

На правах рукописи

**УСТИНОВА Александра Сергеевна**

**ВИСКОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ ЭЛАСТИЧНЫХ  
НЕНЬЮТОНОВСКИХ СРЕД**

01.02.04 — механика деформируемого твердого тела

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук



Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте автоматике и процессов управления Дальневосточного отделения РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
Ковтанюк Лариса Валентиновна

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Роговой Анатолий Алексеевич

доктор технических наук, профессор  
Лаврушин Геннадий Алексеевич

Ведущая организация: Комсомольский–на–Амуре государственный  
технический университет,  
г. Комсомольск–на–Амуре

Защита состоится «25» ноября 2011 г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета ДМ005.007.02 в Институте автоматике и процессов управления Дальневосточного отделения РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5, аудитория 510.

E-mail: dm00500702@iacp.dvo.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института автоматике и процессов управления Дальневосточного отделения РАН

Автореферат разослан "       " октября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат физико-математических наук



О.В. Дудко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы диссертации.* При изучении вязкопластических течений используется главным образом математическая модель, в которой обратимыми деформациями пренебрегается (модель Шведова – Бингама). При этом в жестких областях (застойные зоны, жесткие ядра) распределение напряжений за исключением их граничных поверхностей не вычисляется и считается только, что напряжения не превышают предела текучести. Данное обстоятельство существенно упрощает математическую модель, но не позволяет рассчитывать поля остаточных деформаций и напряжений, возникающие после остановки течения и полной разгрузки. Более того, разгрузочная конфигурация интенсивно продеформированного тела в рамках модели жестковязкопластического тела принципиально не может быть рассчитана из-за предполагаемой недеформируемости в областях, которые полагаются жесткими. Современные технологии формирования изделий интенсивным формоизменением материалов требуют выполнения высокоточных допусков в геометрии изделий и предполагают контролируемый уровень остаточных напряжений. Следовательно, для таких целей оказывается необходимым учет деформируемости материалов в жестких областях и расчетная возможность учета упругого отклика материала в процессах разгрузки, как до момента снятия технологической оснастки, так и после. Последнее возможно только в рамках модели упруговязкопластического тела. Однако отсутствует возможность воспользоваться классическими моделями, так как последние предполагают малость деформаций, как обратимых, так и необратимых. Но в данном случае хотя бы необратимые деформации малыми считать нельзя, что с необходимостью приводит к модели больших упруговязкопластических деформаций. В фундаментальной механике деформирования за последние десятилетия такие модели разработаны. Здесь будет использоваться математическая модель, предложенная и апробированная в Институте автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН. В диссертации в рамках такой модели рассмотрен класс задач о вискозиметрических течениях между коаксиальными цилиндрическими поверхностями, указаны особенности постановок краевых задач теории. Полученные точные решения кроме самостоятельной ценности в развитии теории необходимы в качестве тестовых примеров для создания численно-аналитических методов решения. Все это составляет *актуальность* выбранной темы диссертации.

*Целью работы* является постановка и решение краевых задач теории упруговязкопластичности о зарождении, развитии, торможении до полной остановки вискозиметрических течений между вращающимися цилиндрами с последующей разгрузкой и расчетом сформированных таким способом остаточных

деформаций и напряжений.

К основным научным результатам диссертации относятся:

- постановки и решения новых краевых задач теории больших упруговязкопластических деформаций о вискозиметрических течениях материала в зазоре между двумя жесткими коаксиальными цилиндрическими поверхностями в случаях, когда одна из поверхностей (внутренняя или внешняя) поворачивается, а на другой выполнено условие жесткой спайки;
- решения аналогичных задач в случае винтового движения жестких поверхностей;
- аналитические решения ряда краевых задач, когда на одной из поверхностей возможно проскальзывание материала, а на другой выполнено условие жесткой спайки;
- точные решения задач о вискозиметрическом течении для случая, когда в окрестности одного из жестких цилиндров (как внутреннего, так и внешнего) находится слой эластичной неньютоновской смазки и на граничных поверхностях выполняются условия прилипания.

Научная новизна результатов, полученных в диссертации, заключается в следующем:

- получен ряд новых точных решений квазистатических краевых задач теории больших упруговязкопластических деформаций с указанием их постановок, связанных с возникновением, развитием течения, его остановкой и изменением направления движения;
- указаны закономерности продвижения границ областей вязкопластического течения, распределения в каждый момент времени напряжений, перемещений и деформаций на всех стадиях деформирования от зарождения течения до его остановки и полной разгрузки;
- установлены условия возникновения течения в слое смазки и в основном материале, указаны значения максимальной скорости поворота, при которой течение не выходит за слой смазки.

Достоверность полученных результатов базируется на использовании классических подходов неравновесной термодинамики и механики сплошных сред. Используемая математическая модель больших упруговязкопластических деформаций может считаться достаточно апробированной. Из нее в частном случае при переходе к малым деформациям следуют соотношения классической модели типа Прандтля – Рейса. При решении конкретных краевых задач дополнительные гипотезы не использовались, большинство полученных зависимостей являются точными в рамках используемой модели, а применяемые численно – аналитические процедуры являются общепризнанными.

**Применение и практическая ценность работы.** Опыты на вискозиметрические течения являются основными для определения реологических характеристик материалов. Полученные решения могут оказаться полезными при обработке результатов таких экспериментов. Современные теории смазки предполагают недеформируемость материалов вне слоя смазки, что, несомненно, является идеализацией процесса. Результаты диссертации позволяют отказаться от этого ограничения.

Другой практической ценностью полученных точных решений является возможность тестирования с их помощью алгоритмов и программ численных расчетов. Расчетная сложность интенсивного формоизменения с учетом вязкопластических течений продиктована не только существенной нелинейностью математической модели процесса, но и, главное, присутствием движущихся границ, разделяющих область деформирования на части, в которых деформирование или течение подчинено разным системам уравнений в частных производных. В таком случае требуются специальные алгоритмические приемы, тестирование которых возможно только при наличии точных решений.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях:

- IX и X Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006, 2011);
- Региональная научно-техническая конференция «Вологдинские чтения» (Владивосток, 2006);
- Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е.В. Золотова (Владивосток, 2008, 2010);
- Региональная научно-техническая конференция «Молодежь и научно-технический прогресс» (Владивосток, 2009);
- Всероссийская конференция «Успехи механики сплошных сред», приуроченная к 70-летию академика В.А. Левина (Владивосток, 2009);
- Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы механики и процессов управления», посвященная 75-летию со дня рождения академика В.П. Мясникова (Владивосток, 2011).

Диссертация в целом докладывалась на семинарах отдела механики деформируемого твердого тела ИАПУ ДВО РАН под руководством чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессора А.А. Буренина.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы (185 наименований). Общий объем работы — 127 страниц, в том числе 55 рисунков, включенных в текст.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 18 печатных работ. Список публикаций приведен в конце автореферата.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* приводится краткий обзор литературы, посвященный моделированию больших упругопластических деформаций. Теория больших деформаций упругопластических материалов является одним из интенсивно развивающихся направлений современной механики. Отмечается значительный вклад в развитие теории отечественных и зарубежных исследователей А.А. Буренина, Г.И. Быковцева, Д.Д. Ивлева, Л.В. Ковтанюк, В.Н. Кондаурова, С.Н. Коробейникова, В.И. Левитаса, А.А. Маркина, А.В. Муравлева, В.П. Мясникова, Н.В. Новикова, В.А. Пальмова, А.А. Поздеева, А.А. Рогового, П.В. Трусова, А.Д. Чернышова, А.В. Шитикова, R.J. Clifton, A.E. Green, R. Hill, J. Kratochvil, E.H. Lee, P.M. Naghdi, S. Nemat-Nasser, W. Prager, F. Sidoroff и др. На основе проведенного литературного обзора сформулированы цели и задачи диссертации. Здесь же приводится структура диссертации по главам.

*Первая глава* диссертации носит вводный характер. Здесь приводятся основные соотношения используемой модели больших упруговязкопластических деформаций, предложенной А.А. Бурениным, Г.И. Быковцевым, Л.В. Ковтанюк, В.П. Мясниковым и А.В. Шитиковым.

В §1.1 строится кинематика больших упругопластических деформаций. В декартовой прямоугольной системе пространственных эйлеровых координат  $x_i$  обратимая (упругая) и необратимая (пластическая) компоненты тензора полных деформаций Альманси  $d_{ij}$  определяются дифференциальными уравнениями изменения (переноса) в виде

$$\begin{aligned} \frac{De_{ij}}{Dt} &= \varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^p - \frac{1}{2}((\varepsilon_{ik} - \varepsilon_{ik}^p + z_{ik})e_{kj} + e_{ik}(\varepsilon_{kj} - \varepsilon_{kj}^p - z_{kj})), \\ \frac{Dp_{ij}}{Dt} &= \varepsilon_{ij}^p - p_{ik}\varepsilon_{kj}^p - \varepsilon_{ik}^p p_{kj}, \quad \frac{Dn_{ij}}{Dt} = \frac{dn_{ij}}{dt} - r_{ik}n_{kj} + n_{ik}r_{kj}, \\ \varepsilon_{ij} &= \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}), \quad v_i = \frac{du_i}{dt} = \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_{i,j}v_j, \quad u_{i,j} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \\ r_{ij} &= \omega_{ij} + z_{ij}(\varepsilon_{sk}, e_{sk}), \quad \omega_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} - v_{j,i}). \end{aligned} \tag{1}$$

В соотношениях (1)  $u_i, v_i$  — компоненты векторов перемещений и скоростей точек среды;  $e_{ij}, p_{ij}$  — их обратимые и необратимые составляющие;  $\frac{D}{Dt}$  — объективная производная тензоров по времени;  $\varepsilon_{ij}^p$  (источник в уравнении переноса для тензора необратимых деформаций) — компоненты тензора скоростей

пластических деформаций;  $r_{ij}$  — тензор вращения,  $z_{ij}$  — его нелинейная часть, которая полностью приведена в работе. Согласно уравнениям (1) при разгрузке ( $\varepsilon_{ij}^p = 0$ ) компоненты тензора необратимых деформаций  $p_{ij}$  изменяются так же, как при жестком движении тела. Компоненты тензора полных деформаций Альманси  $d_{ij}$ , выраженные через его составляющие  $e_{ij}$  и  $p_{ij}$ , представляются в форме

$$d_{ij} = e_{ij} + p_{ij} - \frac{1}{2}e_{ik}e_{kj} - e_{ik}p_{kj} - p_{ik}e_{kj} + e_{ik}p_{ks}e_{sj}. \quad (2)$$

В §1.2, следуя законам термодинамики, приводятся определяющие соотношения между напряжениями и деформациями и уравнение баланса энтропии. Принимается гипотеза о независимости термодинамического потенциала (свободной энергии) от необратимых деформаций. Для несжимаемой среды компоненты тензора напряжений Коши-Эйлера  $\sigma_{ij}$  связаны с обратимыми деформациями формулами, аналогичными формулам Мурнагана в нелинейной теории упругости

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &= -p\delta_{ij} + \frac{\partial W}{\partial d_{ik}}(\delta_{kj} - 2d_{kj}) && \text{при} && p_{ij} \equiv 0, \\ \sigma_{ij} &= -p_1\delta_{ij} + \frac{\partial W}{\partial e_{ik}}(\delta_{kj} - e_{kj}) && \text{при} && p_{ij} \neq 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Упругий потенциал  $W = W(J_1, J_2)$  для изотропной несжимаемой среды принимается в форме

$$\begin{aligned} W &= -2\mu J_1 - \mu J_2 + bJ_1^2 + (b - \mu)J_1J_2 - \chi J_1^3 + \dots, \\ J_k &= \begin{cases} L_k, & \text{при} & p_{ij} \equiv 0 \\ I_k, & \text{при} & p_{ij} \neq 0 \end{cases}, && L_1 = d_{jj}, && L_2 = d_{ij}d_{ji}, \\ I_1 &= e_{jj} - \frac{1}{2}e_{jk}e_{kj}, && I_2 &= e_{st}e_{ts} - e_{sk}e_{kt}e_{ts} + \frac{1}{4}e_{sk}e_{kt}e_{tm}e_{ms}. \end{aligned} \quad (4)$$

В зависимостях (3) и (4)  $p, p_1$  — добавочные гидростатические давления;  $W$  — упругий потенциал (плотность распределения свободной энергии);  $\mu, b, \chi$  — постоянные материала;  $L_1, L_2$  — инварианты тензора полных деформаций Альманси;  $I_1, I_2$  — инварианты тензора обратимых деформаций.

Считаем, что необратимые деформации в материале накапливаются при достижении напряженным состоянием поверхности нагружения, которая в условиях принимаемого принципа максимума Мизеса является пластическим потенциалом. В качестве такой поверхности используется условие пластичности Треска, обобщенное на случай учета вязких свойств материала на стадии

пластического течения материала

$$\max |\sigma_i - \sigma_j| = 2k + 2\eta \max |\varepsilon_k^p|, \quad (5)$$

где  $k$  — предел текучести,  $\eta$  — коэффициент вязкости,  $\sigma_i, \varepsilon_k^p$  — главные значения тензоров напряжений и скоростей пластических деформаций.

Скорости необратимых деформаций связаны с напряжениями ассоциированным законом пластического течения

$$\varepsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}}, \quad f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p) = k, \quad \lambda > 0. \quad (6)$$

Во *второй главе* диссертации получены точные решения задач о вискозиметрическом течении упруго-вязкопластического материала между двумя жесткими цилиндрическими поверхностями. Деформирование происходит за счет поворота одного из цилиндров, на граничных поверхностях выполняются условия прилипания. В §2.1 приводится постановка задачи в случае, когда поворачивается внутренний жесткий цилиндр радиуса  $r = r_0$ , а внешний цилиндр радиуса  $r = R$  остается неподвижным (рис. 1):

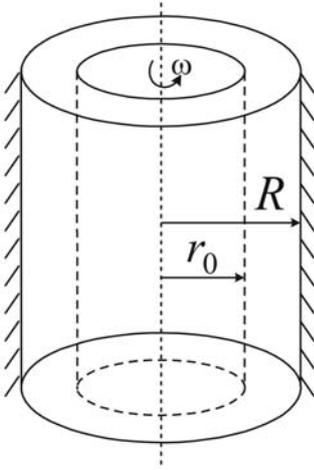


Рис. 1

Считается, что все точки среды, как граничные, так и остальные, движутся по окружностям. Компоненты вектора перемещений в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$  имеют вид

$$u_r = r(1 - \cos \theta), \quad u_\varphi = r \sin \theta, \quad (8)$$

где  $\theta(r, t)$  — центральный угол закручивания.

Вначале решается задача об упругом равновесии материала, предшествующем вязкопластическому течению. Вычислен угол поворота внутреннего жесткого цилиндра, при котором начинается течение в окрестности внутренней жесткой поверхности  $r = r_0$ .

Дальнейшее деформирование материала в условиях развивающегося вязкопластического течения изучается в §2.2. Для нахождения параметров напряженно-деформированного состояния уравнения равновесия (квазистатическое приближение) интегрируются в области вязкопластического течения  $r_0 \leq r \leq r_1(t)$  и в области обратимого деформирования  $r_1(t) \leq r \leq R$ . Для определения упругопластической границы  $r_1(t)$  вследствие непрерывности напряжений, деформаций, перемещений и скоростей получено алгебраическое уравнение. На рис. 2 показано развитие области вязкопластического течения  $\frac{r_1}{R}$  в

зависимости от скорости поворота жесткого цилиндра. Распределение угла поворота в момент начала течения приведено на рис. 3, в условиях развитого вязкопластического течения — на рис. 4.

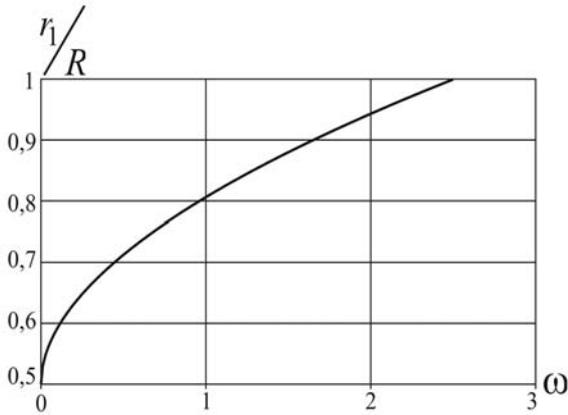


Рис. 2

и в момент полной разгрузки  $t = t_*$  становится равным нулю во всей области деформирования  $r_0 \leq r \leq R$ .

В §2.3 рассматривается разгрузка материала и повторное вязкопластическое течение. В случае остановки жесткого цилиндра параметры напряженно-деформированного состояния перестают изменяться, область вязкопластического течения при этом не увеличивается. Если далее цилиндр поворачивать в обратную сторону, то в материале сначала происходит разгрузка, при которой напряжение  $\sigma_{r\varphi}$  уменьшается по абсолютной величине,

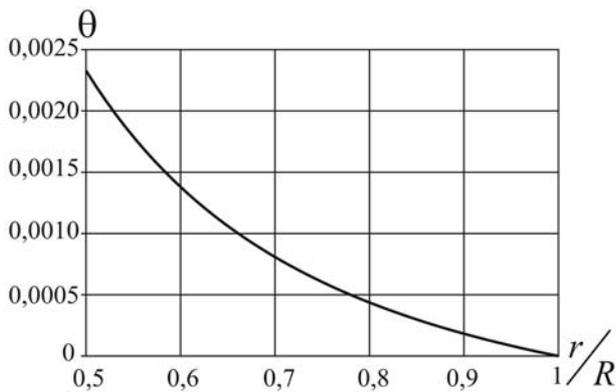


Рис. 3

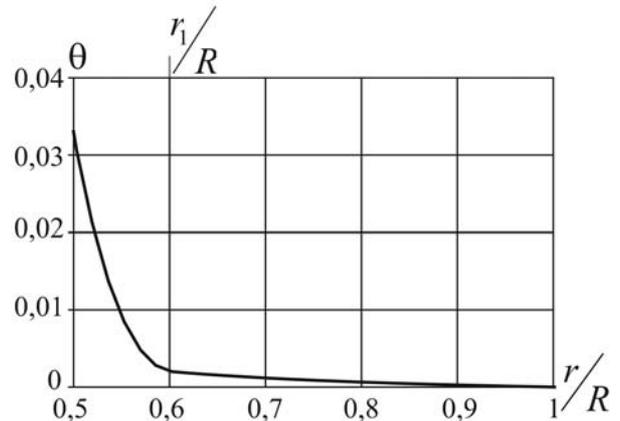


Рис. 4

При дальнейшем уменьшении угла поворота напряжения увеличиваются, и в некоторый момент времени  $t = t'_2$  в окрестности поверхности  $r = r_0$  вновь начинается пластическое течение. Область деформирования в этом случае разбивается на части: область вязкопластического течения  $r_0 \leq r \leq r_2(t)$ , область с не изменяющимися накопленными при первом повороте необратимыми деформациями  $r_2(t) \leq r \leq r_1$  и область упругого деформирования  $r_1 \leq r \leq R$ . Начиная с момента времени  $t = t'_3$ , в который граница  $r_2(t)$  достигает поверхности  $r = r_1$ , первоначально ограничивающей пластическую область, в материале будут три области: области вязкопластического течения  $r_0 \leq r \leq r_1$  и  $r_1 \leq r \leq r_2(t)$ , в которых пластические деформации находятся по-разному, и область обратимого деформирования  $r_2(t) \leq r \leq R$ . Распределения функции  $\theta(r, t)$  при разгрузке

и движении жесткого цилиндра в обратном направлении показаны на рис. 5 и рис. 6.

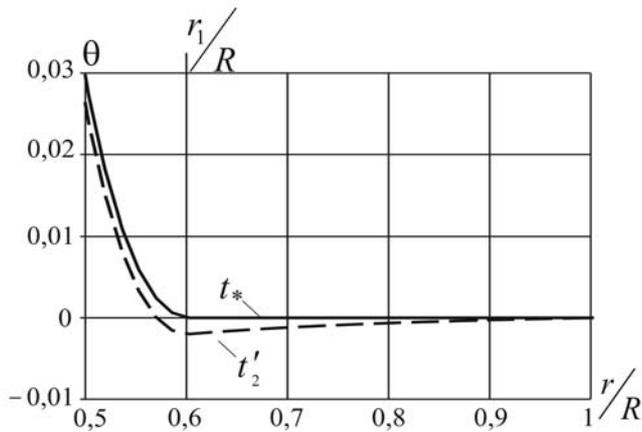


Рис. 5

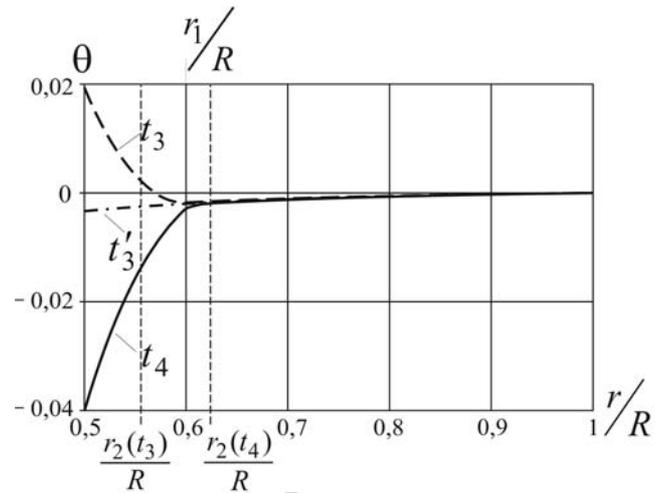


Рис. 6

В §2.4 решена аналогичная задача в случае поворота внешнего жесткого цилиндра. Несмотря на различие в перемещениях и скоростях, область вязкопластического течения  $r_0 \leq r \leq r_1(t)$  развивается так же, как и при повороте внутреннего цилиндра. Рассчитаны поля перемещений, деформаций, напряжений и скоростей. Соответствующие графики приведены в тексте диссертации.

В *третьей главе* диссертации изучается винтовое вязкопластическое течение материала, когда к повороту жесткого цилиндра добавляется перемещение вдоль его оси. В §3.1 рассмотрено зарождение и развитие вязкопластического течения, в §3.2 — разгрузка и повторное течение. Случай винтового движения внешнего жесткого цилиндра исследуется в §3.3. Рассчитаны параметры напряженно-деформированного состояния на всех стадиях процесса, включающего упругое деформирование, вязкопластическое течение, разгрузку и повторное течение при движении жесткого цилиндра в обратную сторону. Получены закономерности продвижения упругопластических границ. Развитие областей вязкопластического течения качественно не отличается от случая, когда жесткий цилиндр только поворачивается.

В *четвертой главе* диссертации исследуется влияние пристенного скольжения (§4.1) и слоя смазки (§4.2) на вискозиметрическое течения материала. В §4.1 решены краевые задачи о вязкопластическом течении между жесткими коаксиальными цилиндрами, когда на одном из них (подвижном или неподвижном) возможно проскальзывание материала. Считаем, что при обратимом деформировании на обеих жестких поверхностях выполняются условия прилипания, а при пластическом течении материала на одной из них происходит его

проскальзывание:

обратимое деформирование :

$$|\sigma_{r\varphi}| \leq \gamma |\sigma_{rr}|, \quad (9)$$

вязкопластическое течение :

$$|\sigma_{r\varphi}| = \gamma |\sigma_{rr}| + \xi |[\omega]|,$$

где  $\gamma$  — коэффициент сухого трения,  $\xi$  — коэффициент вязкого трения,  $[\omega]$  — разность угловых скоростей жесткого цилиндра и материала в его окрестности.

Изучается деформирование материала в случае равноускоренного поворота одного из жестких цилиндров ( $\omega = \alpha t$ ), затем, с момента времени  $t = t'_1$ , рассматривается торможение до полной остановки ( $\omega = \alpha t'_1 - \beta(t - t'_1)$ ). Область деформирования при этом состоит из области продолжающегося вязкопластического течения  $r_0 \leq r \leq r_2$ , области  $r_2 \leq r \leq r_1$ , в которой пластические деформации перестают изменяться, и области обратимого деформирования  $r_1 \leq r \leq R$ . Граница  $r_2$  является поверхностью разрыва скоростей пластических деформаций. На рис. 7 показана закономерность продвижения границы  $\frac{r_2}{R}$  в процессе торможения в случае, когда поворачивается внешний цилиндр, а проскальзывание происходит на внутреннем ( $\tau = \alpha t^2$ ). Граница  $r_2$ , в отличие от случая полного прилипания, достигает поверхности  $r = r_0$  ( $t = t'_2$ ) раньше, чем скорость жесткого цилиндра станет равной нулю. При этом в материале будет происходить разгрузка с уменьшением по модулю напряжения  $\sigma_{r\varphi}$ , пока жесткий цилиндр полностью не остановится ( $t = t'_3$ ,  $|\sigma_{r\varphi}|_{r=r_0} = k$ ). Рассмотрен поворот цилиндра в обратную сторону, при котором происходит дальнейшая разгрузка и повторное пластическое течение. Графики функции  $\theta(r)$  в процессе всего деформирования приведены на рис. 8 и рис. 9.

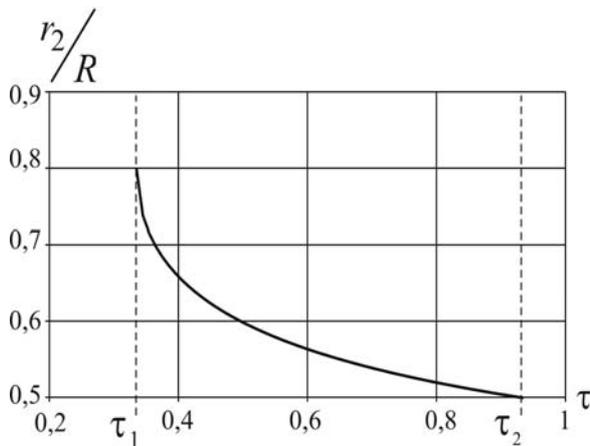


Рис. 7

В §4.2 приводятся решения задач о вискозиметрических течениях, когда в окрестности одного из жестких цилиндров находится слой эластичной неньютоновской смазки. Считается, что на поверхности  $r = r_1$ , разделяющей основной материал и слой, а также на жестких стенках выполняются условия прилипания. Изучены условия возникновения течения в слое смазки и в основном материале. Характерные графики движения областей вязкопластического течения аналогичны представленному на рис. 2. Указаны максимальные значения скоростей поворота жестких цилиндров, при которых течение не выходит

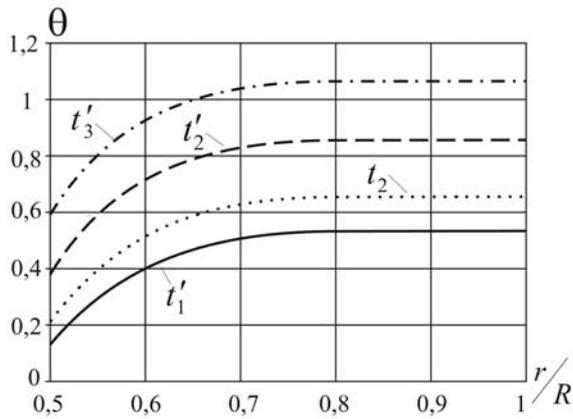


Рис. 8

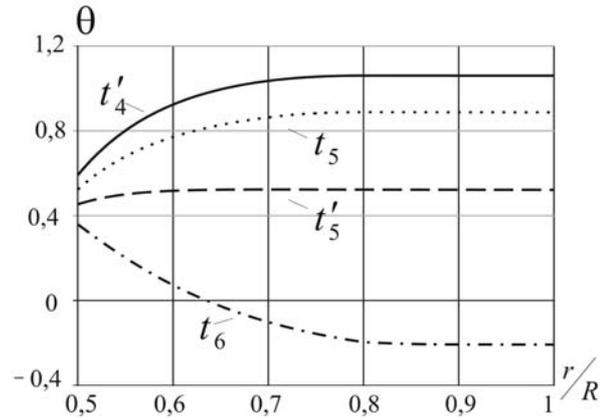


Рис. 9

за слой смазки. На рис. 10 показано распределение угла поворота в зависимости от радиуса в случае, когда поворачивается внутренний цилиндр, а слой смазки находится у внешней жесткой поверхности.

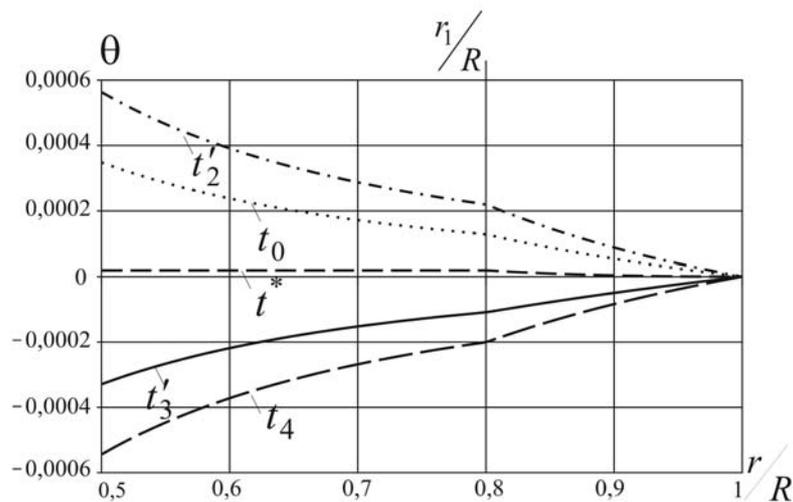


Рис. 10

В *заключении* приведены *основные результаты диссертации*, состоящие в следующем:

1. В рамках модели больших упруговязкопластических деформаций проведена постановка и получены точные решения ряда краевых задач о вискозиметрическом течении упруговязкопластического материала между жесткими коаксиальными цилиндрическими поверхностями, когда деформирование осуществляется за счет поворота каждого из цилиндров. Отдельно рассмотрены случай прилипания на жестких поверхностях и случай проскальзывания материала на них.
2. Указаны условия зарождения и закономерности развития вязкопластических течений. Показано, что пластическое течение всегда начинается в окрестности внутреннего жесткого цилиндра, и области вязкопластическо-

го течения развиваются одинаково как при движении внутреннего цилиндра, так и при движении внешнего. Рассчитаны поля напряжений, деформаций, перемещений и скоростей.

3. Получены аналитические решения задач о винтовом вязкопластическом течении. Рассчитаны параметры напряженно-деформированного состояния на всех стадиях процесса, включающего упругое деформирование, вязкопластическое течение, разгрузку и повторное течение при движении жесткого цилиндра в обратную сторону. Получены закономерности развития областей вязкопластического течения.
4. Изучено влияние пристенного скольжения на деформирование материала. Показано, что при остановке жесткого цилиндра, в отличие от случая полного прилипания, происходит разгрузка, при которой напряжения уменьшаются до уровня, предшествующего началу пластического течения.
5. Получены решения задач, когда в окрестности одного из жестких цилиндров находится слой эластичной неньютоновской смазки. Изучены условия возникновения течения в слое смазки и в основном материале. Указаны значения максимальной скорости, при которой течение не выходит за слой смазки.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. *Буренин А.А., Ковтанюк Л.В, Устинова А.С.* Вискозиметрическое течение упруговязкопластического материала между жесткими коаксиальными цилиндрическими поверхностями // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2007. № 1. С. 18 – 25.
2. *Буренин А.А., Ковтанюк Л.В, Устинова А.С.* Об учете упругих свойств неньютоновского материала при его вискозиметрическом течении // Прикл. механика и техн. физика. 2008. Т. 49, № 2. С. 143 – 151.
3. *Буренин А.А., Ковтанюк Л.В, Устинова А.С.* Вискозиметрическое течение упруговязкопластической среды, ослабленной слоем более податливого материала // Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2010. № 2 (8). С. 83 – 99.
4. *Ковтанюк Л.В., Устинова А.С.* Об учете упругих свойств материалов при их вязкопластическом течении // IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского, 2006. Т. 3. С. 111 – 112.
5. *Устинова А.С.* О влиянии упругих свойств среды на вискозиметрическое ее течение между вращающимися цилиндрами // Материалы конференции «Вологдинские чтения». Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006. С. 44 – 45.

6. Буренин А.А., Ковтанюк Л.В., Устинова А.С. Вискозиметрическое течение неньютоновского материала между жесткими коаксиальными цилиндрами // V Всероссийская научная конференция «Механика микронеоднородных материалов и разрушение»: тезисы докладов. Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2008. С. 49.
7. Устинова А.С., Ковтанюк Л.В. Вискозиметрические течения неньютоновского эластичного материала // XXXIII Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е.В. Золотова: тезисы докладов. Владивосток: Дальнаука, 2008. С. 237.
8. Буренин А.А., Ковтанюк Л.В., Устинова А.С. Большие деформации, вязкопластическое изотермическое течение и разгрузка материалов во вращающейся волоке // Сборник статей "Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в машиностроении". Выпуск 3. Часть 1. Комсомольск-на-Амуре: Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН, 2009. С. 9 – 25.
9. Буренин А.А., Устинова А.С. Развитие и торможение винтового вязкопластического течения с расчетом упругого отклика после остановки течения и разгрузки // Успехи механики сплошных сред: к 70-летию академика В.А. Левина: сб. научн. тр. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 91 – 102.
10. Устинова А.С. Вискозиметрические течения неньютоновских сред между жесткими коаксиальными цилиндрами // Молодежь и научно-технический прогресс: материалы региональной научно-практической конференции. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. С. 53–55.
11. Буренин А.А., Ковтанюк Л.В., Устинова А.С. Вискозиметрические течения неньютоновских материалов, находящихся между жесткими цилиндрическими поверхностями, при их винтовом движении // Всероссийская конференция «Новые математические модели механики сплошных сред: построение и изучение», приуроченная к 90-летию акад. Л.В. Овсянникова: тезисы докладов. Новосибирск: Изд-во Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2009. С. 41.
12. Буренин А.А., Ковтанюк Л.В., Устинова А.С. Влияние упругих свойств материалов на их вискозиметрические течения // Успехи механики сплошных сред. Тезисы Всероссийской конференции, приуроченной к 70-летию академика В.А. Левина. Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 79.
13. Ковтанюк Л.В., Устинова А.С. Вискозиметрическое течение упруговязкопластической среды, ослабленной цилиндрическим слоем более податливого материала // Актуальные проблемы прикладной математики, информатики и механики: сборник трудов Международной конференции. Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2009. Ч. 1. С. 234 – 237.

14. Буренин А.А., Гуленина К.С., Ковтанюк Л.В., Устинова А.С. Особенности постановок краевых задач вязкопластичности при учете упругого отклика застойных зон и жестких ядер // Материалы XVI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2009), Алушта. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. С. 160-161.
15. Буренин А.А., Ковтанюк Л.В., Устинова А.С. Вязкопластическое течение трехслойного материала между коаксиальными цилиндрами // XXXV Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е.В. Золотова: сб. докл. [Электронный ресурс]. Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2010. С. 469 – 475.
16. Устинова А.С. Развитие вискозиметрического вязкопластического течения в трехслойном материале // Международный симпозиум «Образование, наука и производство: проблемы, достижения и перспективы»: Материалы Всероссийской конференции «Школа по фундаментальным основам моделирования обработки материалов давлением» и научно-технической конференции «Математическое, вычислительное и информационное обеспечение технологических процессов и систем». Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнаАГТУ», 2010. Т. 4. С. 166-168.
17. Ковтанюк Л.В., Устинова А.С. Вискозиметрическое течение материала при наличии слоя эластичной неньютоновской смазки // Математическое моделирование и краевые задачи: Труды седьмой Всероссийской научной конференции с международным участием. Ч. 1: Математические модели механики, прочности и надежности элементов и конструкций. Самара: СамГТУ, 2011. С. 122 – 124.
18. Буренин А.А., Ковтанюк Л.В., Устинова А.С. Деформирование упруговязкопластического материала между жесткими коаксиальными цилиндрами при наличии эластичной неньютоновской смазки // Фундаментальные и прикладные вопросы механики и процессов управления: Сб. докл. Всероссийской научной конференции, посвященной 75-летию академика В.П. Мясникова. [Электронный ресурс]. Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2011. С. 41-46.

**Личный вклад автора.** Работы [5, 10, 16] выполнены автором самостоятельно. В работах [1-4, 6-9, 11-15, 17, 18] автор участвовала в постановке задач, разработке алгоритмов решения и выполняла все необходимые вычисления.

УСТИНОВА АЛЕКСАНДРА СЕРГЕЕВНА  
ВИСКОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕЧЕНИЯ ЭЛАСТИЧНЫХ  
НЕНЬЮТОНОВСКИХ СРЕД

Автореферат

Подписано к печати 10.10.2011.

Усл. п.л. 0.8

Уч.-изд. л. 0.7

Формат 60×84/16

Тираж 100.

Заказ 35.

---

Издано ИАПУ ДВО РАН. Владивосток, Радио, 5.

Отпечатано участком оперативной печати ИАПУ ДВО РАН

Владивосток, Радио, 5.