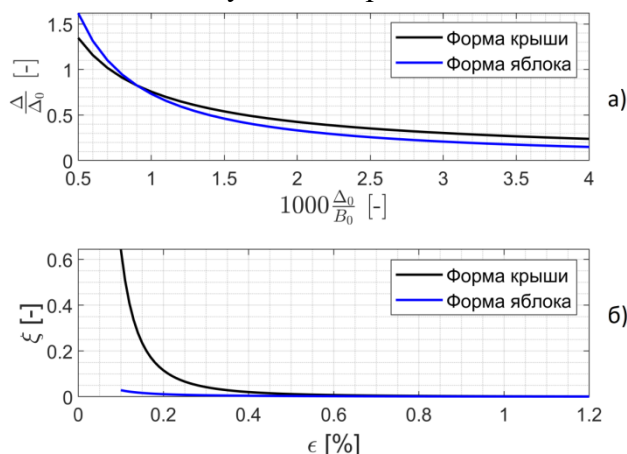


Рисунок 22 – Сравнение овальности (а) и коэффициента остаточной эластичности (б) при экспандировании трубной заготовки в виде крыши и яблока

**Метод определения коэффициента обратного пружинения при экспандировании**

На рисунке 15б после завершения операции экспандирования происходит обратное пружинение стенки трубы, причём она несколько уменьшается в диаметре. Диаметр трубы перед разгрузкой  $D_{nt}$  уменьшается до размера  $D_n$  (до номинального диаметра ТБД). Коэффициент пружинения  $\lambda_D$  выражается формулой  $\lambda_D = \frac{D_n - D_{nt}}{D_{nt}} 100\%$ .

Нетрудно видеть, что коэффициент пружинения  $\lambda_D$  всегда меньше нуля. Он зависит сильно от механических свойств материала, которые используются для изготовления ТБД, и влияет на отклонение размеров трубы. При определенном режиме экспандирования чем величина  $\lambda_D$  больше, тем диаметр трубы больше.

В качестве примера в настоящей работе исследовано обратное пружинение при экспандировании труб 1420x21,6 мм. Формула определения связи коэффициента пружинения и диаметра ТБД после экспандирования с пределом текучести и с модулем упругости:



$$\begin{cases} \lambda_D = -0,10016 \frac{\sigma_{0,2}}{E} + 1,33539 \cdot 10^{-4} [\%], & R^2 \\ D_n = 1424 \left( 1 + \frac{\lambda_D}{100} \right) \text{ мм} \end{cases}$$

Эти связи показаны в виде графиков на рисунках 23 и 24а. Видно, что:

При  $D_n = 1417$  мм коэффициент пружинения можно рассчитать по выражению  $\lambda_D = \frac{1417 - 1424}{1424} 100\% = -0,492 \%$ .

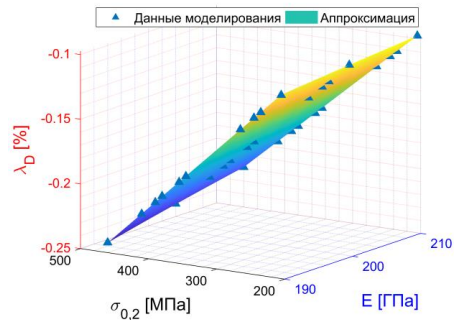


Рисунок 23 – Связи коэффициента пружинения с пределом текучести и модулем упругости

Отношение предела текучести к модулю упругости  $\frac{\sigma_{0,2}}{E} = \frac{1,33539 \cdot 10^{-4} + \lambda_D}{0,10016} = 4,913$ .

При  $D_n = 1420$  мм, то  $\lambda_D = \frac{1420 - 1424}{1424} 100\% = -0,281 \%$  и  $\frac{\sigma_{0,2}}{E} = 2,807$ ;

При  $D_n = 1423$  мм то  $\lambda_D = \frac{1423 - 1424}{1424} 100\% = -0,070 \%$  и  $\frac{\sigma_{0,2}}{E} = 0,700$ ;

При  $\lambda_D > -0,070 \%$  диаметр больше 1423 мм, а при  $\lambda_D < -0,492 \%$  он меньше 1417 мм. Т.е. труба после экспандирования не удовлетворяет требованиям ГОСТ 31447–2012, по которому наружный диаметр должен быть в интервале [1417...1423] мм;

При  $-0,492 \% \leq \lambda_D \leq -0,070 \%$  наружный диаметр находится в интервале [1417...1423] мм. Но наружный диаметр равен 1420 мм при  $\lambda_D = -0,281 \%$ . А при  $-0,281 \% \leq \lambda_D \leq -0,070 \%$  то  $D_n$  находится в большем значении от номинального диаметра (больше 1420 мм), при  $-0,492 \% \leq \lambda_D \leq -0,281 \%$  то  $D_n$  находится в меньшем значении от номинального диаметра (меньше 1420 мм).

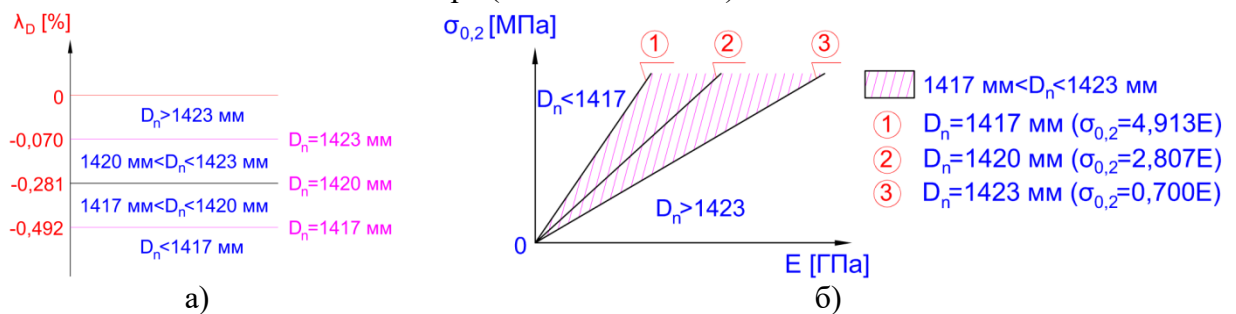


Рисунок 24 – Схема прогнозирования диаметра труб по коэффициенту пружинения (а) и по влиянию предела текучести и модуля упругости металла (б) при экспандировании

На рисунке 24б представлена зависимость полученного диаметра после экспандирования от предела текучести  $\sigma_{0,2}$  [МПа] и от модуля упругости  $E$  [ГПа]. Видно, что:

- для разных материалов, использованных для изготовления ТБД с одинаковым отношением  $\frac{\sigma_{0,2}}{E} = const$  величина пружинения будет одинаковой при экспандировании.

Т.е. наружный диаметр может быть получен одинаковым;

- чем больше значение отношения предела текучести к модулю упругости, тем меньше диаметр ТБД. При  $0,700 \leq \frac{\sigma_{0,2}}{E} \leq 4,913$  получим наружный диаметр ТБД в интервале [1417...1423] мм в соответствии с ГОСТом 31447–2012 (получится ровно 1420 мм при  $\frac{\sigma_{0,2}}{E} = 2,807$ ), это соответствует зоне повышенной стабильности процесса экспандирования для труб 1420x21,6 мм.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В цепочке операций по производству магистральных труб большого диаметра процесс калибровки экспандированием заготовок имеет ключевое значение, заготовка для него наследует колебания структуры металла и механических свойств, геометрии штрипса, а также соответствующие этому дефекты предыдущих операций формовки и сварки.

2. Математическим и компьютерным моделированием установлена количественная зависимость степени неравномерности напряжений и деформаций при экспандировании от геометрии сегментов экспандерной головки и их количества, от коэффициента трения и от показателя степени кривой упрочнения металла. С повышением этого параметра неравномерность снижается.

3. Данные, полученные на созданной физической модели экспандирования, и параллельное компьютерное моделирование подтвердили возможность проведения исследований процесса на основе конечно-элементного моделирования с использованием разработанных LUA-подпрограмм в препроцессоре и постпроцессоре программного комплекса QForm-VX8.

4. Определена количественная зависимость геометрии изделий после экспандирования от начальной геометрии штрипса, от свойств металла, вида исходной трубной заготовки, коэффициента контактного трения и режима экспандирования. Установлено, что предпочтительной геометрией заготовок для калибровки обладает контур с дефектом формы типа «яблока» в отличие от дефектов типа «крыша».

5. Проведён стохастический анализ калибровки труб с известной дисперсией исходных данных, результаты позволяют оценить стабильность процесса и возможности управления технологическими параметрами для обеспечения соответствия требованиям ГОСТ 31447-2012.

6. Моделированием установлено, что одним из путей повышения стабильности геометрии калибруемых изделий может быть установление регламента на величину отношения предела текучести к модулю упругости металла штрипса.

7. Результаты моделирования, программы на языках C# и LUA, использование предложенных критериев неравномерности распределения напряжений и деформаций, коэффициента остаточной эластичности при экспандировании позволят оптимизировать операции по производству магистральных труб, повысить точность их геометрии.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. **Нгуен З.К.**, Ефремов Д.Б. Математическое моделирование для классификации качества труб большого диаметра по степеням неравномерности распределения напряжения-деформации при экспандировании. Теория и технология металлургического производства. 2020. № 3 (34). С. 14-20 (ВАК).

2. Ефремов Д.Б., **Нгуен Зуй Кыонг**. Определение изменения параметров внешнего профиля труб большого диаметра при экспандировании с помощью подпрограммы в среде QForm. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2020. № 4. С. 33-38 (ВАК).

3. **Nguyen D.C.**, Yefremov D.B. The method for determining the profile of large diameter pipes and the optimal technological mode during calibration-bending in the weld zone. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 862. No. 3. DOI:10.1088/1757-899X/862/3/032104 (SCOPUS).

4. **Nguyen D.C.**, Yefremov D.B. Mathematical simulation for forecasting an uneven distribution of the stressed-strain state of metal when expanding large-diameter pipes. Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2021. Vol. 1. P. 966-975 (SCOPUS).

5. Ефремов Д.Б., **Нгуен Зуй Кыонг**. Конечно-элементное моделирование процесса экспандирования труб большого диаметра с начальным дефектом формы в виде круглого выступа. Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2021. № 3. С. 41-48 (ВАК).

6. Нгуен З.К., Ефремов Д.Б. Оценка степени неравномерности распределения напряженно-деформированного состояния металла на основе математической модели при экспандировании труб большого диаметра. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. №3. С. 461-467.