

На правах рукописи



ЗАЙЦЕВ АЛЕКСЕЙ ИВАНОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ПРОЦЕССОВ ГИБКИ ТРУБ С ОСЕВЫМ СЖАТИЕМ  
В ПРЕДЕЛАХ ДОПУСТИМОГО ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ**

2.5.7. Технологии и машины обработки давлением (технические науки)

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Орёл – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел

Научный руководитель: **Вдовин Сергей Иванович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Демин Виктор Алексеевич**  
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры МТб «Технологии обработки давлением»  
**Пасынков Андрей Александрович**  
кандидат технических наук,  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет»,  
доцент кафедры «Механика пластического формоизменения»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк.

Защита состоится «22» апреля 2022 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 24.2.353.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, 29, аудитория 212.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» по адресу: <http://oreluniver.ru>.

Объявление о защите диссертации и автореферат диссертации размещены в сети Интернет на официальном сайте ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева» ([www.oreluniver.ru](http://www.oreluniver.ru)) и на официальном сайте Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (<https://vak.minobrnauki.gov.ru/main>).

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Кожус Ольга Геннадьевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Гибка труб занимает важное место в различных отраслях машиностроения, а в таких как производство энергетического оборудования, судо- и авиастроение ей придают особое значение. Оно вытекает из повышенных требований к надежности и функциональным характеристикам трубопроводов, с которыми конфликтует проблематика трубогибочного производства. Овальзация сечений изогнутых участков трубы снижает усталостную прочность, а волнистость их вогнуто-выпуклой поверхности создает гидро-, аэродинамические помехи и – как следствие – шум, вибрацию. Взаимосвязь негативных явлений такова, что противодействие одним благоприятствует другим. Нагружение продольным сжатием изгибаемой трубы улучшает показатели утонения ее стенки и некруглости сечений, но одновременно способствует появлению волн (гофров), а также реверсивных деформаций (разгибки).

Моделирование потери устойчивости листов и труб основаны на мембранном эффекте при сжатии пластинок и оболочек. Его механизм, изученный в прошлом веке, лежит в основе современных расчетов исследований устойчивого деформирования.

Мембранная модель возникновения дефекта исключает возможность расчета слабой волнистости, допускаемой отраслевыми стандартами. Экспериментальные данные по этому вопросу отсутствуют. Поэтому осевое сжатие при гибке занижают либо вообще не применяют, а проблему утонения решают завышением исходной толщины стенки трубы.

Ситуацию усугубляет статическая неопределимость продольной сжимающей нагрузки. Будучи свойственна таким процессам как гибка отклоняющим роликом и не приводным водилом, она способствует волнообразованию. В окрестностях водила момент толкающей силы вызывает реверсивные деформации трубы при больших радиусах и углах гибки, вследствие чего их необходимо ограничивать.

В связи с этим разработка процессов гибки труб с осевым сжатием в пределах допустимого волнообразования является весьма актуальной темой исследования.

**Степень разработанности темы.** Отечественными и зарубежными исследователями (В.Д. Головлев, E. Corona, S. Kyriakides, X. Wang, J. Cao и др.) выполнялись решения задач устойчивости деформирования листовых и трубных заготовок. Однако высота волн не учитывалась при определении критериев потери устойчивости, основанном на классических положениях теории оболочек и пластинок. Зависимости критического радиуса гибки от диаметра  $d$  и толщины стенки  $t$  трубы, полученные различными авторами, плохо согласуются между собой. Экспериментальные исследования в этой области немногочисленны и проводились на образцах, сильно отличающихся отношением  $d/t$  от реальных трубопроводов.

**Цель диссертационной работы** – улучшение качества изогнутых заготовок трубопроводов по показателям утонения стенки и овальности сечений посредством осевого сжатия зоны гибки в пределах допустимого волнообразования.

**Объект исследования** – пластический изгиб трубы моментом с развивающейся волнистостью в области сжатия, а также технологический изгиб проталкиванием через зону деформирования, ограниченную не приводным водилом либо отклоняющим роликом.

**Предметом исследования** являются параметры технологического процесса и изделия: проталкивающая сила и подача трубы в зону гибки, деформированное состояние изогнутого участка, показатели его волнистости и утонения.

**Задачи исследования:**

1. Создать математическую модель изгиба трубы моментом с монотонным развитием волнистости в области сжатия, а также методику ее практического использования для оценки высоты слабо выраженных волн.

2. Выполнить теоретический анализ холодной гибки труб не приводным водилом с определением допустимых углов его поворота, ограниченных реверсом деформаций.

3. Разработать методику инженерного расчета осевой силы и подачи при гибке труб проталкиванием через зону деформирования;

4. Разработать методику проектирования процессов гибки труб с осевым сжатием и усовершенствовать их техническое оснащение.

**Научная новизна работы:**

1. Впервые разработана математическая модель слабовыраженного волнообразования при гибке трубы моментом основанная на условии равенства значений полной потенциальной энергии при наличии волнообразования и в его отсутствии, позволяющая выполнить расчет высоты волны и относительного смещения нейтральной поверхности.

2. Впервые аналитически решена задача статической неопределимости гибки трубы моментом, с зоной деформирования стесненной положением отклоняющего ролика или не приводным водилом, путем применения: аппроксимации формы оси изогнутой трубы; равенства моментов внутренних сил; баланса внешних и внутренних работ, позволяющая определять силы и предельные углы гибки.

3. Разработана научно обоснованная методика инженерного расчета при гибке отклоняющим роликом и водилом с аппроксимацией изогнутого участка трубы, параметры которого подсчитываются из условия минимума работ внутренних сил, позволяющая получать требуемую форму изогнутой трубы за счет регулировки наклона зажима относительно поворотного звена водила.

4. Разработана научно обоснованная методика проектирования технологических процессов гибки труб с осевым сжатием, учитывающая ограничения волнообразования согласно техническим требованиям к трубопроводам, а также предельно допустимые реверсивные деформации в окрестностях замка копира, позволяющая улучшить качество изогнутых заготовок трубопроводов по показателям утонения стенки и овальности сечений.

**Теоретическая значимость работы.**

Разработанная математическая модель слабовыраженного волнообразования при изгибе трубы моментом на основе условия равенства

значений полной потенциальной энергии при наличии волнообразования и в его отсутствие, и аналитическое решение задачи статически неопределимого равновесия трубы изгибаемой водилом на основе аппроксимации формы ее оси и равенства моментов внутренних сил вносят вклад в теорию гибки труб, а также могут быть использованы при разработке расчетных методик проектирования оборудования и технологических процессов гибки труб.

#### **Практическая значимость работы.**

Разработана научно обоснованная методика расчета подачи трубы и проталкивающей силы при гибке водилом, применимая в инженерных расчетах гибки трубы с фиксированными параметрами или по заданным габаритам изогнутого участка трубы при проектировании и эксплуатации трубогибного оборудования.

Разработана методика проектирования технологических процессов гибки труб проталкиванием через зону деформирования или наматыванием на копир с осевым сжатием, учитывающая ограничения волнообразования согласно техническим требованиям к трубопроводам.

#### **Методология и методы исследования.**

Все исследования осуществлялись на основе системного подхода. Результаты одних исследований становились базой для других. В теоретических исследованиях использовались математическое моделирование процессов на основе инженерной теории пластичности и энергетических методов с применением аппроксимации формы волны и изогнутой оси трубы. Расчеты производились в программе MathCAD 15 методом последовательных приближений. Опытная гибка производилась на лабораторной установке с непосредственным измерением высоты и шага волнистости.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- математическая модель изгиба трубы моментом со смещением нейтральной поверхности, вызванным влиянием слабовыраженной волнистости на сопротивление изгибу, включающая аппроксимацию формы волны и разрешающее условие равенства значений полной потенциальной энергии при наличии волнообразования и в его отсутствие;

- применение метода баланса работ внутренних и внешних сил для определения силы, проталкивающей трубу через зону деформирования, в процессах гибки отклоняющим роликом и не приводным водилом;

- теоретический анализ холодной гибки трубы водилом с аппроксимацией формы оси, удовлетворяющей равенству моментов внутренних и внешних сил в окрестностях водила, а также на выходе из направляющих роликов;

- предельно допустимые углы гибки водилом, соответствующие возникновению деформаций разгрузки и превышению ими предельных упругих значений;

- методика инженерных расчетов толкающей силы и подачи трубы при гибке водилом с аппроксимацией формы изогнутой оси дугой окружности или двумя дугами с определением их угловых размеров из условия минимума энергии деформирования.

**Достоверность полученных результатов** обеспечена:

- применением фундаментального энергетического подхода в теоретическом анализе изгиба труб с образованием волнистости;
- привязкой функций, аппроксимирующих форму волнистости свободно изгибаемой трубы и ее оси, к условиям статического равновесия и минимума работы деформирования;
- приближением рассчитанной высоты волнистости к предельно допустимой при радиусах гибки тонкостенных труб на радиус порядка трех диаметров, что согласуется с практическим опытом и экспериментом.
- обработкой данных эксперимента методом математической статистики.

**Апробация работы.** Результаты диссертации докладывались на международных научно-практических конференциях: «Технические науки – от теории к практике», Новосибирск, 2016, «Фундаментальные основы механики», Новокузнецк, 2016, «Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке» Новосибирск, 2019, а также на научных семинарах.

**Реализация работы.** Результаты выполненных исследований внедрены в учебный процесс по направлениям «Машиностроение», «Автоматизация технологических процессов и производств», «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств» при подготовке бакалавров и магистров.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 8 трудов, в том числе 5 статей в рецензируемых изданиях перечня ВАК; получен 1 патент Российской Федерации на изобретение.

**Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, библиографического списка. Текст диссертации изложен на 118 страницах машинописного текста, иллюстрирована 41 рисунком, содержит 7 таблиц. Библиографический список включает 53 наименования.

*Работа выполнялась в продолжение исследований по проекту № 2488 «Метод вариационных оценок деформаций пластического изгиба труб» аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2011 годы)”.*

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Раздел 1** содержит аналитический обзор схем гибки труб с продольным сжатием, а также теоретических и экспериментальных исследований потери устойчивости при деформировании абстрактных (оболочки) и реальных (листовые и трубные заготовки) объектов.

**В разделе 2** выполнено математическое моделирование пластического изгиба трубы моментом с монотонно возрастающей волнистостью стенки. Ему предшествовало принятие гипотезы о зарождении волн в самом начале изгиба и их монотонном росте до нарушения устойчивости процесса.

Форму волны аппроксимирует функция радиального перемещения точек срединной поверхности трубы  $u_r = \frac{-h}{2} \left( \cos \frac{\varphi}{\varphi_1} \pi + 1 \right) \sin^2 \alpha$ , рисунок 1.

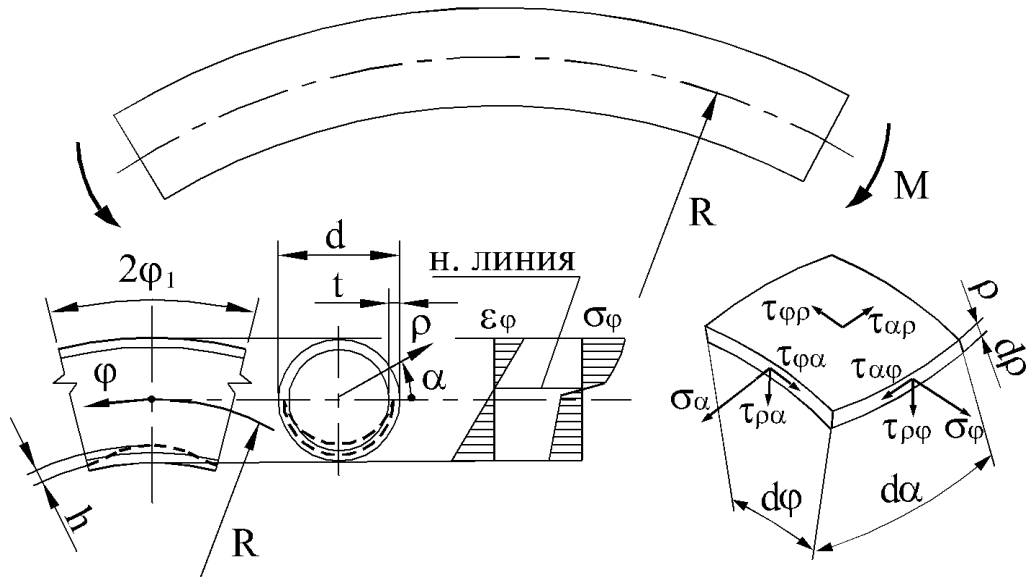


Рисунок 1 – Схема изгиба моментом, форма волны (пунктир) и элемент области волнообразования

Относительное изменение длины материального волокна

$$\varepsilon_\varphi = \frac{\rho \sin \alpha}{R} + (\rho - r) \Delta \zeta + \varepsilon_0, \quad (1)$$

где  $\Delta \zeta$  – изменение продольной кривизны срединной поверхности стенки в диапазоне  $\pi < \alpha < 2\pi$ , принятое равным  $d^2 u_r / (R d\varphi)^2$ . Компонент  $\Delta \zeta$  сообщает деформации  $\varepsilon_\varphi$  переменный характер в направлении  $\varphi$ , поэтому эпюры адекватны состоянию трубы лишь в сечениях с нулевым значением  $\Delta \zeta$  – тех, что проходят через точки перегиба пунктирной линии. Волнистость стенки трубы уменьшает абсолютную величину равнодействующей отрицательных напряжений  $\sigma_\varphi$ , смещение нейтральной линии на рисунке соответствует условию

$$\int_0^{\varphi_1} \int_F \sigma_\varphi dF d\varphi = 0. \quad (2)$$

Интегрирование выполняется по исходной площади  $F$  поперечных сечений, угловой размер полуволны  $\varphi_1$  принимали равным  $\sqrt{td}/R$  согласно опубликованным данным экспериментальных исследований<sup>1</sup>.

$$\text{Исходя из } \sigma_\rho = 0 \text{ и } \varepsilon_\alpha = -0,5\varepsilon_\varphi, \quad \sigma_\varphi = \sigma_s \varepsilon_\varphi \left[ \varepsilon_\varphi^2 + \frac{1}{3} (\gamma_{\rho\alpha}^2 + \gamma_{\alpha\varphi}^2 + \gamma_{\varphi\rho}^2) \right]^{-0,5}.$$

Степенную функцию напряжения текучести  $\sigma_s = A\varepsilon_i^n$  применяли ко всему объему полуволны  $V$ . Ему соответствует работа внутренних и внешних сил с учетом волнообразования

$$\tilde{U} = A \int_V \varepsilon_i^{n+1} dV; \quad \tilde{W} = A \varphi_1 \int_F \varepsilon_i^n \rho \sin \alpha dF.$$

<sup>1</sup> Kyriakides S. and Ju G.T. Bifurcation and Localization Instabilities in Cylindrical Shells under Bending. Part 1: Experiments / Int. J. Solids Struct. 29, 1117. 1992.

В отсутствие волн они одинаковы: 
$$U = W = 2A\varphi_1 \int_{F/2} \frac{(\rho \sin \alpha)^{n+1}}{R^n} dF,$$

$F/2$  – половина площади сечения трубы с неотрицательными синусами.

Высота волны  $h$  при  $\alpha = 1,5\pi$  определяется, исходя из одинаковых значений полной потенциальной энергии  $\Pi$  при наличии волнообразования и в его отсутствие:

$$\tilde{U} + \tilde{W} = U + W. \quad (3)$$

При этом величина  $\varepsilon_0$  формулы (1) обеспечивает соблюдение условия (2). Вычисления выполняли в программе MathCAD методом последовательных приближений, обозначая функциями  $\gamma_{\rho\alpha}(\rho, \alpha, \varphi)$ ,  $\gamma_{\alpha\varphi}(\rho, \alpha, \varphi)$ ,  $\gamma_{\varphi\rho}(\rho, \alpha, \varphi)$  громоздкие выражения деформаций сдвига, полученные интегрированием формул деформаций с учетом условия постоянства объема  $\varepsilon_\rho + \varepsilon_\alpha + \varepsilon_\varphi = 0$ .

Графики на рисунке 2 иллюстрируют рассчитанную волнистость труб из нержавеющей стали 1X18Н10Т с толщиной стенки  $t = 0,5$  мм, показатель степени функции  $\sigma_s$  для данного вида материала:  $n = 0,239$ . Горизонтальной линией показана высота волнистости допустимая отраслевыми стандартами.

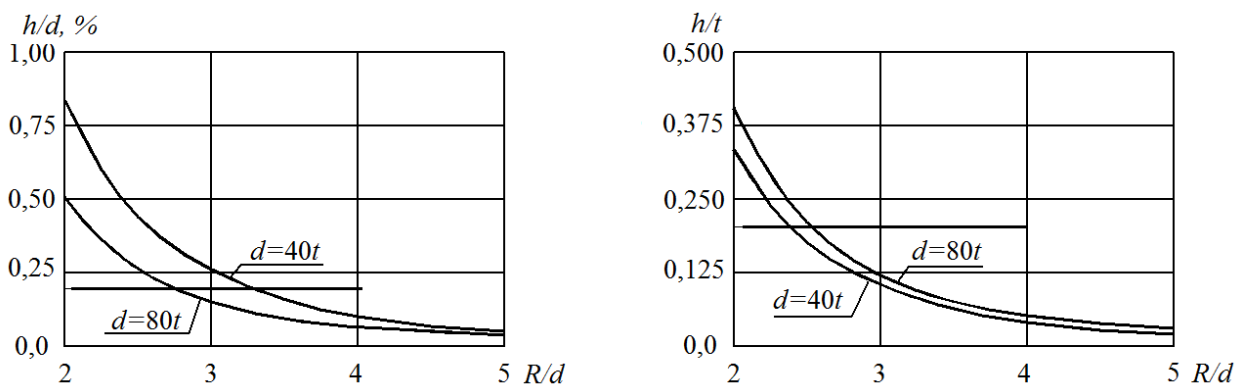


Рисунок 2 – Зависимость высоты волн от радиуса гибки

Нагружение изгибаемых заготовок осевой сжимающей силой  $N_0$  усиливает волнообразование. Ее значение вводили в правую часть условия (2). Пример расчета высоты волн на рисунке 3 относится к гибке труб из алюминиевого сплава Д16М с размерами  $d = 30$  мм;  $t = 1,8$  мм на радиус  $R = 120$  мм; константы функции  $\sigma_s$ :  $A = 365$  МПа;  $n = 0,236$ .

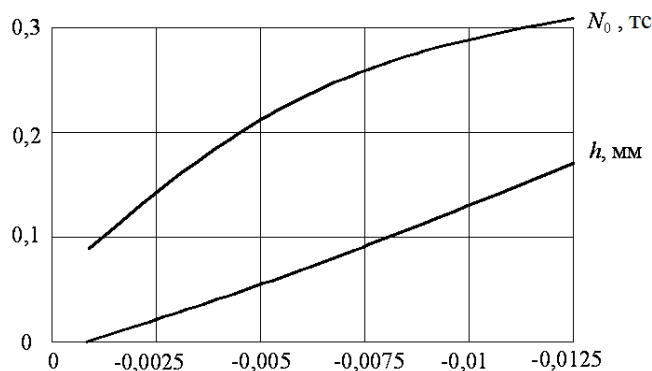


Рисунок 3 – Зависимость высоты волн и продольной силы  $N_0$  от относительного сжатия  $\varepsilon_0$  оси изгибаемой трубы

Из сопоставления этих графиков следует, что зависимость высоты волн от осевой сжимающей силы близка к линейной. Значение  $\varepsilon_0$  известно при фиксированном перемещении заготовок в зону наматывания на круглый копир. Для этого их закрепляют на ползуне,



которому сообщают поступательное перемещение, превышающее длину оси изгибаемого участка. В других случаях известно или подлежит расчету нагружение трубы толкающей силой. Методика сравнительной оценки высоты волн  $h$  сводится к простой вычислительной процедуре без применения последовательных приближений. В состав исходных данных вводится допустимое значение  $h$  и подсчитывается полная потенциальная энергия деформирования с волнообразованием  $\tilde{\Pi}$ . Если она оказывается больше альтернативного значения  $\Pi$ , значит прогнозируемая высота волн меньше допустимой, и проектируемый технологический процесс может быть реализован.

**Раздел 3** посвящен теории и расчетам процессов гибки труб толкающей силой. Схема, показанная на рисунке 4, применяется при больших относительных радиусах изогнутой оси. В зоне 0-1 кривизна  $1/R$  изменяется от нуля до максимального значения  $1/R_1$  в точке 1. Радиус  $R_1$  связан с остаточным радиусом  $R_{ост}$  соотношением

$$\frac{1}{R_{ост}} = \frac{1}{R_1} + \Delta\xi, \text{ где } \Delta\xi = \frac{-M_1}{EJ} \dots$$

Пренебрегая смещением нейтральной поверхности деформаций, выражаем моменты напряжений гибки

$$M = \frac{2A}{R^n} \int_{F/2} (\rho \sin \alpha)^{n+1} dF. \quad (4)$$

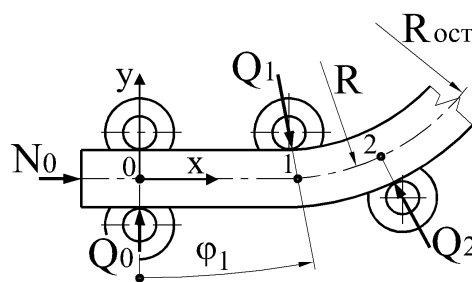


Рисунок 4 – Схема гибки отклоняющим роликом

Уменьшение внешнего момента на участке 1-2 сопровождается приращениями деформаций:  $\Delta\varepsilon_\varphi = \rho \sin \alpha \Delta\xi$ . Им соответствуют остаточные напряжения  $\sigma_{ост} = \pm A |\rho \sin \alpha / R_1|^n + E \Delta\varepsilon_\varphi$ . Перемещение трубы толкающей силой  $N_0$  на некоторое расстояние  $\Delta L$  сопровождается работой момента  $M_1$  на угловом перемещении  $\Delta\varphi = \Delta L / R_1$ . Часть энергии деформирования возвращается при разгрузке, из баланса работ следует:  $N_0 = M_1 / R_{ост}$ .

Аналогичное определение силы  $N_0$  при гибке водилом осложняется статической неопределимостью силовых параметров на рисунке 5.

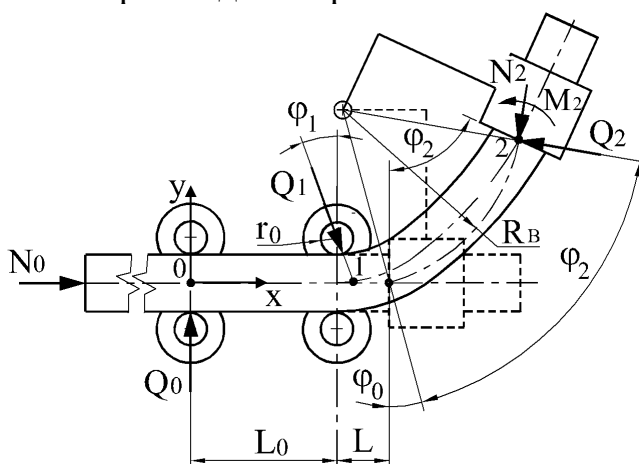


Рисунок 5 – Схема гибки не приводным водилом

Холодная гибка труб с применением водила более выгодна, чем наматывание на копир, при изготовлении трубопроводов большого диаметра. Ее дополнительным преимуществом является осевое сжатие трубы, уменьшающее абсолютную величину утонения стенки  $\Delta t$ .

На отрезке оси 0-1 кривизна оси  $1/R = d^2y/dx^2$ , внешний момент  $M = M_1x/x_1$ , соотношение внутренних моментов согласно (4) равно  $(R_1/R)^n$ . Из равенства внешних и внутренних моментов следует:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{x^{m+1}}{(m+1)R_1x_1^m}, \text{ где } m = 1/n; \varphi_1 = \frac{x_1}{(m+1)R_1}; x_1 = L_0 + \left(r_0 + \frac{d}{2}\right)\varphi_1.$$

Аппроксимирующая зависимость радиуса оси на участке 1-2 от угла  $\varphi$  поворота сечений трубы:

$$R(\varphi) = R_1 + p \left( \frac{\varphi - \varphi_1}{\varphi_2 - \varphi_1} \right) + q \ln \frac{\varphi}{\varphi_1}. \quad (5)$$

Параметры  $p$  и  $q$  определяются из уравнений:

$$x_2 = x_1 + \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} R(\varphi) \cos \varphi d\varphi; \quad y_2 = y_1 + \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} R(\varphi) \sin \varphi d\varphi,$$

где  $x_2 = L + L_0 + R_B(\sin(\varphi_2 + \varphi_0) - \sin \varphi_0)$ ;  $y_2 = R_B(\cos \varphi_0 - \cos(\varphi_2 + \varphi_0))$ .

Значение радиуса  $R_1$  оси трубы в точке 1 подбираем из условия равенства внешнего момента  $M_2$  интегралу (4), где согласно функции (5)

$$R = R_1 + p + q \ln \frac{\varphi}{\varphi_1}. \text{ Имея значение } R_1, \text{ находим } Q_0 = M_1/L_0. \text{ В подборе участвует}$$

соотношение  $N_2 = M_2/R_B$  и уравнения равновесия:

$$\begin{aligned} Q_0 + Q_2 \cos(\varphi_0 + \varphi_2) &= Q_1 \cos \varphi_1 + N_2 \sin(\varphi_0 + \varphi_2); \\ Q_2 \sin(\varphi_0 + \varphi_2) + N_2 \cos(\varphi_0 + \varphi_2) &= N_0 + Q_1 \sin \varphi_1; \\ M_2 = Q_0 x_2 - N_0 y_2 - Q_1 [(x_2 - x_1) \cos \varphi_1 + (y_2 - y_1) \sin \varphi_1]. \end{aligned} \quad (6)$$

Силу  $N_0$  определяем, исходя из равенства ее работы на пути  $S$  энергии деформирования  $U$ , где

$$S = x_1 - L - L_0 + \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} R(\varphi) d\varphi; \quad U = 2A \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} d\varphi \int_{F/2} \frac{(\rho \sin \alpha)^{n+1}}{R(\varphi)^n} dF. \quad (7)$$

Внешний момент  $M_2$ , а также реакции  $Q_1$  и  $Q_2$  находим, решая систему (6).

Согласно расчетам с возрастающим углом гибки  $\varphi$  при некотором его значении  $\sim 60^\circ$  радиусы  $R_1$  и  $R_2$  переходят через минимум, что означает появление в окрестностях точки 2 разгрузки, вызванной увеличением плеча силы  $N_0$ . В дальнейших расчетах используются фиксированные минимальные значения  $R_1$  и  $R_2$ , а в условии равенства внешнего и внутреннего моментов в точке 2 последний выражается с учетом уменьшения кривизны оси  $\Delta \xi_2$  и напряжений разгрузки  $E \Delta \xi_2 \rho \sin \alpha$ . По мере увеличения угла гибки они

достигают предельных упругих значений при  $\Delta \xi_2 = -2 \left[ A \left( \frac{d}{2R_2} \right)^n + \sigma_{02} \right] (Ed)^{-1}$ , что

должно служить ограничением. Расчеты показывают, что при  $\varphi_2 \approx 120^\circ$  в окрестностях точки 2 появляются пластические деформации обратного знака.

Графики на рисунке 6 относятся к гибке трубы из стали 20 диаметром 300 мм, с толщиной стенки 5 мм, вылетом  $L = 250$  мм, параметры водила:  $R_B = 900$  мм;  $\varphi_0 = 11,5^\circ$ ; значения сил отнесены к величине  $\pi d t \sigma_{02}$ .

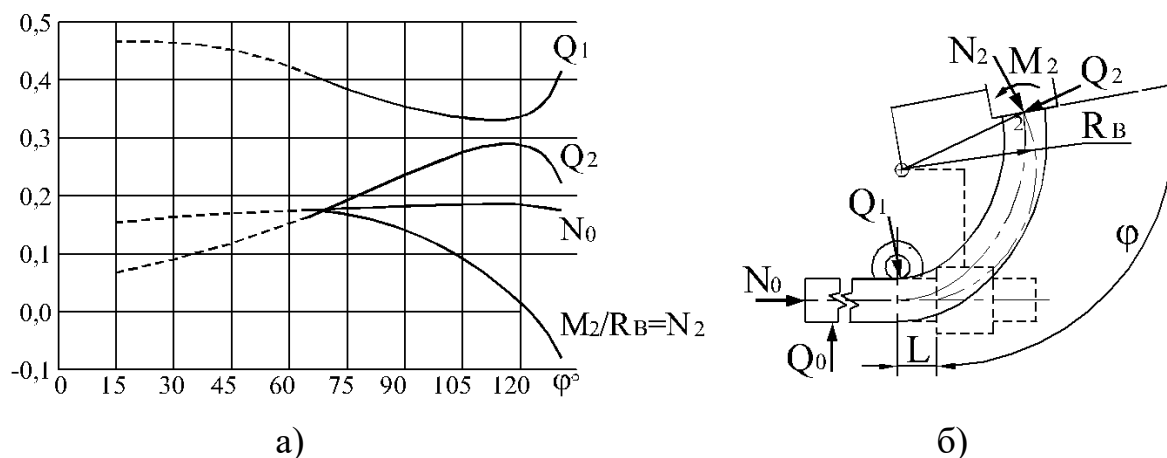


Рисунок 6 – Пример зависимостей относительных величин силовых параметров от угла гибки: а) график зависимостей, б) схема расположения сил.

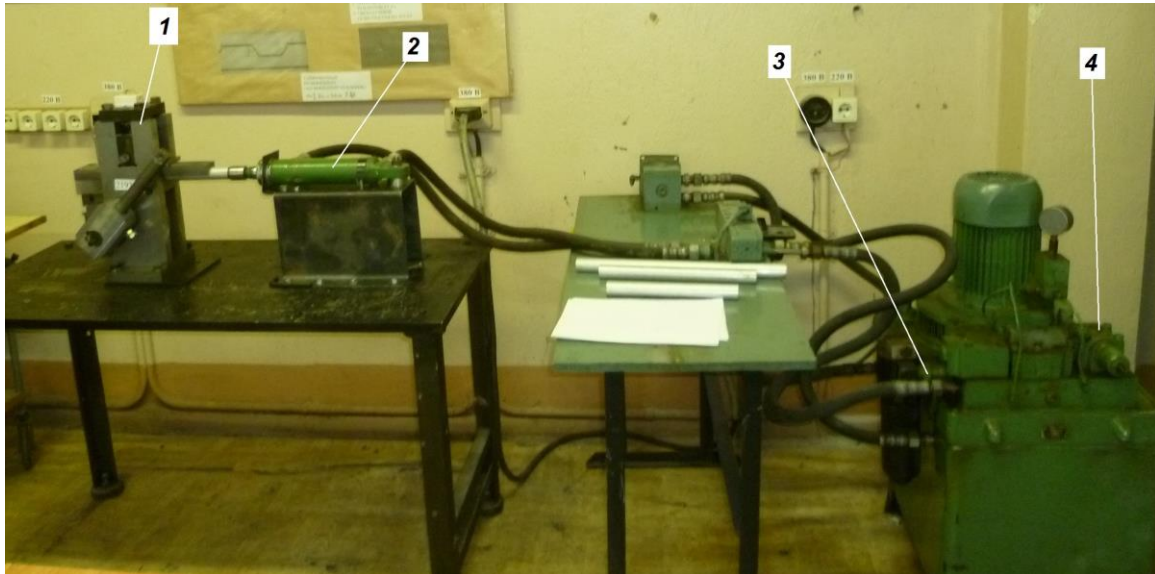
Пунктирные участки графиков относятся к стадии процесса до начала разгрузки, когда силы  $N_0$  и  $N_2$  были почти одинаковы. Затем осевое сжатие изгибаемого участка трубы становится неравномерным по длине и при  $\varphi \approx 120^\circ$  сила  $N_2$  и  $M_2$  меняют знаки.

**В разделе 4** представлена упрощенная методика инженерных расчетов гибки водилом. Изогнутая ось трубы заменяется дугой окружности или двумя дугами радиусов  $R_1$  и  $R_2$ , их угловые размеры определяются из условия минимума энергии деформирования. Расчет толкающей силы  $N_0$  аналогичен предыдущему и завышает, по сравнению с ним, выходные значения примерно на 10%. на величине подачи  $S$  согласно (7) упрощения формы изогнутой оси сказываются мало.

В расчете утонения стенки трубы учитывается смещение нейтральной линии относительно центра сечений. Принято соотношение деформаций:  $\varepsilon_p = -0,5\varepsilon_\varphi$ , как при изгибе моментом, близком к рассматриваемой схеме. Получена близкая к линейной зависимость минимальной толщины стенки от силы осевого сжатия.

**Раздел 5** содержит разработки по реализации процессов гибки с осевым сжатием. Приведено описание экспериментальной гибки труб по схеме наматывания на копир с дополнительным нагружением толкающей силой. Заготовками служили трубы из алюминиевого сплава Д16М с размерами:  $d = 30$  мм,  $t = 2$  мм, радиус гибки 120 мм, угол  $45^\circ$ .

Осевое усилие варьировали, меняя давление в гидросистеме, которое определяли по показаниям манометра гидростанции. Гибку проводили при 4-х уровнях давления в гидросистеме и изгибали контрольные образцы без применения осевого сжатия, рисунок 7.

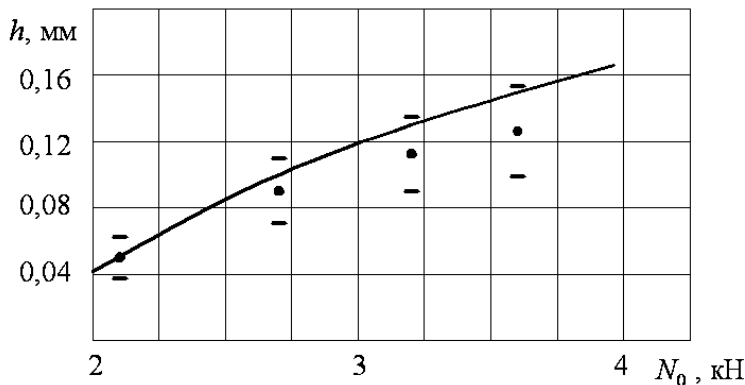


**Рисунок 7 – Фотография модернизированной экспериментальной установки:**  
 1 – узел гибки; 2 – гидроцилиндр толкающего действия; 3 – гидростанция; 4 – регулятор давления

Высота волн измерялась для каждой серии опытов, на пяти образцах, непосредственным измерением штангенциркулем и рассчитывалась по формуле

$$h_i = H_{i,\max} - H_{i,\min}$$

Рисунок 8 иллюстрирует результаты обработки данных эксперимента.



**Рисунок 8 – График зависимости высоты волн  $h$ , мм от силы сжатия**

Экспериментальные данные (отмечены точками, с доверительными интервалами) адекватны полученной ранее расчетной зависимости показанной сплошной линией, ее убывающая производная свидетельствует об устойчивости процесса.

Шаг волнообразования  $\lambda$  на вогнутой стороне трубы составил примерно 11,5 мм, а в пересчете на нейтральную поверхность, где он не зависит от радиуса оси, около 13 мм. В расчетах, согласно принятой формуле  $\lambda = 2\sqrt{td} = 14,7$  мм, т.е. на 11% больше.

Минимальную толщину стенок образцов определяли в области наиболее растянутых волокон, исходя из равенства нулю суммы логарифмических деформаций, две из которых находили путем измерения размеров деформированной сетки на инструментальном микроскопе.

По сравнению с изгибом без осевого сжатия достигнуто более чем двадцатипроцентное уменьшение утонения стенки, рисунок 9.

Уменьшение высоты сечений составило 1,8 мм, в 1,5 раза меньше, чем в отсутствие осевой нагрузки. Эксперименты показывают, что наличие осевой силы приводит к появлению волн, не превышающих допустимых значений, в то же время уменьшают показатель разностенности изогнутых труб.

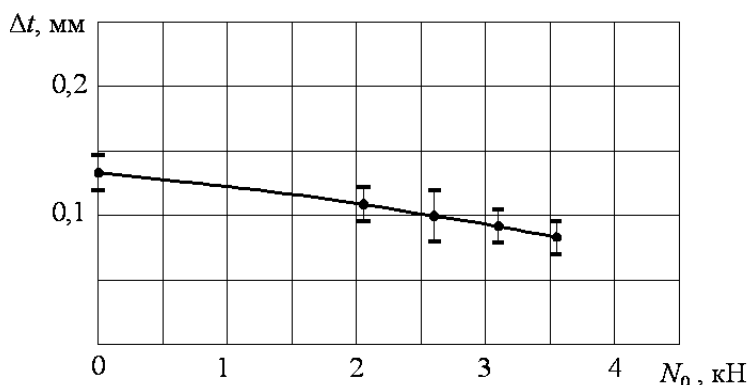


Рисунок 9 – График зависимости утонения стенки  $\Delta t$ , мм от осевой силы  $N_0$ , кН

Реверсивные пластические деформации труб при больших углах поворота копира предотвращает разработанное устройство, защищенное патентом РФ № 2673695 от 03.05.2017.

Разработана методика проектирования технологических процессов гибки труб проталкиванием через зону деформирования или наматыванием на копир с осевым сжатием, включающая практические приложения теоретических исследований, содержащихся в разделах 2 – 4.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение **задачи**, имеющей существенное значение для теории и практики гибки труб – повышение качества изогнутых участков трубопроводов за счет их нагружения сжимающими силами при гибке водилом и отклоняющим роликом и контроля слабовыраженного волнообразования.

В процессе теоретических и экспериментальных исследований получены **следующие основные результаты и сделаны выводы:**

1. Отсутствие методик расчета высоты волн, нередко наблюдаемых при гибке труб, является серьезным пробелом в инженерной практике, не восполняемым теорией бифуркации оболочек, которая трактует процесс волнообразования как мембранный эффект без его количественной оценки. Это относится и к опубликованным экспериментальным данным потери устойчивости, регистрирующим коллапс труб в условиях изгиба, несопоставимых с производственными.

2. В соответствии с концепцией процесса изгиба трубы моментом и одновременного развития волнообразования в области сжатия, разработана его математическая модель, в которой наряду с основной схемой фигурирует альтернативная – без волнистости, с меньшей энергией деформирования и бóльшим сопротивлением изгибу; искомой высоте волн соответствуют одинаковые значения полной потенциальной энергии в обоих вариантах.

3. Высота волн, рассчитанная по разработанной методике, находится в прямой зависимости от диаметра трубы  $d$  и обратной – от радиуса оси  $R$ ; ее максимальное значение в плоскости симметрии изогнутой трубы стремится (при гибке без приложения продольной сжимающей силы) к  $\frac{1}{2}$  толщины стенки

$t$  по мере приближения  $d/t$  к ста и  $R/d$  к двум, выходя за пределы, допускаемые отраслевыми техническими требованиями.

4. На основе разработанной математической модели предложена методика сравнительной оценки прогнозируемой высоты волн (по принципу – больше или меньше допустимой), которая сводится к простой вычислительной процедуре и может использоваться при проектировании технологических процессов гибки труб водилом, сходных с изгибом моментом.

5. Приложение осевого сжатия к изгибаемой трубе увеличивает высоту волн в линейной зависимости от сжимающей силы, которая обеспечивает проталкивание заготовок через зону деформирования отклоняющим роликом или водилом, а также может специально возбуждаться для улучшения показателей овальности сечений и утонения стенки.

6. В отличие от схемы с неподвижным отклоняющим роликом, водило приводится в движение изгибаемым участком трубы неизвестной формы и длины; для комплексного расчета кинематики и статики процесса разработана аппроксимация кривизны изогнутой оси, основанная на равенстве внешних и внутренних моментов в окрестностях водила, а также на выходе из направляющих роликов.

7. Сила, проталкивающая трубу через зону гибки, определяется, исходя из ее работы на перемещении (подаче), учитывающей принятую функцию кривизны оси; в качестве эквивалента выступает энергия пластического деформирования за вычетом разгрузки, которая начинается в окрестностях водила при углах его поворота  $\varphi \approx 60^\circ$ , а при  $\varphi \approx 120^\circ$  реверсивные деформации переходят через предельные упругие значения.

8. Разработана методика расчета подачи трубы и толкающей силы при гибке с фиксированными параметрами водила или с их определением по заданным габаритам изогнутого участка, основанная на приближенном представлении изогнутой оси дугой окружности или двумя сопрягающимися дугами, углы которых подсчитываются из условия минимальной работы внутренних сил.

9. Разработанные расчетные методики и установленная зависимость утонения стенки изогнутой трубы от осевого сжатия объединены методикой проектирования технологических процессов гибки проталкивающей силой или наматыванием на копир с осевым сжатием, которая учитывает волнообразование, утонение стенки и овальность сечений согласно техническим требованиям к трубопроводам, а также предельно допустимые реверсивные деформации, вызванные сжимающей силой, и обеспечивает получение качественных заготовок трубопроводов.

10. Опробование осевого сжатия трубы, наматываемой на копир, в лабораторных условиях позволило уменьшить в 1,5 раза овальность сечений изогнутого участка на образцах с полученной слабовыраженной волнистостью, допускаемой отраслевыми техническими условиями; для предотвращения реверсивных пластических деформаций при больших углах поворота копира разработано устройство, защищенное патентом РФ.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **а) публикации в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов для опубликования основных научных результатов диссертации**

1. Зайцев, А.И. Свободный изгиб трубы моментом / С.И.Вдовин, А.И.Зайцев, В.Н.Михайлов // «Фундаментальные проблемы техники и технологии». – 2016. – №5. – С. 77-79.
2. Зайцев, А.И. Стесненный изгиб трубы моментом / С.И.Вдовин, А.И.Зайцев, В.Н.Михайлов // «Фундаментальные проблемы техники и технологии». – 2016. – №6. – С. 82-86.
3. Зайцев, А.И. Расчет изгиба трубы с деформируемым сечением/ С.И.Вдовин, А.И.Зайцев // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2017, № 5. – С. 10-15.
4. Зайцев, А.И. Математическое моделирование волнообразования при гибке труб / С.И.Вдовин, А.И.Зайцев, Н.В.Татарченков // «Фундаментальные проблемы техники и технологии». – 2018. – №1. – С. 62-65.
5. Зайцев, А.И. Математическое моделирование и расчет гибки труб неприводным водилом // «Фундаментальные проблемы техники и технологии». – 2019. – №1. – С. 62-65.

### **б) статьи в сборниках материалов научных конференций**

6. Зайцев, А.И. Свободный изгиб трубы моментом / С.И.Вдовин, А.И.Зайцев, К.С.Лунин // Технические науки – от теории к практике / Сб. статей по материалам LXIII междунар. науч.–практ. конф. – №10 (58). Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2016. С. 80-84.
7. Зайцев, А.И. Стесненный изгиб трубы моментом / С.И.Вдовин, А.И.Зайцев, К.С.Лунин // Фундаментальные основы механики: Материалы международной научно–практической конференции. Новокузнецк: НИЦМС, 2016. – №1. С. 98-101.
8. Зайцев, А.И. Расчет гибки трубы толкающей силой не приводным водилом // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке / Сб. статей по материалам XXXII-XXXIII междунар. Науч.-практ. Конф. № 2-3 Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2019. С. 25-32.

### **Патенты**

1. Пат. 2673695 Российская Федерация, МПК В21Н1/22. Устройство для гибки труб [Текст] / Вдовин С.И., Зайцев А.И., Борзенков М.И.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК». - № 2017115593; Заявл. 03.05.2017; опубл. 29.11.2018, Бюл. № 34