

На правах рукописи

Ахмед Абуэл Касем Ахмед Мохамед

**МЕТОД ОЦЕНКИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛАСТОМЕРНЫХ
ДЕТАЛЕЙ С УЧЕТОМ УПРУГОВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА.**

Специальность: 05.02.02 - Машиноведение, системы приводов и
детали машин

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт – Петербург
2002

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Для большинства действующих нефтяных скважин актуальна задача увеличения количества добываемой части нефти. В том числе решение этой задачи важно и для Египта, имеющего много скважин в Красном море. Технически эта задача решается разными средствами, но первоначально необходимо сделать анализ состояния скважины. Несколько лет назад начались работы по созданию специального кабеля-толкателя для проталкивания инструмента в скважину. Так как скважина находится на километровых глубинах моря, а сама скважина имеет километровые длины вопросы безопасности и надежности чрезвычайно актуальны. В окружении кабеля находится множество эластомерных деталей, часть из которых разрабатывалась: главное **уплотнение**, обеспечивающее абсолютную герметичность и минимальную силу трения при проталкивании кабеля; **грязесъемники**, предохраняющие главное уплотнение от попадания абразивных частиц как со стороны донной воды при проталкивании кабеля, так и со стороны скважины при вытаскивании кабеля; толкатель и его **подушки**, обеспечивающие требуемую силу проталкивания и вытягивания (при том, что поверхность кабеля покрыта антифрикционным материалом и смочена водой и остатками нефти).

Ставилась задача разработать эти детали, выпустить прототипы и экспериментально подтвердить их соответствие техническим требованиям. Так как требования по температурным и нагрузочным диапазонам были очень узкими, учет упруговязкопластических свойств эластомеров был совершенно необходим.

Целью диссертационной работы является метод оценки работоспособности эластомерных деталей с учетом упруговязкопластических свойств материала.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- выбор упруговязкопластической модели, наиболее полно соответствующей представлениям о структуре и поведении материала в образцах и реальных деталях, и разработка соответствующих математических выражений;
- разработка алгоритмов для определения параметров модели из данных экспериментов и использования в конечно-элементной программе;
- использование разработанной модели в конечно-элементной программе для проектирования деталей с учетом ползучести и релаксации, восстанавливаемости при циклических нагрузках, разработка рекомендаций по выбору материала.

Научная новизна состоит в следующем

- с единых позиций упруговязкопластической модели эластомера получены выражения для релаксирующего модуля, частотных и амплитудных зависимостей динамического модуля;
- разработана методика определения параметров модели, базирующаяся на обработке экспериментальных данных о релаксации и ползучести, частотных и амплитудных зависимостях динамического модуля;
- показана адекватность описания упруговязкопластической моделью поведения эластомера.

Практическая ценность работы состоит в том, что использование разработанного метода оценки работоспособности эластомерных деталей с учетом упруговязкопластических свойств в конечно-элементной программе увеличило возможности программы для целей проектирования деталей. В частности, были спроектированы уплотнения, грязесъемники и толкатель с подушками для кабеля. Спроектированные детали могут быть использованы на большинстве нефтепромыслов. Применение модели позволило разработать экспресс-методику проведения экспериментов для сравнения и выбора эластомеров, имеющих различные проявления вязкопластических свойств.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- сравнением точности (верификацией) численных решений конечно-элементной программы с известными аналитическими решениями в упругой линейной и нелинейной постановках; сравнением результатов, получаемых известными коммерческими программами с учетом вязкопластических свойств и граничного трения;
- сравнением характеристик спроектированных деталей с учетом полученных на образцах свойств эластомера и прототипов, изготовленных из этого же материала.

Экспериментальная проверка соответствия характеристик изготовленных прототипов требованиям технического задания показала эффективность разработанного метода.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на семинарах кафедры «Машиноведение, системы приводов и детали машин», в НИИРПИ в отделе РТИ, на IV международной конференции «Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их

решения” СПбГТУ 2001 г, а также на материалах V всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы “Фундаментальные исследования в технических университетах” СПбГТУ, 2001 г.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 5 печатных работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертационной работы 136 страниц.

Автор благодарит А.А. Ашейчика и В. В. Елисеева за консультации при выполнении работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, отмечена научная новизна и практическая значимость результатов работы, выделены цели и задачи исследования, описаны объекты исследования. Во введении дан краткий обзор работ, посвященных изучению и моделированию упруговязкопластических свойств эластомеров российских ученых, ученых из бывших республик СССР Бартенева Г.М., Колтунова М.А., Лавендела Э.Э., Пальмова В.А., Победри Б.Е., Работнова Ю.Н., Черных К.Ф. Отмечается, что в дальнейшем некоторые модели легли в основу российских конечно-элементных программ. В наибольшей мере это произошло с аналогичными трудами западных ученых Ferry J.D., Gent A.N., Mullins L., Nagtegaal J.C., Rivlin R.S., Yeoh O.H., разработки которых легли в основу моделей коммерческих программ ABAQUS, ANSYS, MARC.

Первая глава посвящена описанию и определению физико-механических характеристик эластомеров. Наибольшее внимание уделено модулю упругости и его описанию в рамках упруговязкопластической модели. Сложное нелинейное взаимозависимое от всех параметров нагрузки поведение эластомера проявляется в зависимости модуля от среднего уровня деформации, частоты и амплитуды воздействия, температуры среды и саморазогрева, времени эксплуатации.

После рассмотрения современных представлений о реологии эластомеров показана и обоснована перспективность использования обобщенной модели Максвелла (**рис.1**) при анализе вязкоупругих процессов. Удовлетворительные результаты интерполяции данных о ползучести и релаксации получаются с использованием ограниченного числа звеньев в модели. Описание частотной

зависимости динамического модуля достигается добавкой к полученным звеньям звеньев с малыми временами релаксации.

Сильная амплитудная зависимость динамического модуля наполненных эластомеров моделируется добавлением в параллель упругопластических звеньев с элементами сухого трения. Эта же модель используется для описания тиксотропного эффекта.

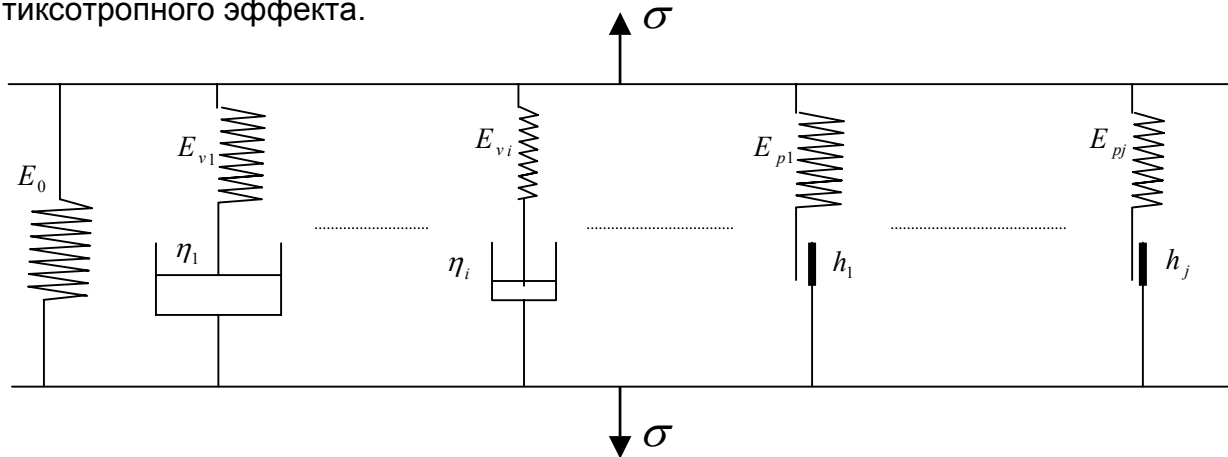


Рис. 1 Упруговязкопластическая модель

Выражения для динамического модуля упругопластических звеньев выводились методом гармонической линеаризации. Однако получаемые зависимости были негладкими, со скачками в точках около значений дискретных пределов текучести и, следовательно, со значительными отклонениями от экспериментальных кривых. Возникла необходимость перехода к континуальной модели, для которой дискретный спектр является приближенным описанием. Для дискретных спектров вопрос о точности аппроксимации решался увеличением числа элементов. Для континуальной модели решалась задачи минимизации числа идентификационных параметров. Поэтому выводились, анализировались и сравнивались с экспериментом равномерный и различные треугольные спектры. Показано, что при девяти идентификационных параметрах различные треугольные спектры (рис.2) дают удовлетворительную интерполяцию динамического модуля, выражение для которого приведено ниже:

$$E'(\omega, a) = \begin{cases} E_0 + E_p + \frac{2E_v}{(\tau_\infty - \tau_1)(\tau_{\max} - \tau_1)} A_1 + \frac{2E_v}{(\tau_\infty - \tau_1)(\tau_\infty - \tau_{\max})} A_2 & a \leq H_1 \\ E_0 + \frac{E_p}{(H_\infty - H_1)} \left[\frac{2}{(H_{\max} - H_1)} \left(\frac{a^2}{4} - H_1 \frac{a}{3} + \frac{1}{12a^2} H_1^4 \right) + \left((H_\infty - H_1) - \frac{(a - H_1)^2}{(H_{\max} - H_1)} \right) \right] + \\ \quad + \frac{2E_v}{(\tau_\infty - \tau_1)(\tau_{\max} - \tau_1)} A_1 + \frac{2E_v}{(\tau_\infty - \tau_1)(\tau_\infty - \tau_{\max})} A_2 & H_1 < a \leq H_{\max} \end{cases}$$

$$E'(\omega, a) = \begin{cases} E_0 + \frac{E_p}{(H_\infty - H_1)} \left[\frac{2}{(H_{\max} - H_1) a^2} \left(\frac{H_{\max}^4}{4} - H_1 \frac{H_{\max}^3}{3} + \frac{1}{12} H_1^4 \right) + \frac{2}{(H_\infty - H_{\max})} \left(\frac{H_\infty a^2}{3} - \frac{a^2}{4} - H_\infty \frac{H_{\max}^3}{3a^2} + \frac{1}{4} \frac{H_{\max}^4}{a^2} \right) \right] + \\ + E_p \left(\frac{(a - H_\infty)^2}{(H_\infty - H_1)(H_\infty - H_{\max})} \right) + \frac{2E_v}{(\tau_\infty - \tau_1)(\tau_{\max} - \tau_1)} A_1 + \frac{2E_v}{(\tau_\infty - \tau_1)(\tau_\infty - \tau_{\max})} A_2 & H_{\max} < a \leq H_\infty \\ E_0 + \frac{E_p}{(H_\infty - H_1) a^2} \left[\frac{2}{(H_{\max} - H_1)} \left(\frac{H_{\max}^4}{4} - H_1 \frac{H_{\max}^3}{3} + \frac{1}{12} H_1^4 \right) + \frac{2}{(H_\infty - H_{\max})} \left(\frac{H_\infty^4}{12} - H_\infty \frac{H_{\max}^3}{3} + \frac{1}{4} H_{\max}^4 \right) \right] + \\ + \frac{2E_v}{(\tau_\infty - \tau_1)(\tau_{\max} - \tau_1)} A_1 + \frac{2E_v}{(\tau_\infty - \tau_1)(\tau_\infty - \tau_{\max})} A_2 & H_\infty < a \\ \frac{2E_v}{(\tau_\infty - \tau_1)(\tau_{\max} - \tau_1)} A_3 + \frac{2E_v}{(\tau_\infty - \tau_1)(\tau_\infty - \tau_{\max})} A_4 & a \leq H_1 \\ \frac{2E_p}{(H_\infty - H_1)(H_{\max} - H_1)} [B_1 - B_2] + \frac{2E_v}{(\tau_\infty - \tau_1)(\tau_{\max} - \tau_1)} A_3 + \frac{2E_v}{(\tau_\infty - \tau_1)(\tau_\infty - \tau_{\max})} A_4 & H_1 < a \leq H_{\max} \\ \frac{2E_p}{(H_\infty - H_1)(H_{\max} - H_1)} [C_1 - C_2] + \frac{2E_p}{(H_\infty - H_1)(H_\infty - H_{\max})} [-B_3 + B_4] + \\ + \frac{2E_v}{(\tau_\infty - \tau_1)(\tau_{\max} - \tau_1)} A_3 + \frac{2E_v}{(\tau_\infty - \tau_1)(\tau_\infty - \tau_{\max})} A_4 & H_{\max} < a \leq H_\infty \\ \frac{2E_p}{(H_\infty - H_1)(H_{\max} - H_1)} [C_1 - C_2] + \frac{2E_p}{(H_\infty - H_1)(H_\infty - H_{\max})} [-C_3 + C_4] + \\ + \frac{2E_v}{(\tau_\infty - \tau_1)(\tau_{\max} - \tau_1)} A_3 + \frac{2E_v}{(\tau_\infty - \tau_1)(\tau_\infty - \tau_{\max})} A_4 & H_\infty < a \end{cases} \quad (1)$$

где H_1, H_∞ - безразмерный предел текучести первого и последнего упруго-пластического элемента; E_0 - величина упругой составляющей или квазиравновесное значение модуля; E_p - суммарное значение модули для упруго-пластических элементов; E_v - суммарное значение модули для вязко-упругих элементов; a - амплитуда значения деформации; ω - круговая частота; τ_1, τ_∞ - время релаксация первого и последнего вязко-упругого элемента

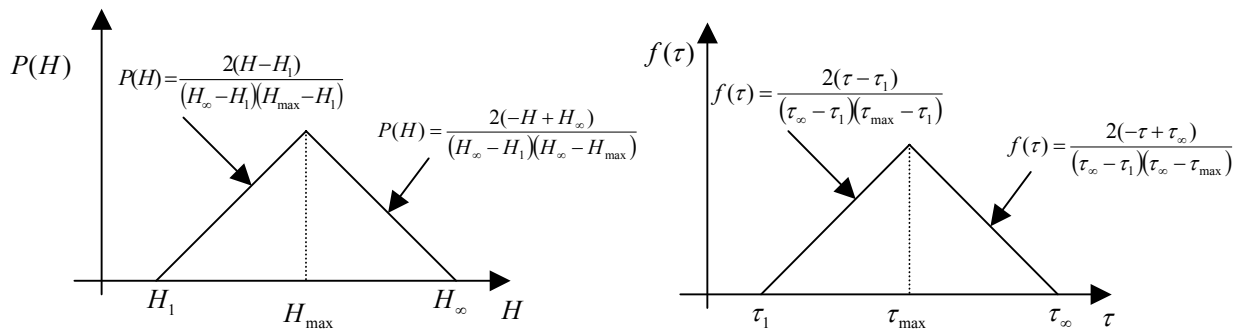


Рис. 2 Различные треугольные спектры

Приведенные соотношения использовались при создании алгоритма автоматизированного определения всех параметров модели по результатам введенных экспериментальных данных о релаксации напряжения при одноосном сжатии, частотных и амплитудных зависимостях динамического модуля. Алгоритм представляет из себя две последовательные процедуры: в первой простым табличным перебором находят граничные значения параметров модели, во второй находятся внутренние значения минимизацией среднеквадратического отклонения по всем введенным экспериментальным точкам с использованием различных весовых коэффициентов для действительной и мнимой составляющих модуля. Алгоритм лег в основу подпрограммы на языке C++, которая была присоединена к основной конечно-элементной программе, позволившей производить расчеты с учетом описываемых свойств.

Отдельный раздел первой главы посвящен используемым экспериментальным методам. Параметры релаксации и ползучести измерялись при сжатии и растяжении стандартных образцов, причем применяемые российские (ГОСТы 270, 10269) и западные стандарты (ASTM D412, D575) практически совпадают. Динамический модуль измерялся при изгибе на установке и в соответствии с ГОСТ 10828 «Метод определения динамического модуля и модуля внутреннего трения при знакопеременном изгибе с вращением» и при кручении на установке и в соответствии с DIN 53 313 “Determination of the visco-elastic properties of rubber under forced vibration”. Так как стандарты подчеркивают необходимость учета саморазогрева, возникающего в образцах при динамических испытаниях, использовались специальные методики как мгновенных измерений, так и выравнивания температур за счет регулировки внешней температуры в термокамере. Экспериментальные результаты приводятся в четвертой главе, где сравниваются свойства различных резин, и рассматриваемая модель используется для обоснования выбора материала.

Температурные изменения физико-механических характеристик учитывались температурным коэффициентом смещения (прямое использование экспериментальных данных для температурной зависимости модуля) и термофлуктуационной зависимостью парциальных времен релаксации.

Номинальная нагрузка рассматриваемых далее деталей приводила к деформации 20 – 30 % и зависимости свойств от средней составляющей λ удлинения. Влияние различных факторов разграничивалось (сепарабельное

представление): $E = E(t) E(\lambda)$. Конкретный вид функции определялся видом упругого потенциала и не являлся предметом исследования в настоящей работе. Погрешности такой модели, постулирующей независимость временных составляющих от средней нагрузки (или независимость динамического поведения материала при малых амплитудах от средней составляющей нагрузки), проверялись экспериментально при релаксации: средняя составляющая замедляла процессы течения, но максимально зафиксированное изменение не превышало 5%.

Во второй главе дается описание программы STAR (FE program for **S**tress, self-heating **T**emperature **A**nalysis and lifetime prediction of **R**ubber parts (www.unilib.neva.ru/stu/fac_pages/4/mdm/star.htm)) и разработанных и встроенных процедур использования упруговязкопластической модели.

Программа STAR используется исключительно для расчета резиновых деталей. Она развивалась и развивается в направлении более полного учета специфических свойств эластомеров, удобства ее использования от непосредственного ввода экспериментальных данных и последующего автоматизированного получения параметров моделей до анализа результатов расчета в понятном инженерном представлении (нагрузочные кривые, коэффициенты жесткости, сравнительные утечки, долговечность и т.д.). К классу решаемых двумерных задач относятся следующие: задачи линейной и нелинейной упругости; вязкоупругости; тепловые, включая связанную термоупругость для анализа саморазогрева; контактные задачи с различными условиями трения; задачи сложного многоэтапного нагружения с возможностью решения вышеназванных проблем на каждом шаге; задачи оценки времени до разрушения (первой фазы – до роста трещин); задачи усадки и набухания.

Подключение упруговязкопластической модели ставило своей целью возможность: учитывать сильные амплитудные зависимости свойств эластомера и рассчитываемых деталей; тиксотропный эффект; решать задачу саморазогрева не через эмпирический коэффициент диссипации, а через параметры модели; использовать адекватные физическому поведению модели для экстраполяции результатов на значительно больший диапазон времен, частот и амплитуд по сравнению с полиномиальным или иным представлением.

Модель рис.1 и процедура автоматического определения ее параметров по введенным экспериментальным данным были реализованы в версии 3.17 и

прошли α и β верификацию. Помимо общеизвестных аналитически решенных задач теории упругости решались следующие задачи (эластомер рассматривался несжимаемым, вопросы слабой сжимаемости резины в работе не рассматривались и не обсуждаются).

Ползучесть трубы под давлением. Точность численного решения начальной упругой задачи (Ляме) анализировалась в зависимости от степени дискретизации (мельчения сетки) области; анализировалась степень влияния на итоговую ползучесть числа элементов модели, соотношения между элементами с малыми и большими временами релаксации (по сравнению с временем наблюдения).

Кольцевое прямоугольное уплотнение: одновременные релаксация начального поджатия и ползучесть под давлением. Численное решение сравнивалось с имеющимися в литературе и результатами других коммерческих программ.

Задача Герца (классическая) и ее усложнения: нелинейная, вязкоупругая, с трением, со сдвигом (скольжением). Численное решение начальной упругой геометрически нелинейной задачи сравнивалось с аналитическим, точность оценивалась по следующим параметрам: значение каждой компоненты тензора напряжений в точке на линии контакта, распределение вглубь цилиндра, ширина и отклонение от эллиптичности распределения напряжений по ширине площадки контакта. Показано, что возможно достижение любой степени точности (ограничивались 0.5%) в зависимости от степени дискретизации. Задача решалась с учетом трения на границе, анализировались изменения по сравнению с классическим решением. Далее задача решалась без трения для больших деформаций с учетом нелинейности свойств материала, решение сравнивалось с известным из литературы. Решение с учетом вязкоупругих свойств (расползание площадки контакта со временем и перераспределение напряжений) сравнивалось с полученным аналитически для модели с двумя элементами. Задача решалась со сдвигом (с трением) площадки контакта, анализировалась возникающая при этом несимметричность эпюры контактных напряжений.

Одним из приложений программы STAR является возможность сравнивать утечки Q через уплотнения, базируясь на анализе распределения контактных напряжений σ_n по длине контакта L :

$$Q \sim \frac{\Delta p}{L (\sigma_n)} \frac{1}{\left[\exp \left(\frac{\sigma_n}{E} \right) \right]^{3/k}} . \quad (2)$$

Решалась задача оценки герметичности уплотнительных колец круглого поперечного сечения. Рассчитывались следующие шаги: установка кольца в канавку, релаксация, изменение напряженно-деформированного состояния при изменении температуры, при подаче давления. Полученная таблица сравнительных утечек позволила очертить область (границу предельных давлений и температур) опасных утечек, проходящую через экспериментально зафиксированную точку, а также сравнить различные конструкции уплотнений (различные начальные поджатия, конфигурации колец и канавок). Результаты расчетов колец различных диаметров приводятся в работе. Показано, что дальнейшие эксперименты с кольцами подтвердили правильность прогноза границы опасных утечек (и метода в целом) и подтвердили выводы о целесообразности использования колец предложенных ниже.

Третья глава – содержит результаты использования метода, полученные при проектировании уплотнений и грязесъемников кабеля. Главный уплотнитель должен осуществлять герметизацию на глубине до 2 километров в ходе протягивании 10 километров кабеля при перепаде давлений 700 атмосфер на границе раздела донная вода – газонефтяная смесь.

Применяемые в аналогичных случаях сальники (в том числе и уплотняемые в процессе работы) не дали положительных результатов в тестах с кабелем из-за высокой скорости изнашивания и большой силы трения, которую необходимо преодолеть толкателю.

При проектировании главного уплотнения стремились: герметизировать за счет больших локальных напряжений, использовать эффект самоуплотнения (пропорциональный росту давления рост контактных напряжений), минимизировать площадь контакта, создать систему с резервированием. Рассматривались различные причины отказа (появление утечек) уплотнения: объемное разрушение колец; выдавливание материала в зазор; термоусадка; износ уплотнения. Рассчитывались и сравнивались по всем критериям: кольцевые, эллиптические, V – образные, V – образные комбинированные уплотнения с различными предохранительными (антиэкструзионными) кольцами. Для уплотнений подбирался эластомер с наилучшей комбинацией антифрикционных свойств (низкие коэффициенты трения покоя и движения, малое изнашивание), наибольшей восстанавливаемостью, оптимальной твердостью (высокой для предотвращения выдавливания в зазор и низкой для

большей герметичности). Для предохранительных колец подбирались фторопласт с различными наполнителями (кокс, углеволокно), рассчитывалась конфигурация наиболее способствующая самоуплотнению.

Расчет уплотнения производился программой STAR, вводились все необходимые свойства эластомера, определенные экспериментально. Расчет производился с использованием процедуры многоступенчатого нагружения: установка кольца в гнездо для обеспечения начального поджатия, изменение напряженно-деформированного состояния кольца со временем, изменение напряженно-деформированного состояния при изменении температуры; подача давления; анализ полей локальной долговечности; сравнительный анализ утечек и эффектов трения.

На **рис. 3** показано рекомендованное и примененное уплотнение и использованная система с резервированием: в начальный период работы герметизирует первое самоуплотняемое кольцо; по мере изнашивания в работу могут включиться второе или третье кольца; сила трения при этом, очевидно, не возрастет. В главном уплотнителе указанные блоки чередуются с блоками грязесъемников, исключающих катастрофическое разрушение колец крупными абразивными частицами.

В работе приводятся сведения о результатах тестовых испытаний уплотнений, выдержавших строжайшие процедуры сертификации для применения под водой. На первом этапе использовалась камера и возвратно-поступательное движение куска кабеля (жесткий режим с большим количеством циклов трения покоя); после получения положительных результатов проводились испытания с целым кабелем. Испытания не были ускоренными (путь трения в 10 километров набирался за 3 – 4 часа).

Вторая часть третьей главы описывает результаты проектирования грязесъемников. Основные элементы технического задания на уплотнитель распространяются и на грязесъемники, верхние устанавливаемые перед уплотнителем в воде, между уплотнителями и нижние за уплотнителем в скважине (в трубе смазывателя). При проталкивании кабеля верхний грязесъемник предотвращает от попадания частиц, содержащихся в воде, в зону уплотнения; при вытягивании кабеля нижний грязесъемник устраняет частицы, содержащиеся в нефти, и очищает кабель от частиц нефти, препятствуя их попаданию в воду и создавая требуемый для работы толкателя режим трения.

При проектировании грязесъемника стремились: организовать очистку отталкиванием крупных частиц (скребковый эффект) и не пропусканием мелких, минимизировать площадь контакта, создать систему с резервированием.

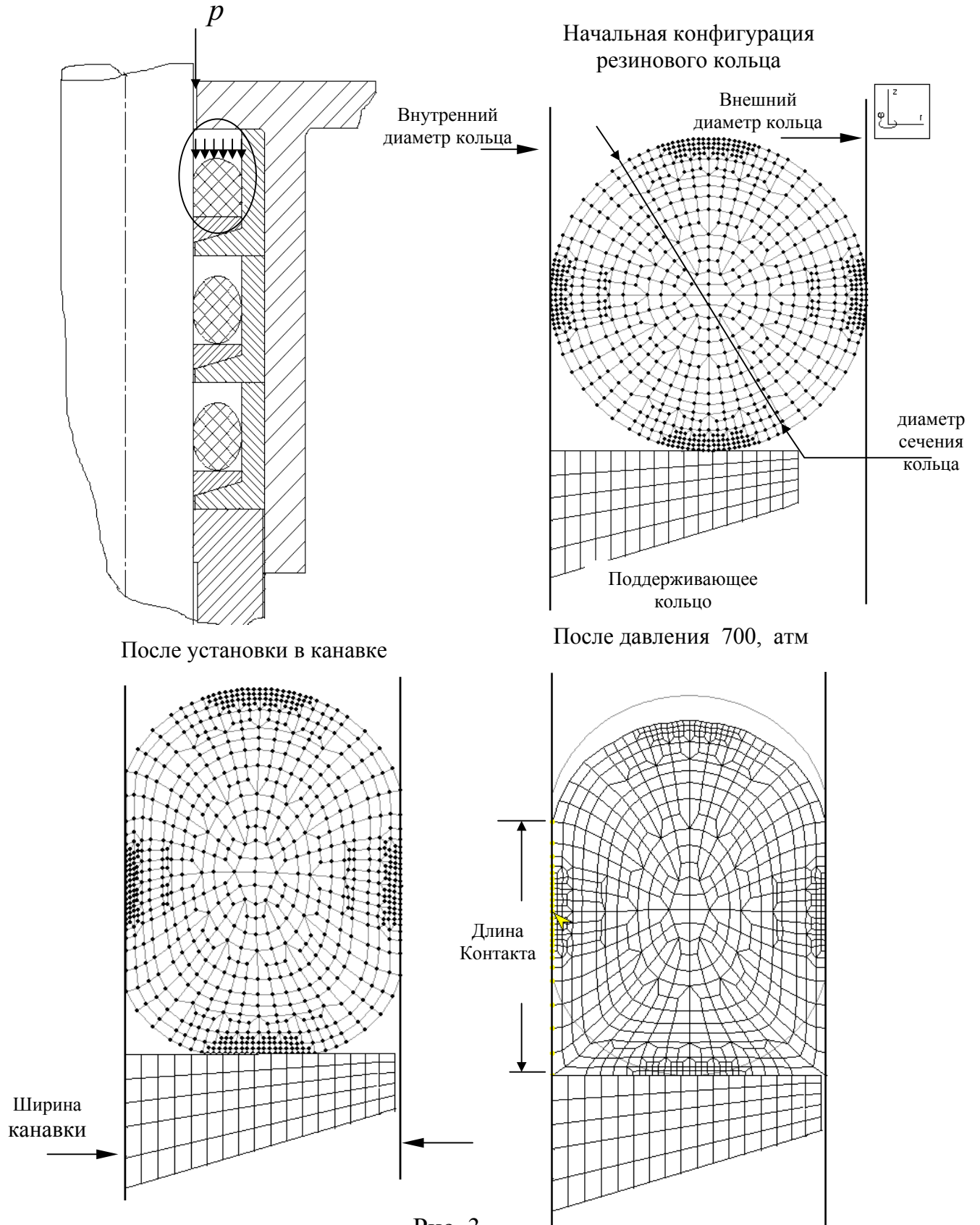


Рис. 3

Рассчитывались и сравнивались грязесъемники с губками с различными углами передней кромки от 80 до 120 градусов и различными принципами поджатия кромки (за счет деформирования эластомера, пружинами). Подбирался эластомер с наилучшей комбинацией антифрикционных свойств (низкие коэффициенты трения покоя и движения, малое изнашивание) и наименьшими проявлениями вязкости и пластичности.

Расчет грязесъемника производился программой STAR, вводились все необходимые свойства эластомера, определенные экспериментально. Рассчитывалось контактное давление, его релаксация и ползучесть в зоне трения.

Грязесъемники устанавливались в блоки по три, использовался мембранный эффект, позволявший осуществлять самопроизвольный увод накопившейся мелкодисперсной грязи за счет образывавшегося перепада давлений до и после кромки. На **рис. 4** показано рекомендованный и примененный грязесъемник и использованная система с резервированием и уводом частиц.

В работе приводятся сведения о результатах тестовых испытаний грязесъемников с применением взвеси мраморной крошки в воде и нефти. Грязесъемники оказались очень чувствительными к перекосам кабеля из-за его изгиба, после установки фторопластовых направляющих грязесъемники выдержали требуемый путь трения.

В четвертой главе (первая часть) описываются результаты проектирования подушек толкателя кабеля. Во второй части приводятся экспериментальные данные нескольких резин, приводятся критерии для выбора наиболее подходящей из них.

Техническое задание на проектирование подводного толкателя содержало информацию об углепластиковом кабеле, покрытом антифрикционным материалом, усилиях проталкивания и вытягивания, габаритных размерах устройства.

Анализировались различные технические варианты исполнения устройства: а) цепные с поджимаемыми подушками на каждом звене; б) гидравлические с перемещающимися вдоль направления движения кабеля цилиндрами; в) контактные с вращающимися поджимными роликами. При выборе вариантов предполагалось, что на единице длины кабеля за счет поджатия подушек удастся создать одинаковые силы трения. В результате анализа был выбран вариант а),

так как вариант б) требовал слишком большое количество гидроцилиндров; вариант в) превышал габаритные размеры варианта а) почти в два раза.

Проектирование подушек цепного толкателя включало как проектирование формы, так и подбор материала для кабеля, покрытого антифрикционным материалом и смоченного водой с остатками нефти, не устранившимися грязесъемником.

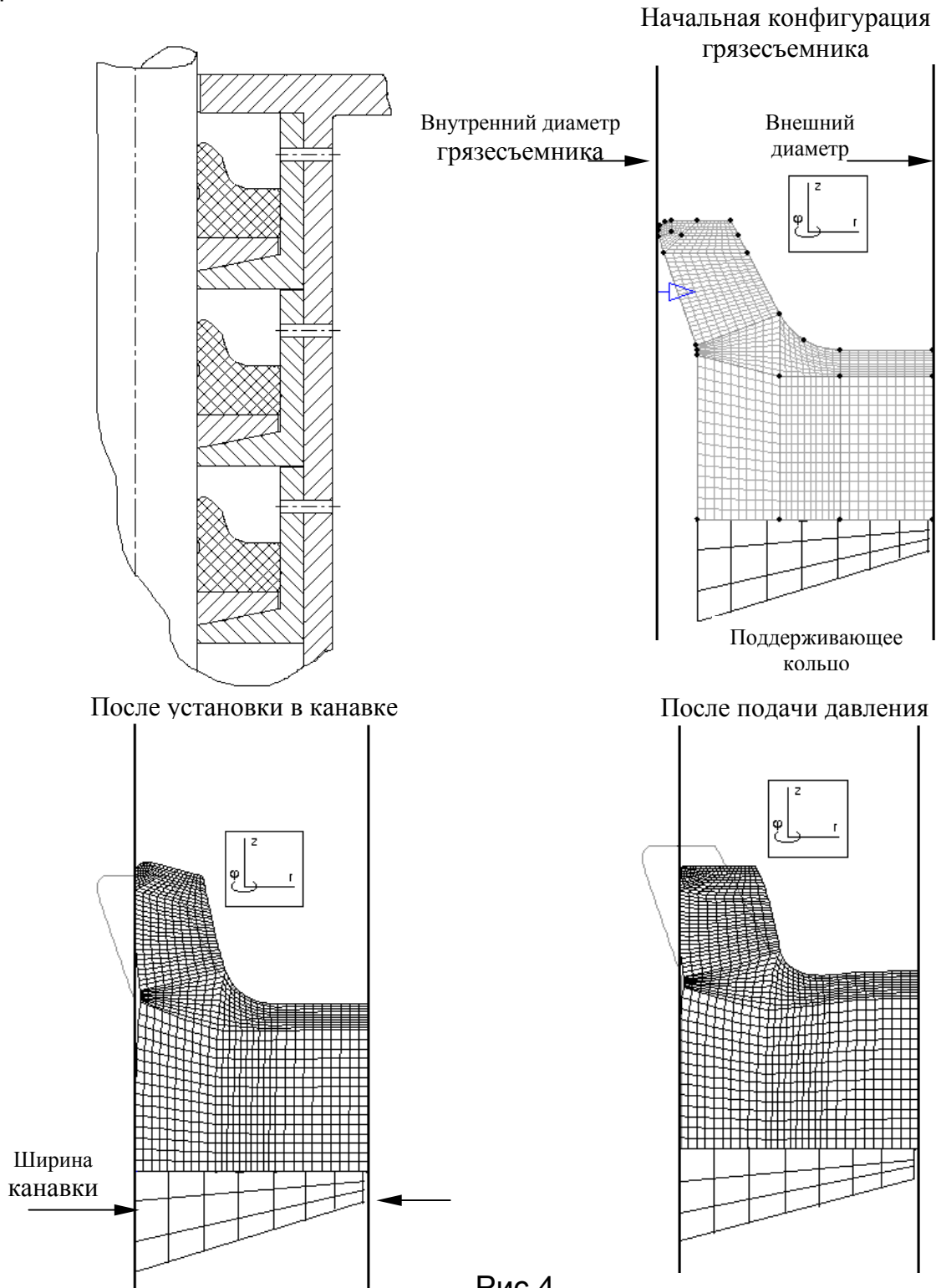


Рис.4

Для проектирования формы подушек использовалась программа STAR. Свойства материала задавались по результатам экспериментов, в том числе зависимость коэффициента трения от давления на поверхность кабеля, измеряемая на стенде; на этом же стенде измерялась скорость изнашивания резины. Специально спроектированный стенд использовался для проверки работоспособности одной пары изготовленных прототипов подушек. При сравнении вариантов численного анализа в качестве критериев использовались следующие: равномерность распределения контактных напряжений по всей окружности кабеля, обеспечивающая наибольшую силу трения и создающая наиболее благоприятное с точки зрения прочности анизотропного кабеля гидростатическое сжатие; возможность выдавливания остатков нефти из зоны контакта на всем пути входа в контакт с кабелем; наибольшее отношение сил, сжимающих кабель и саму подушку; наибольшее значение силы трения на единицу длины подушки; сохранение упомянутых свойств при износе на длине кабеля; максимальная восстанавливаемость формы при циклическом деформировании (т.е. суммируя требования к материалу можно сказать, что требовался эластомер с минимальными вязкопластическими проявлениями свойств, минимальным износом и максимальным коэффициентом трения).

На **рис. 5** приведено сечение подушки наилучшей формы. Варьируемыми параметрами были: форма канавки (окружности, эллипсы, трапеции и их комбинации); размер и форма боковых выступов; глубина и форма погруженной в держатель части; форма концов в осевом направлении. В работе приводятся результаты последующих экспериментальных измерений сил проталкивания кабеля через сжатые пары изготовленных подушек различных форм в воде и в нефти, подтвердившие правильность выбора наилучшей формы.

Изготовленная опытно-промышленная партия подушек, сам цепной толкатель с двумястами подушками подтвердили соответствие результатов требованиям технического задания: реальное усилие проталкивания замеренное в самых неблагоприятных условиях превосходило в полтора раза требуемое.

В завершении главы приводятся экспериментальные сведения о свойствах резин с акцентом на выборе по критерию максимальной восстанавливаемости (минимальные вязкопластические проявлениями свойств). Анализируются: кривые растяжения-сжатия (лопаток и цилиндров соответственно) на предмет величины тиксотропного эффекта (размягчения при циклическом

деформировании) и истинной прочности; кривые релаксации при сжатии на предмет наличия равновесного состояния и оценки скорости начальной релаксации; температурные зависимости; зависимости динамического модуля от частоты и амплитуды деформирования на предмет корреляции с данными о тиксотропном эффекте и релаксации; кривые выносливости (и величина саморазогрева) на предмет корреляции с истинной прочностью.

В результате делается вывод о наибольшей информативности и эффективности измерений динамического модуля эластомера. В работе приводятся рекомендации по выбору материала. В дальнейшем сравнения утечек уплотнений, изготовленных из этого эластомера показали правильность выбора. Это продемонстрировало эффективность использования как самой модели, так и метода оценки работоспособности эластомерных деталей с учетом упруговязкопластических свойств материала.

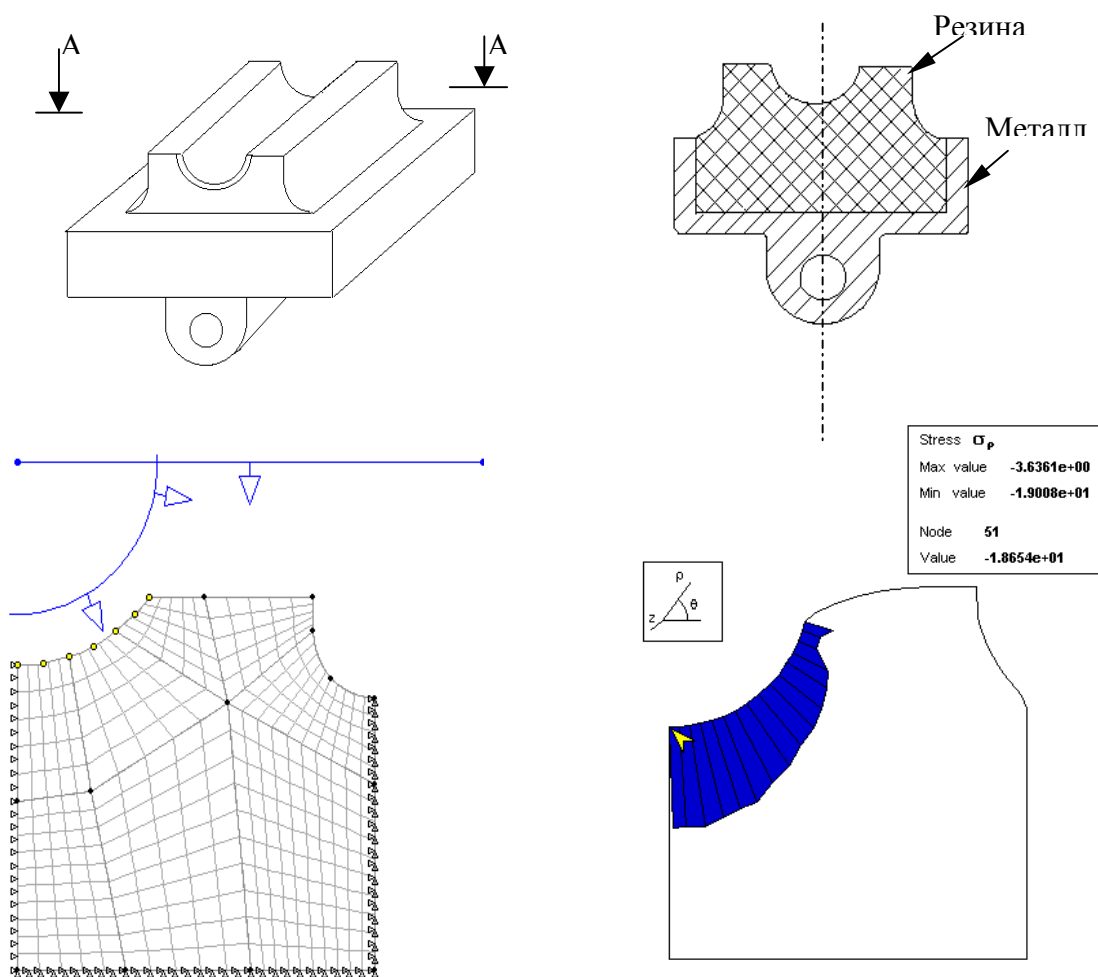


Рис. 5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты изложенных в диссертации исследований состоят в следующем.

1. Разработан метод оценки работоспособности эластомерных деталей с учетом упруговязкопластических свойств материала. В основе метода лежит применение реологической модели, адекватно описывающей поведение эластомера при релаксации, ползучести и в динамике в виде частотных и амплитудных зависимостей модуля. Метод позволяет точнее оценивать работоспособность деталей по критериям, проявление вязкопластических свойств в которых существенно: квазистатическая и динамическая жесткости, эпюры контактных напряжений, прочность.
2. Модель встроена в конечно-элементную программу расчета резиновых деталей. Разработанные алгоритмы позволяют определять параметры модели из данных экспериментов и в дальнейшем производить расчет деталей, выполненных из этого эластомера.
3. Осуществлено многогранное тестирование встроенных процедур. Сравнением точности численных решений с аналитическими, а также доступными решениями иных программ подтверждена возможность получения решений с любой относительной ошибкой. Сравнением экспериментальных характеристик деталей с расчетными (с учетом полученных на образцах свойств эластомера) показаны удовлетворительные возможности метода и его программной реализации.
4. Спроектированы, изготовлены и испытаны с удовлетворительными результатами кольцевые уплотнения главной герметизирующей системы кабеля. Анализ вариантов (форма уплотнений и тип эластомера) осуществлялся с использованием разработанного метода. Система уплотнений с резервированием (три блока) обеспечила герметичность на требуемом пути трения и минимальную силу при проталкивании кабеля.
5. Спроектированные по тем же принципам грязесъемники, предохраняющие главный уплотнитель, показали удовлетворительные результаты в тестовых испытаниях. Грязесъемники приняты к эксплуатации.
6. Обоснован выбор цепного толкателя кабеля с эластомерными подушками. Анализ вариантов (форма подушек и тип резины) осуществлялся с использованием рассматриваемой модели эластомера. Спроектированный и

изготовленный стенд показал удовлетворительное совпадение результатов экспериментов на изготовленных прототипах подушек с расчетными прогнозами. Удовлетворительные результаты опытно-промышленной партии подушек позволяют перейти к их серийному использованию на скважинах.

7. Разработана экспресс-методика проведения экспериментов для сравнения и выбора эластомеров, имеющих различные проявления вязкопластических свойств. В частности, эластомер рекомендованный по критерию максимальной восстанавливаемости, проявил наилучшие герметизирующие свойства в уплотнениях, выполненных из материалов, подвергавшихся сравнению.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Абуэл-касем. А., Лазарев С.О. *Изменение формы полимерных зубьев передач вследствие ползучести* - XXVII Неделя Науки СПбГТУ 6-11 декабря 1999 года “Материалы межвузовской научной конференции (механико-машиностроительный факультет и факультет технологии и исследования материалов)” СПбГТУ, 2000, стр. 63, 64.
2. Абуэл-касем. А., Лазарев С.О. *Учет релаксации и ползучести при проектировании уплотнений нефтедобывающего оборудования* - XXVIII Неделя Науки СПбГТУ 6-11 декабря 2000 года “Материалы межвузовской научной конференции (механико-машиностроительный факультет и факультет технологии и исследования материалов)” СПбГТУ, 2001.
3. Abouel-Kasem A. , Lazarev S. O. *Micro elastoviscoplastic model of rubber and its usage for numerical analysis and design*. International conference on material science and technology “Faculty of science, Beni-Suef Cairo University, Egypt”, 2001, стр.83-94.
4. Абуэл-касем. А., Лазарев С.О. *Контактное взаимодействие вязкоупругих цилиндров с трением: аналитические, численные и экспериментальные результаты*. Материалы V Всероссийской конференции по проблемам науки и высшей школы “Фундаментальные исследования в технических университетах” СПбГТУ, 2001, стр. 183,184.
5. Абуэл-касем. А., Лазарев С.О. *Использования вязкопластической модели резины при конечноэлементном проектировании деталей* IV Международная конференция “Научно-технические проблемы прогнозирования надежности и долговечности конструкций и методы их решения” СПбГТУ 2001 стр. 13-15.