

На правах рукописи

ДОРОФЕЕВ

Евгений Викторович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОТЕРИ
НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПРИ СМЯТИИ
ДЛИННОМЕРНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК**

05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тюмень – 2012

Работа выполнена на кафедре «Прикладная механика» ФГБОУ ВПО Тюменского государственного нефтегазового университета

Научный руководитель: **Якубовский Юрий Евгеньевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО Тюменский государственный
нефтегазовый университет

Официальные оппоненты: **Мальцева Татьяна Владимировна**,
доктор физико-математических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО Тюменский государственный
университет

Карпенко Юрий Иванович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВПО Тюменский государственный
архитектурно-строительный университет

Ведущая организация: ФГБУН Научно-инженерный центр «Надежность и ресурс больших систем и машин» УрО РАН, г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится 30 мая 2012 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.274.14 при Тюменском государственном университете по адресу 625003, г. Тюмень, ул. Перекопская, 15А, ауд. 410.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тюменского государственного университета.

Автореферат разослан « ___ » апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Ступников Андрей Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

В качестве длинномерных цилиндрических оболочек рассматриваются магистральные, коммунально-сетевые, технологические трубопроводы и обсадные колонны. Последние представляют собой металлические обсадные трубы, скрепленные между собой и спущенные в скважину с целью крепления ее стенок. Все перечисленные конструкции широко применяются в промышленности.

Практикой эксплуатации данных объектов установлено, что одним из основных осложнений, связанных с потерей несущей способности, имеет место их смятие. Одной из главных причин смятия является образование зон неравномерного давления на стенки длинномерной цилиндрической конструкции. Это имеет место при ремонтных работах на магистральных трубопроводах, при прокладке однопролетных переходов через овраги, реки и другие препятствия, при строительстве обсадных колонн в условиях кавернообразования в стенках скважины. Поэтому вопросы исследования напряженно-деформированного состояния длинномерных цилиндрических конструкций с целью изучения влияния различных факторов на процесс их смятия имеют весьма актуальное значение.

Разработка комплекса методик расчета на прочность исследуемых длинномерных цилиндрических конструкций в условиях неравномерного наружного давления направлена на создание методического обеспечения для мониторинга несущей способности исследуемого объекта в целях повышения безопасности строительства и эксплуатации опасных производственных объектов. При рассмотрении данного вопроса на примере обсадных колонн были получены результаты, позволяющие оценить условия работы, ведущие к смятию длинномерных цилиндрических оболочек.

Цель работы заключается в разработке методологии моделирования потери несущей способности при смятии длинномерной цилиндрической оболочки в условиях неравномерного наружного давления на ее поверхность.

Задачи исследования:

- оценить и проанализировать условия работы, ведущие к смятию длинномерной цилиндрической оболочки, а также выдвинуть гипотезы решения данной проблемы;
- построить математическую модель деформирования участка длинномерной цилиндрической оболочки в условиях неравномерного наружного давления на ее поверхность;
- разработать метод расчета и комплекс программ для оценки напряженно-деформированного состояния, а также уровня нагрузок, приводящих к смятию длинномерной цилиндрической оболочки в условиях неравномерного наружного давления на ее поверхность;
- выделить параметры, определяющие смятие длинномерной цилиндрической оболочки в условиях неравномерного наружного давления на ее поверхность, и разработать рекомендации по обеспечению прочности исследуемых объектов.

Объект исследования – участок длинномерной цилиндрической оболочки в условиях неравномерного наружного давления на ее поверхность.

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние участка длинномерной цилиндрической оболочки.

В качестве **метода исследования** используются методы математического моделирования, включающие в себя: математическую формулировку задачи, построение эффективного численного алгоритма решения, программную реализацию алгоритма, проведение расчетов и анализ полученных результатов.

На защиту выносятся следующие оригинальные результаты, соответствующие трем пунктам паспорта специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ по техническим наукам».

Пункт 2. Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей.

В рамках развития приближенных методов решения задач продольно-поперечного изгиба балки на неоднородном упругом основании предложена схема, в соответствии с которой различаются расчетный и исследуемый участки. За счет значительного увеличения длины расчетного участка влияние формулируемых краевых условий на полученные результаты по исследуемой длине длинномерной цилиндрической оболочки ослабевает.

С использованием общих принципов полубезмоментной теории цилиндрических оболочек В.З. Власова записаны дифференциальные уравнения с применением интегральных характеристик жесткости. В решении этих уравнений учитываются краевые условия, полученные из рассмотрения продольно-поперечного изгиба балки на упругом основании.

Пункт 3. Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий.

В рамках развития численных методов для данного типа задач проведены исследования одного из приближенных методов – метода конечных разностей. На ряде частных задач проведено сравнение полученных результатов с результатами точных решений. Рассмотрена оценка устойчивости решения задач в соответствии с работами А.А. Самарского. Исследования проводились на примере расчета как теории продольно-поперечного изгиба балок, так и на теории цилиндрических оболочек с применением компьютерных технологий.

Пункт 4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

В данной области был создан комплекс программ в среде Matlab, предназначенный для расчета напряженно-деформированного состояния длинномерной цилиндрической оболочки при неравномерном распределении давления на ее поверхность. Данный комплекс программ базируется на трех модулях. В первом определяются продольные напряжения исследуемой конструкции (теория продольно-поперечного изгиба), во втором, используя

результаты первого блока, вычисляются окружные напряжения (полубезмоментная теория цилиндрических оболочек), а в третьем, используя результаты первых двух модулей, решается обратная задача – определение предельного давления, когда происходит потеря несущей способности исследуемой конструкции. На данный комплекс программ получено свидетельство о государственной регистрации.

Научная новизна заключается в следующем:

– построена математическая модель напряженно-деформированного состояния участка длинномерной цилиндрической оболочки в условиях неравномерного наружного давления на ее поверхность;

– разработаны методика расчета и комплекс программ, позволяющие моделировать условия нагружения, приводящие к смятию длинномерной цилиндрической оболочки в условиях неравномерного наружного давления на ее поверхность;

– выявлено влияние геометрических размеров и механических характеристик материалов длинномерной цилиндрической оболочки на ее напряженно-деформированное состояние;

– выделены значения параметров момента смятия длинномерной цилиндрической оболочки в условиях неравномерного наружного давления на ее поверхность. Даны рекомендации по увеличению несущей способности длинномерной цилиндрической оболочки.

Достоверность и обоснованность полученных результатов была подтверждена следующим путем:

1. На ряде частных задач проведено сравнение полученных результатов с результатами точных решений по теории изгиба балок и цилиндрических оболочек.

2. Определена внутренняя сходимость решения дифференциального уравнения в зависимости от количества узлов метода конечных разностей на исследуемом участке.

3. Проведены оценки устойчивости решения задач (в соответствии с работами А.А. Самарского).

Практическая ценность работы

Разработанная методика расчета деформирования участка длинномерной цилиндрической оболочки в условиях неравномерного наружного давления на ее поверхность может быть использована в проектных и научно-исследовательских организациях при проектировании и разработке современных технологий строительства магистральных, коммунально-сетевых, технологических трубопроводов, а также обсадных колонн при строительстве скважин.

Разработано прикладное программное обеспечение (свидетельство государственной регистрации программ для ЭВМ № 2011616279), даны рекомендации по совершенствованию технологии строительства в целях повышения прочности длинномерной цилиндрической оболочки в условиях неравномерного наружного давления на ее поверхность.

Результатом проведенных исследований является повышение надежности рассматриваемого объекта за счет прогноза прочности в условиях неравномерного наружного давления на его поверхность. Это позволяет предупреждать отказы, вызванные несоответствием нагрузок фактической прочности конструкции.

Апробация работы

Основные положения диссертации обсуждались и докладывались на межрегиональной научной конференции "Севергеоэкотех-2000" (г. Ухта: УГТУ, 2000 г.), на международной научно-практической конференции "Проблемы эксплуатации транспортных систем в суровых условиях" (г. Тюмень, 2001 г.), на III международной научно-технической конференции "Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте" (г. Самара, 2005 г.), на международной научно-технической конференции "Геотехнические и эксплуатационные проблемы нефтегазовой отрасли" (г. Тюмень, 2007 г.), на семинарах кафедры теоретической и прикладной

механики Тюменского государственного нефтегазового университета (2006 – 2012 гг.), на научных семинарах кафедры алгебры и математической логики Тюменского государственного университета (2011 г.).

Публикации

Основные положения работы опубликованы в 16 печатных работах, из которых три – в ведущих рецензируемых журналах, получено свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы составляет 147 страниц машинописного текста, 41 рисунков и 8 таблиц. Библиографический список литературных источников включает 119 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится обоснование актуальности выбранной темы, сформулированы цель работы и научная новизна, определена практическая ценность результатов исследований, а также сформулированы положения диссертации, выносимые на защиту.

В первом разделе сделан обзор литературы по исследуемой теме, отражены существующие положения, результаты, полученные различными авторами по вопросам, затронутым в диссертационной работе. Здесь рассмотрены основные направления развития теории расчета длинномерной цилиндрической оболочки, проведен анализ математических моделей, отмечается многообразие подходов к расчетам таких конструкций.

В работах российских и зарубежных ученых: С.В. Бояршинова, В.З. Власова, А.А. Гайворонского, С.Б. Гусейнова, Ю.А. Еремеева, А.А. Ильюшина, М.А. Колтунова, Г. Ламе, М. Леви, В.В. Новожилова, А.Р. Ржаницына, В.И. Самуля, А.П. Филина и других авторов рассмотрены вопросы оценки напряженно-деформированного состояния тонкостенных цилиндрических оболочек. В предлагаемой работе именно с позиций теории В.З. Власова рассмотрено определение окружных напряжений в длинномерной

цилиндрической оболочке. Вопросам устойчивости цилиндрических оболочек посвящены работы: В.И. Антипова, Ю.В. Булгакова, А.С. Вольмира, Т.Е. Еременко, Г.М. Саркисова, С.П. Тимошенко и других авторов.

В данном разделе сформулированы предпосылки для исследования закономерностей влияния неравномерного распределения давления на прочность конструкций, представляющих собой длинномерные цилиндрические оболочки. В соответствии с обзором литературы и поставленной целью были сформулированы задачи диссертационной работы.

Во втором разделе выделены условия работы длинномерной цилиндрической оболочки, факторы, влияющие на ее напряженно-деформированное состояние. В качестве примера длинномерной цилиндрической оболочки рассмотрен процесс смятия обсадной колонны при неравномерном давлении на ее поверхность. Действие неравномерной нагрузки ведет к выдавливанию исследуемого объекта в область с наименьшим давлением (рис. 1), вследствие чего в трубе возникают продольные и окружные напряжения. При достижении некоторой предельной величины этих напряжений происходит смятие длинномерной цилиндрической оболочки.

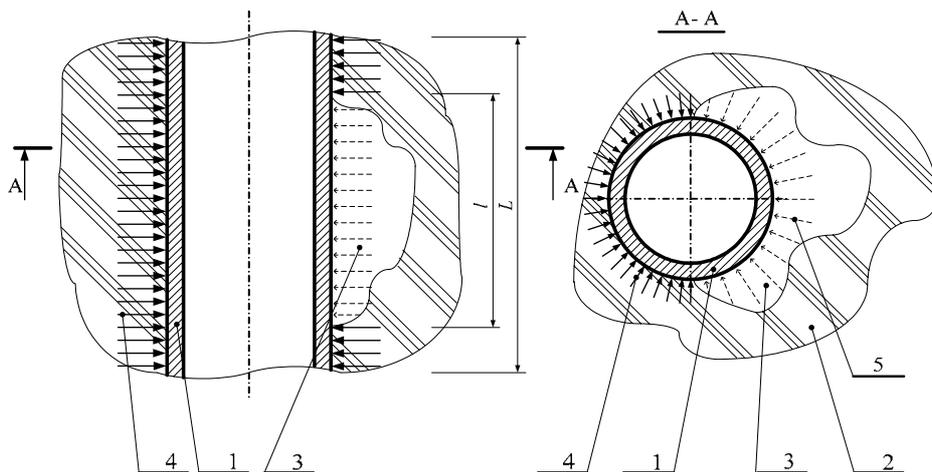


Рис. 1. Участок длинномерной цилиндрической оболочки в условиях неравномерного наружного давления на ее поверхность: 1 – длинномерная цилиндрическая оболочка; 2 – порода; 3 – зона образования неравномерного распределения давления; 4 – давление породы; 5 – давление жидкости;

L – длина расчетного участка; l – длина исследуемого участка

С учетом анализа обзора литературы и оценки условий работы, ведущих к смятию длинномерной цилиндрической оболочки, разработана структура решения данной задачи. Схема математического и компьютерного моделирования представлена на рисунке 2. В соответствии с этой схемой математическая модель, построенная для решения поставленных задач, основана на использовании теории изгиба балок и теории тонкостенных цилиндрических оболочек. Для реализации полученной модели был использован численный метод – метод конечных разностей. Методика расчета реализована в среде Matlab. Обоснование достоверности было сделано за счет сравнения результатов с частными решениями, рассмотрения внутренней сходимости и оценки устойчивости задачи. Для определения сминающего давления решалась обратная задача – задача устойчивости конструкции. Результаты, в свою очередь, сравнивались с известными решениями.



Рис. 2. Математическое и компьютерное моделирование уровня нагрузок

Участок длинномерной цилиндрической оболочки смоделирован как упругий стержень конечной длины, лежащий на упругом основании. При этом

общая расчетная длина участка длинномерной цилиндрической оболочки была принята равной трем длинам исследуемого участка (рис. 3 б, в). Это позволило уйти от влияния краевого эффекта на исследуемом участке (рис. 3) в зоне неравномерного наружного давления.

В качестве примера рассмотрен участок трубы, который деформируется под воздействием давления грунта и жидкости, продольной растягивающей силы $N(x)$ и реакции основания грунта (рис. 3 а).

Для расчета продольных напряжений было использовано дифференциальное уравнение продольно-поперечного изгиба упругой линии балки, которое имеет вид

$$EI_y \frac{d^4 w}{dx^4} - N \frac{d^2 w}{dx^2} + \alpha_i(x_i) w = q_i(x_i), \quad (1)$$

где w – поперечный прогиб трубы; EI_y – жесткость трубы при изгибе; I_y – осевой момент инерции сечения трубы; $q_i(x_i)$ – интенсивность поперечной нагрузки; $\alpha_i(x_i)$ – коэффициент пропорциональности, определяемый в зависимости от коэффициента постели грунта $k(x)$ и ширины опираемой поверхности (наружного диаметра трубы).

В качестве описания жесткости основания грунта использована модель Винклера (рис. 3). Точного решения задачи по оценке напряженно-деформированного состояния участка длинномерной цилиндрической оболочки длиной L с помощью дифференциального уравнения (1) в настоящее время не имеется. Поэтому в разделе приводятся основные положения методики решения данной задачи с помощью одного из приближенных методов – метода конечных разностей. Метод основан на замене всех производных конечными разностями.

Исследуемый участок разбивался на участки с шагом $t = L/(n + 1)$, где L – расчетная длина участка длинномерной цилиндрической оболочки, n – количество узлов (рис. 3 б). Для записи дифференциального уравнения (1) в

дискретном виде были использованы операторы перехода от дифференциальных уравнений к дискретным.

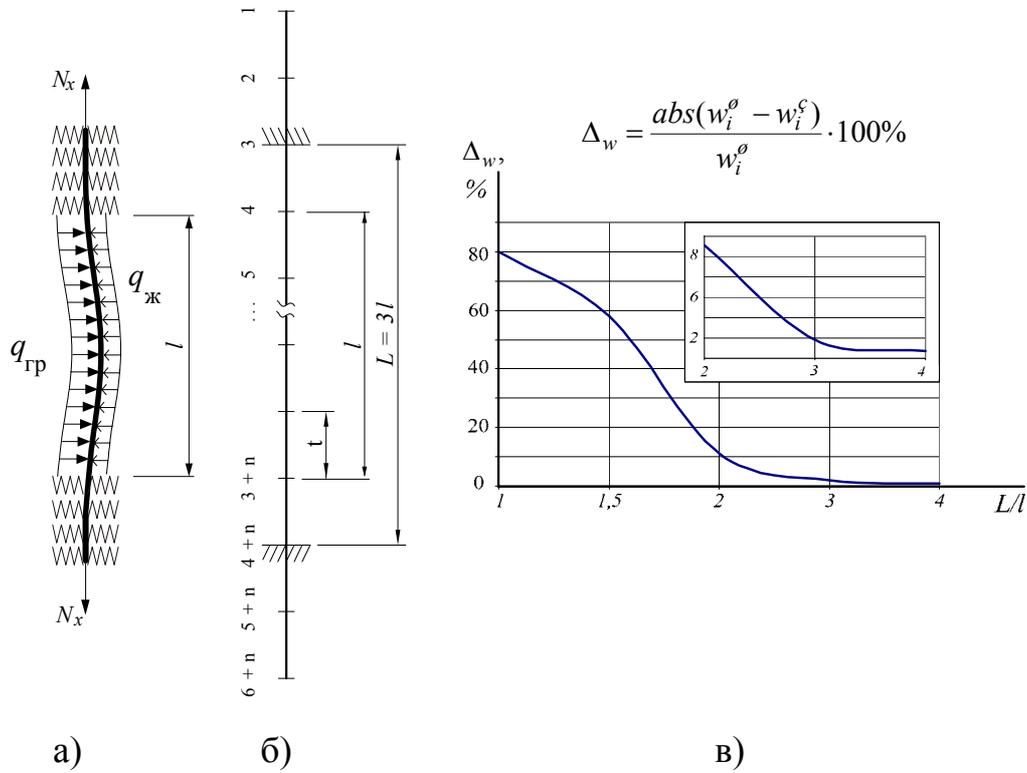


Рис. 3. Расчетная схема участка длинномерной цилиндрической оболочки: а) действие усилий в условиях неравномерного наружного давления на поверхность; б) дискретная схема расчета; в) длина расчетного участка в зависимости от закрепления

С учетом податливости породы грунта на краях исследуемого участка (рис. 3) могут быть введены следующие краевые условия: углы поворота (φ) сечений в узлах 3 и $n+4$ (рис. 3 б) и перемещения (δ) для этих узлов. В реальной практике эти величины не известны. Чтобы не задаваться значениями δ и φ , размер расчетного участка принимается $L=3l$, где l – длина исследуемого участка (рис. 3). На границах данного участка может приниматься шарнир или заделка, так как в этом случае влияние краевых условий на напряженно-деформированное состояние в зоне неравномерного

наружного давления на длине l (рис. 3) не превышает 2% при расчетных параметрах исследуемого объекта.

Используя уравнение (1), записанное в дискретном виде, определены прогибы во всех узлах, начиная с 1-го и заканчивая $n+6$ узлом (рис. 3). В данном случае такими являются узлы, начиная с 4-го по $n+3$ включительно.

Была составлена матрица коэффициентов (A), стоящих при неизвестных w , и матрица-столбец (C) правых частей. Далее нашли матрицу, обратную матрице (A), и, умножая ее на матрицу-столбец (C), определили величины прогиба для каждого узла

$$w = (A)^{-1} \cdot (C). \quad (2)$$

Зная величины прогибов во всех точках, включая законтурные, определили углы поворота сечений, поперечные силы, изгибающие моменты и величины продольных напряжений в длинномерной цилиндрической оболочке.

Обоснование достоверности полученных результатов выполнено на ряде частных задач путем сравнения результатов метода конечных разностей с результатами аналитических способов решения, определения внутренней сходимости решения дифференциального уравнения (1) с увеличением узлов на исследуемом участке, оценки устойчивости решения задачи (в соответствии с работами А.А. Самарского).

Для сравнения результатов, полученных по методу конечных разностей, с результатами, полученными решением аналитическими способами, общую задачу разбили на ряд частных задач, имеющих точное решение: изгиб участка длинномерной цилиндрической оболочки только от действия поперечной силы, деформация участка от действия продольной силы, изгиб участка обсадной трубы, лежащей на упругом основании, от действия поперечной силы.

Погрешность оценивалась по формуле

$$Esp(w) = \frac{abs(w_i^T - w_i^{MKP})}{w_i^T} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где w_i^T – точное значение величины прогиба в i -ом узле; w_i^{MKP} – значение прогиба, полученное методом конечных разностей.

Аналогично рассчитывались значения погрешностей для угла поворота сечения, поперечной силы и изгибающего момента. Результаты расчета показали (рис. 4), что погрешность вычислений при $n=60$ точек не превышает 2,5%. При большем количестве узлов результаты практически совпадают.

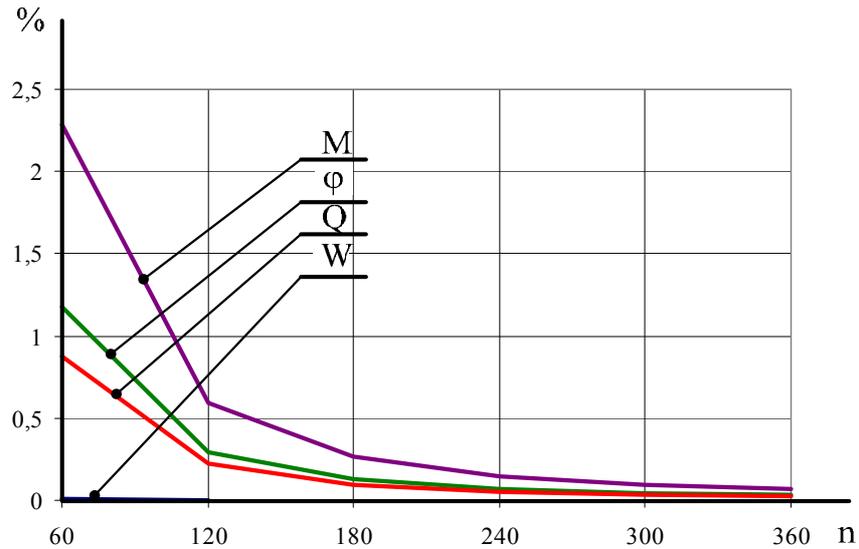


Рис. 4. Изменение результатов вычислений в зависимости от количества узлов (внутренняя сходимость)

На этапе подтверждения корректности поставленной задачи рассматривались ошибки округления в элементах вектора правой части C и в матрице A системы линейных уравнений $A \cdot w = C$, которые могут повлиять на точность решения этой системы.

Для того, чтобы убедиться в корректности задачи (в соответствии с работами А.А. Самарского), необходимо установить непрерывную зависимость решения от входных данных. Входными данными являются правая часть C и элементы a_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n$) матрицы A . Соответственно, различают: устойчивость по правой части (когда возмущается только правая часть C , а матрица A остается неизменной)

$$\|\delta w\| / \|w\| \leq M_A \|\delta C\| / \|C\|; \quad (4)$$

коэффициентную устойчивость (когда возмущается только матрица A , а правая часть C остается неизменной)

$$\|\delta w\|/\|w\| \leq M_A \|\delta A\|/\|A\|, \quad (5)$$

где $M_A = \|A\| \cdot \|A^{-1}\|$ – число обусловленности матрицы A .

В самом общем случае ошибки могут быть как в матрице, так и в векторе правой части, и соответствующая оценка погрешности в решении имеет более сложный вид

$$\frac{\|\delta w\|}{\|w\|} \leq \frac{M_A}{1 - M_A \left(\frac{\|\delta A\|}{\|A\|} \right)} \left(\frac{\|\delta A\|}{\|A\|} + \frac{\|\delta C\|}{\|C\|} \right). \quad (6)$$

Результаты показали, что при относительной величине погрешности правых и левых частей, порядка 10^{-5} , система алгебраических уравнений является обусловленной, устойчивой.

Таким образом, было доказано, что решение задачи существует и единственно и оно непрерывно зависит от входных данных, следовательно, задача была поставлена корректно.

В третьем разделе была рассмотрена задача определения окружных напряжений участка исследуемого объекта, исходя из положений несимметричного деформирования цилиндрических оболочек. Решение задачи получено на основании полубезмоментной теории В.З. Власова.

В данном разделе выводятся уравнения, которые представляют собой развитие общей теории несимметричной деформации цилиндрических оболочек. Изгиб цилиндрической оболочки рассматривается под воздействием несимметричной нагрузки.

Уравнения равновесия, описывающие поведение модели, записаны в перемещениях в цилиндрической системе координат.

Учитывая зависимости между усилиями в оболочке и напряжениями:

$$M_s = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_s z dz, \quad N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz, \quad N_s = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_s dz, \quad S = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xs} dz \quad (7)$$

– величины интегральных характеристик жесткости растяжения-сжатия, изгиба, кручения были представлены в следующем виде:

$$B_{11} = \int_{-h/2}^{h/2} b_{11} dz = \frac{Eh}{1-\nu^2}; \quad B_{12} = \int_{-h/2}^{h/2} b_{12} dz = \frac{E\nu h}{1-\nu^2};$$

$$D = \int_{-h/2}^{h/2} b_{11} z^2 dz = \frac{b_{11} h^3}{12} = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}; \quad B_{33} = \int_{-h/2}^{h/2} b_{33} dz = Gh; \quad (8)$$

$$b_{11} = \frac{Eh}{1-\nu^2}; \quad b_{12} = \nu b_{11} = \frac{E\nu}{1-\nu^2}; \quad b_{33} = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

В итоге получена система дифференциальных уравнений, которая при постоянной жесткости интегральных характеристик была записана:

$$\frac{D}{r^3} \left(\frac{\partial^4 W}{\partial \varphi^4} - \frac{\partial^3 V}{\partial \varphi^3} \right) + \frac{B_{11}}{r} \left(W + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \right) - p_1 r = 0;$$

$$B_{11} \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} r + B_{33} \left(\frac{\partial^2 U}{r \partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 W}{\partial x \partial \varphi^2} \right) + p_2 r = 0; \quad (9)$$

$$\frac{B_{11}}{r} \left(\frac{\partial W}{\partial \varphi} + \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \right) + B_{33} r \left(\frac{\partial^2 U}{r \partial \varphi \partial x} + \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} \right) - \frac{D}{r^3} \left(\frac{\partial^3 W}{\partial \varphi^3} - \frac{\partial^2 V}{\partial \varphi^2} \right) + p_3 r = 0.$$

К данной системе уравнений были сформулированы граничные условия.

Для решения полученной системы уравнений методом конечных разностей оболочку разбили на участки с шагом по окружности поперечного сечения $\Delta \varphi = 2\pi / (m - 1)$, где m – количество точек в окружном направлении.

Для упрощения системы алгебраических уравнений в направлении оси x введена аппроксимация и система уравнений (9) была записана в дискретном виде в направлении φ (окружном направлении).

Матрица коэффициентов (A), стоящих при W , U , V , содержащая $3m$ неизвестных, сформирована следующим образом: в соответствии с количеством узлов (m) в окружном направлении с помощью первого уравнения заполняются строки от 1-ой до m -ой, с помощью второго – строки от $(m+1)$ до $2m$, с помощью третьего – строки от $(2m+1)$ до $3m$. Коэффициенты, стоящие перед W , будут заполнять от 1 до m столбцов, коэффициенты, стоящие перед U – от $(m+1)$ до $2m$, коэффициенты, стоящие перед V – от $(2m+1)$ до $3m$. Аналогичные действия выполняются для матрицы правых частей (C).

Далее найдена матрица, обратная матрице A . В результате умножения ее на матрицу-столбец C вычислены радиальное, осевое и окружное перемещения. С помощью известных величин перемещений определены напряжения и усилия в исследуемой оболочке.

Достоверность решения данной задачи рассматривалась аналогично обоснованию достоверности определения продольных напряжений – см. раздел 2. Результаты расчетов напряжений в окружном направлении σ_s сравнили с результатом теории безмоментного напряженного состояния. Данное решение используется при постоянной нагрузке по периметру цилиндрической оболочки. Результаты расчета показали, что погрешность вычислений по методу конечных разностей при количестве узлов сетки $n = 121$ не превышает 2%. При введении сетки с наибольшим количеством узлов на цилиндрической оболочке сходимость увеличивается. Оценка устойчивости решения задачи (мера обусловленности) показала, что при абсолютной и относительной величинах погрешности правых частей, порядка 10^{-5} , система алгебраических уравнений является обусловленной, устойчивой.

В четвертом разделе была проведена оценка величин нагрузок, приводящих к смятию длинномерной цилиндрической оболочки. Эта оценка заключалась в анализе напряжений, возникающих в длинномерной цилиндрической оболочке в результате действия ряда нагрузок. Это могут быть продольные и поперечные усилия.

Зная величину напряжений, возникающих в результате действия вышеперечисленных нагрузок, выделили основные параметры, определяющие смятие исследуемого объекта.

В данном разделе идет речь об определении результирующих критических напряжений через окружные напряжения σ_s и продольные σ_x . Под критическими напряжениями понимаются результирующие напряжения, при которых происходит потеря устойчивости длинномерной цилиндрической оболочки. Для получения результирующих напряжений и сравнения их с пределом текучести использована четвертая теория прочности (энергетическая теория). Это означает, что смятие трубы происходит при уровне результирующих напряжений, равных пределу текучести металла. Поэтому в качестве расчетного напряжения с позиции смятия длинномерной цилиндрической оболочки принят предел текучести для данного металла исследуемой конструкции.

Исследования напряженно-деформированного состояния длинномерной цилиндрической оболочки проводились при следующих параметрах: диаметр трубы $D = 250,8$ мм; толщина стенки трубы $h = 15,9$ мм; длина исследуемого участка l варьировалась от 1000 мм до 4000 мм; коэффициент постели $c = 1000$ Н/мм³.

Расчеты по определению продольных и окружных напряжений показали, что при длине исследуемого участка $l = 1000$ мм окружные напряжения составляют 30,4% от продольных, то есть необходимо учитывать напряжения при изгибе в продольном направлении и в окружном направлении.

Картина распределения результирующих напряжений показана на рис. 5.

Сопrotивляемость длинномерной цилиндрической оболочки избыточному наружному давлению характеризуется критическим давлением, при котором наибольшее напряжение достигает предела текучести материала труб. На данном этапе решалась обратная задача.

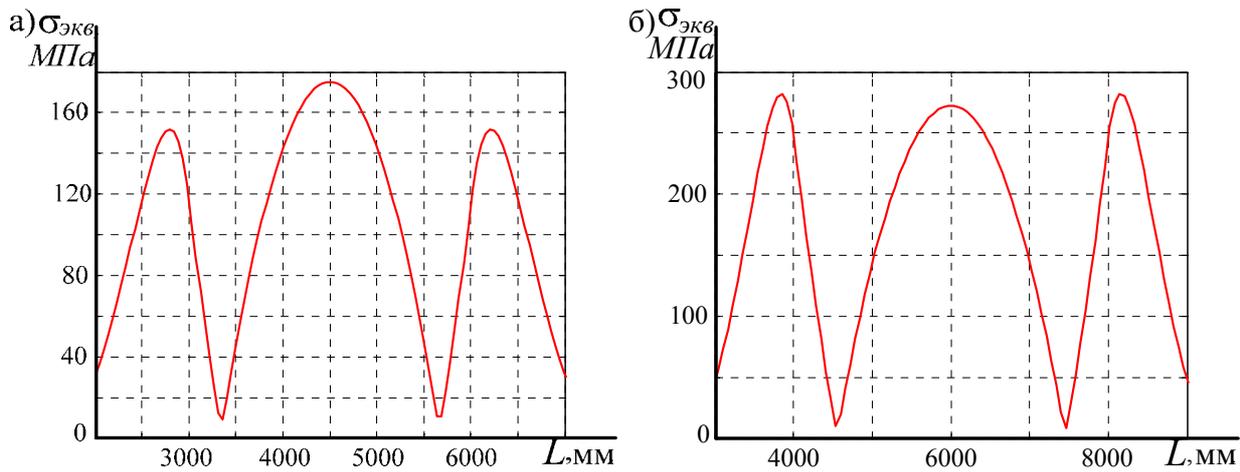


Рис. 5. Распределение величины напряжений по длине конструкции при разных длинах каверн: а) $l = 2000$ мм; б) $l = 4000$ мм

Исследование величины сминающих нагрузок участка длиномерной цилиндрической оболочки в зоне неравномерного распределения давления на ее поверхность проводилось при различных значениях ее длины и растягивающего продольного усилия (N) (табл. 1). В качестве примера рассмотрена обсадная колонна поисковой скважины.

Расчеты показали, что предельная нагрузка, когда происходит смятие, может быть значительно увеличена при создании растягивающих продольных усилий в длиномерной цилиндрической оболочке (при $N = 2000$ кН предельная нагрузка увеличится на 19%). При длине исследуемого участка до трех метров смятие длиномерной цилиндрической оболочки происходит в средней части зоны неравномерного давления, а при большей длине – на краях исследуемой зоны (табл. 1).

В работах, связанных с исследованием пластов в Оренбургской области, отмечается, что при глубине скважины 5800 м горное давление составляет более 140 МПа. До начала разработки залежи пластовое давление в большинстве случаев приблизительно равно гидростатическому и прямо пропорционально глубине залегания. Расчеты показали, что при образовании каверны длиной один метр на глубине 1,4 км уже возможно смятие обсадной

трубы. При наличии продольного растягивающего усилия $N = 2000$ кН этого смятия на данной глубине можно избежать.

Таблица 1

Сминающие нагрузки на примере обсадной трубы (сталь N-80, предел текучести 760 МПа) при различных длинах каверны

Зона исследования	В средней части каверны				В околоопорной части			
	1000	2000	3000	4000	1000	2000	3000	4000
Предельная нагрузка q , МПа								
при $N = 0$, кН	25,6	11,4	6,5	4,2	71,0	18,0	7,5	4,1
при $N = 2000$, кН	31,5	14,6	8,3	5,4	92,5	23,7	9,8	5,3

Основные выводы по работе:

– моделирование задачи прочности длинномерных цилиндрических оболочек позволило учитывать геомеханические факторы. Одним из основных примеров этих факторов может служить кавернообразование стенок скважин. При образовании зоны неравномерного распределения давления на длинномерную цилиндрическую конструкцию действует осесимметричная нагрузка, которая приводит к появлению поперечного изгиба исследуемого объекта;

– разработанная математическая модель позволила оценить напряженно-деформированное состояние участка длинномерной цилиндрической оболочки в ситуации неравномерного распределения давления. При этом определяются напряжения в продольном и в окружном направлениях. Например, при длине каверны 1000 мм вторые составляют 30,4% от первых, т.е. необходимо учитывать при расчетах те и другие составляющие;

– результаты математического и компьютерного моделирования на примерах обсадных колонн показали, что при образовании каверны длиной 1 м на глубине скважины около 1,4 км возможно смятие обсадной колонны, при образовании каверны длиной 0,5 м потеря несущей способности конструкции

произойдет уже на глубине около 2,4 км. Отсутствие каверн сохраняет несущую способность обсадных колонн;

– величины предельного давления на цилиндрическую оболочку могут быть увеличены при наличии растягивающих продольных усилий. Так, при $N = 2000$ кН предельная нагрузка изменится на 19%.

Основные публикации по теме диссертации

В ведущих рецензируемых научных журналах:

1. Дорофеев, Е. В. Математическая модель изгиба составной пологой оболочки из разномодульного материала / Ю. Е. Якубовский, А. А. Волжаков, Е. В. Дорофеев // Изв. вузов. Нефть и газ. – 2001. – № 3. – С. 68–72.

2. Дорофеев, Е. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния однопролетного перехода нефтегазопровода по полубезмоментной теории / Ю. Е. Якубовский, Т. М. Пономарева, Е. В. Дорофеев // Изв. вузов. Нефть и газ. – 2006. – № 5. – С. 44–49.

3. Дорофеев, Е. В. Прочность обсадных колонн поисковых скважин в условиях образования каверн / Ю. Е. Якубовский, Е. В. Дорофеев, С. Н. Горонович // Изв. вузов. Нефть и газ. – 2011. – № 2. – С. 107–111.

В других периодических изданиях:

4. Дорофеев, Е. В. Определение напряженно-деформированного состояния композитной муфты магистрального нефтепровода с учетом разносопротивляемости / Е. В. Дорофеев // Нефтегазовое дело. Проблемы современного строительства и архитектуры : сб. науч. трудов межрегиональной молодежной науч. конф. (15–17 марта 2000 г., Ухта) / Ухтинский государственный технический университет – Ухта : Изд-во УГТУ, 2000. – Ч. 1 – С. 102–103.

5. Дорофеев, Е. В. Математическая модель изгиба подкрепляющей муфты берегового закрепления однопролетного перехода трубопровода / Ю. Е. Якубовский, Е. В. Дорофеев // Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте : сб. науч. тр. III междунар. науч.-

техн. конф. (1–3 ноября 2005 г., Самара) / Самарский государственный архитектурно-строительный университет – Самара : Изд-во СГАСУ, 2005. – С. 366–370.

6. Дорофеев, Е. В. Моделирование изгиба однопролетного надземного перехода магистрального трубопровода / Е. В. Дорофеев // Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте : сб. науч. тр. III междунар. науч.-техн. конф. (1–6 июля 2005 г., Самара) / Самарский государственный архитектурно-строительный университет. – Самара : Изд-во СГАСУ, 2005. – С. 101–102.

7. Дорофеев, Е. В. Моделирование напряженно-деформированного состояния подкрепляющей муфты берегового закрепления трубопровода / Е. В. Дорофеев // Проблемы эксплуатации систем транспорта : сб. статей. Региональная науч.-практич. конф. (24 ноября 2005 г., Тюмень) / Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень : Изд-во ТюмГНГУ, 2005. – С. 76–78.

8. Дорофеев, Е. В. Расчет однопролетного надземного перехода трубопровода как балки на упругом неоднородном основании / Е. В. Дорофеев // Проблемы эксплуатации систем транспорта : сб. статей. Региональная науч.-практич. конф. (24 ноября 2006 г., Тюмень) / Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень : Изд-во ТюмГНГУ, 2006. – С. 66–70.

9. Дорофеев, Е. В. Влияние подкрепляющего элемента на напряженно-деформированное состояние однопролетных переходов трубопроводов / Е. В. Дорофеев // Геотехнические и эксплуатационные проблемы нефтегазовой отрасли : сб. науч. тр. междунар. научно-техн. конф. (27–29 марта 2007 г., Тюмень) / Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень : Изд-во ТюмГНГУ, 2007. – С. 102–105.

10. Дорофеев, Е. В. Локальное напряженно-деформированное состояние обсадной колонны в поисковых скважинах / Ю. Е. Якубовский, Е. В. Дорофеев // Проблемы эксплуатации систем транспорта : материалы всероссийской науч.-

практ. конф. (6 ноября 2008 г., Тюмень) / Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень : Изд-во ТюмГНГУ, 2008. – С. 333–337.

11. Дорофеев, Е. В. Методология расчета общего напряженно-деформированного состояния обсадной колонны в поисковых скважинах / Ю. Е. Якубовский, Е. В. Дорофеев, В. В. Кириченко // Проблемы эксплуатации систем транспорта : материалы всероссийской науч.-практ. конф. (6 ноября 2008 г., Тюмень) / Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень : Изд-во ТюмГНГУ, 2008. – С. 337–342.

12. Дорофеев, Е. В. Проблемы смятия обсадных колонн поисковых скважин при кавернообразовании / Е. В. Дорофеев // Проблемы эксплуатации систем транспорта : материалы междунар. науч.-практ. конф. (18–19 ноября 2010 г., Тюмень) / Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень : Изд-во ТюмГНГУ, 2010. – С. 94–96.

13. Дорофеев, Е. В. Проблемы прочности обсадных колонн поисковых скважин при кавернообразовании в грунтах на больших глубинах / Е. В. Дорофеев, В. В. Кириченко // Проблемы эксплуатации систем транспорта : материалы междунар. науч.-практ. конф. (18–19 ноября 2010 г., Тюмень) / Тюменский государственный нефтегазовый университет. – Тюмень : Изд-во ТюмГНГУ, 2010. – С. 96–97.

14. Дорофеев, Е. В. Алгоритм расчета обсадных колонн на основе методов строительной механики / Ю. Е. Якубовский, Е. В. Дорофеев // Строительство и образование : сб. науч. тр. / ФГАОУ ВПО УрФУ. – Екатеринбург : Изд-во УрФУ, 2010. – № 13. – С. 101–105.

15. Дорофеев, Е. В. Напряженно-деформированное состояние обсадной колонны скважины // Ю. Е. Якубовский, Е. В. Дорофеев, А. А. Поляков // Строительство и образование : сб. науч. тр. / ФГАОУ ВПО УрФУ. – Екатеринбург : Изд-во УрФУ, 2010. – № 13. – С. 108–112.

16. Св-во гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2011616279, Российская Федерация. Моделирование напряженно-деформированного состояния обсадных колонн в поисковых скважинах при образовании каверн [Текст] / Ю. Е. Якубовский,

Е.В. Дорофеев; заявитель и патентообладатель Тюм. гос. нефтегаз. ун-т. –
№ 2011614460; заявл. 16.06.2011, опубл. 10.08.2011. – 1 с.

Подписано к печати
Тираж 110 экз
Заказ №

Усл. Печ.л. 1
Уч. Изд.л. 1

Издательство «Нефтегазовый университет»
Тюменского государственного нефтегазового университета
625000, Тюмень, ул. Володарского, 38
Отдел оперативной полиграфии издательства «Нефтегазовый университет»,
650039, г. Тюмень, ул. Киевская, 52.