МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ Б С С Р
БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

Н.Б. ЛЕМБОВИЧ

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ПЕРЕРАБОТАННОГО ПЛАСТИЧНОГО ТОРФА В ШНЕКЕ И ДРУГИХ УСТРОЙСТВАХ ТОРФЯНЫХ МАШИН

(на русском языке)

Специальность 05.179 – "Машины для добычи и транспортирования торфа"

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Минск, 1972

Работа выполнена на кафедре "Теоретическая механика" Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института

Научный руководитель -

доктор технических наук,
профессор А.Х.КИМ

Официальные оппоненты:

доктор технических наук
Н.С.ПАНКРАТОВ

доктор технических наук
З.П.ШУЛЬМАН

Ведущая организация -

Институт "Белгипроторф"

Автореферат разослан "___" ______________ 1972 г.

Защита состоится "7" апреля 1972 г.

на заседании объединенного Совета по присуждению ученых степеней по механико-технологическим, машиностроительным, автотракторным и торфяным специальностям при Белорусском ордена Трудового Красного Знамени политехническом институте (Минск-220027, Ленинский проспект, 65, главный учебный корпус). С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института за 10 дней до защиты. О дне и времени защиты будет сообщено в газете "Вечерний Минск".

Отзывы в 2-х экземплярах просим направлять по адресу: г.Минск-220027, Ленинский проспект, 65, Белорусский ордена Трудового Красного Знамени политехнический институт, Ученому секретарю Совета.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук, доцент Н.В.КИСЛОВ

ВВЕДЕНИЕ

В Директивах XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971-1975 гг предусматривается увеличение добычи торфа на 35-38%. Добыча торфа в БССР в 1975 году составит 15,7 млн.тонн. Такие высокие темпы развития торфяной промышленности ставят ряд сложных и ответственных задач по глубокому изучению процессов движения торфа в различных устройствах торфяных машин. Ясно, что простое эмпирическое изучение основных операций по добыче и переработке торфа часто оказывается мало эффективным и приводит к получению ограниченных результатов, в то время как некоторые операции можно подвергнуть математическому анализу и получить более общие решения. Последнее стало возможным в связи с установлением структурно-реологической модели торфа.

Многочисленными исследованиями профессора М.П.Воларовича и его сотрудников доказано, что переработанный торф является вязкопластичной системой Шведова-Бингама. Новейшие исследования в области реологии торфа дают основания полагать, что некоторые торфяные системы при определенных условиях следует отнести к степенным неньютоновским системам. Следовательно, реология - наука о деформации и течении - дает ключ к пониманию многих явлений, связанных с движением переработанного торфа в каналах торфяных машин.

В различных областях производства для переработки и транспортировки дисперсных систем, в том числе и торфа, широко применяются шнековые механизмы и насадки различной геометрии. Однако вопросы движения дисперсных систем в шнеках и некоторых насадках изучены недостаточно. Поэтому нами проведены теоретические и экспериментальные исследования движения переработанного пластичного торфа в шнековом механизме, между двумя наклонными плоскостями и в параболическом конфузоре.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка цитированной литературы - 170 названий. Объём работы - 279 страниц, в числе которых 19 таблиц и 110 иллюстраций.

В первой главе приведен краткий обзор работ по реофизике торфа, реодинамике торфяных и других дисперсных систем при различных граничных условиях, пристенному скольжению и обзор работ по исследованию шнеков. Отмечено, что исследованию шнека посвящены работы М.П.Воларовича, А.Х.Кима, Ф.А.Опейко, А.И.Ивановой, Н.В.Тябина, В.А.Силина, С.Г.Солопова, М.Е.Никифорова, А.М.Григорьева, Н.А.Кот, З.А.Злотарского, Э.Н.Уютовой, С.А.Бостанджияна, Р.В.Торнера, Гардея, Ототаке, Мори, Мак-Келви, Крюгера, Майлефера и др.

В одних работах движение дисперсной системы в шнеке рассматривается как движение одной частицы без учета взаимодействия с остальными частицами системы; в других - как движение в канале между двумя параллельными пластинами, одна из которых подвижна, а в зазоре между ними существует постоянный по величине градиент давления. Такой подход к решению задачи является упрощенным и не учитывает геометрии шнека. Кроме того, при определенных условиях движение торфа в шнеке и других каналах торфяных машин сопровождается пристенным скольжением, что необходимо учитывать, так как пренебрежение этим явлением приводит к ошибочным результатам.

Во второй главе дан вывод уравнений реодинамики вязко-пластичной и степенной неньютоновской системы в винтовых координатах.

Совместным решением реологического уравнения состояния для вязко-пластичной системы

$$П_0 = 2\left(\eta + \frac{\tau_0}{h}\right)\bar{\Phi}_0 \qquad (1)$$

с уравнением Коши

$$div\, П = \rho_0(\bar{w} - \bar{q}) \qquad (2)$$

получено уравнение реодинамики вязко-пластичной среды, которое в произвольных криволинейных координатах без учета объёмных сил имеет вид

$$2\left(\eta + \frac{\tau_0}{h}\right)\nabla_i \varepsilon_k^i +$$

$$+ \frac{2\tau_0}{h^2}\frac{\partial h}{\partial x^i}\varepsilon_k^i - \frac{\partial p}{\partial x^k} = \rho_0 g_{\lambda k}\left(\frac{\partial V^\lambda}{\partial t} + V^\alpha \nabla_\alpha V^\lambda\right). \qquad (3)$$

Совместным решением реологического уравнения состояния степенной неньютоновской системы, обладающей пределом упругости,

$$\Pi_0 = 2\left(\kappa h^{n-1} + \frac{\tau_0}{h}\right)\dot{\Phi}_0 \qquad (4)$$

с уравнением (2) и проектированием на оси криволинейной системы координат, получено общее уравнение реодинамики степенной неньютоновской системы в криволинейных координатах

$$2\left[\kappa(n-1)h^{n-2} - \frac{\tau_0}{h^2}\right]\frac{\partial h}{\partial x^\beta}\varepsilon_\kappa^\beta + 2\left(\kappa h^{n-1} + \frac{\tau_0}{h}\right)\nabla_\beta \varepsilon_\kappa^\beta -$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x^\kappa} = \rho_0 g_{\tau\kappa}\left(\frac{\partial V^\tau}{\partial t} + V^\alpha \nabla_\alpha V^\tau\right). \qquad (5)$$

При решении конкретных задач течения необходимо выбирать определенную систему координат и определять в ней компоненты тензорных величин. Выбор этой системы зависит главным образом от геометрии границ реологической среды. Поэтому при рассмотрении движения переработанного торфа в шнеке были использованы винтовые оси координат z, φ, $\bar{z}$. Контравариантные составляющие скорости по осям обозначены через V^z, V^φ и $V^{\bar{z}}$, причем, $V^z=0, V^{\bar{z}}=\omega\beta$. Выразив в винтовых координатах компоненты смешанного тензора скоростей деформации и их тензорные производные и подставив в уравнение (3), получаем уравнения движения в проекциях на винтовые оси координат:

а) для вязко-пластичной системы:

на ось z

$$\frac{2\eta\beta}{z}\frac{\partial V^\varphi}{\partial \bar{z}} + \frac{(\pm\tau_0)2\beta}{z^2+\beta^2} - \frac{\partial P}{\partial z} = -\rho_0 z\,(V^\varphi)^2; \qquad (6)$$

на ось φ

$$(h^2\eta + \tau_0 h)\left[\frac{(\beta^2+3z^2)}{z}\frac{\partial V^\varphi}{\partial z} + (\beta^2+z^2)\frac{\partial^2 V^\varphi}{\partial z^2} - \frac{(z^2+\beta^2)^2}{z^2}\frac{\partial^2 V^\varphi}{\partial \bar{z}^2}\right] -$$

$$-h^2\frac{\partial P}{\partial \varphi} + (\pm\tau_0)\left[\frac{z^4-\beta^4}{z^2}\frac{\partial V^\varphi}{\partial z}\frac{\partial V^\varphi}{\partial \bar{z}} + \frac{(z^2+\beta^2)}{z}\frac{\partial V^\varphi}{\partial z}\frac{\partial^2 V^\varphi}{\partial \bar{z}\partial z} +\right.$$

$$\left.+\frac{(z^2+\beta^2)^3}{z^3}\frac{\partial V^\varphi}{\partial \bar{z}}\frac{\partial^2 V^\varphi}{\partial \bar{z}^2}\right] = \omega\beta\rho_0\frac{(z^2+\beta^2)^2}{z^2}\left(\frac{\partial V^\varphi}{\partial \bar{z}}\right)^3; \qquad (7)$$

на ось z

$$(\eta h^2+\tau_0 h)\frac{\beta}{r}\left[\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial V^\varphi}{\partial r}\right)+\frac{\beta^2+r^2}{r}\frac{\partial^2 V^\varphi}{\partial z^2}\right]-(\pm\tau_0)\beta\left\{\frac{\partial V^\varphi}{\partial r}\left[\frac{\partial^2 V^\varphi}{\partial r\partial z}\frac{r^2+\beta^2}{r}-\frac{(r^2-\beta^2)}{r^2}\frac{\partial V^\varphi}{\partial z}\right]+\frac{(r^2+\beta^2)}{r^3}\frac{\partial V^\varphi}{\partial z}\frac{\partial^2 V^\varphi}{\partial z^2}\right\}-\frac{\partial P}{\partial z}h^2=\rho_0\omega\beta^2 h^2\frac{\partial V^\varphi}{\partial z}; \quad (8)$$

б) для степенной неньютоновской системы без учета массовых сил:

на ось r

$$2kh^{n-1}\frac{\beta}{r}\frac{\partial V^\varphi}{\partial z}-\frac{\partial P}{\partial r}=0; \quad (9)$$

на ось φ

$$2k(n-1)h^{n-2}\left[\frac{\partial h}{\partial r}\frac{(r^2+\beta^2)}{2}\frac{\partial V^\varphi}{\partial r}+\frac{\partial h}{\partial z}\frac{(r^2+\beta^2)^2}{2r^2}\frac{\partial V^\varphi}{\partial z}\right]+$$

$$+2kh^{n-1}\left\{\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\frac{(r^2+\beta^2)}{2}\frac{\partial V^\varphi}{\partial r}\right]+\frac{(r^2+\beta^2)}{2r^2}\frac{\partial^2 V^\varphi}{\partial z^2}\right\}-\frac{\partial P}{\partial \varphi}=0; \quad (10)$$

на ось z

$$2k(n-1)h^{n-2}\left[\frac{\beta}{2}\frac{\partial h}{\partial r}\frac{\partial V^\varphi}{\partial r}+\frac{\partial h}{\partial z}\beta\frac{(r^2+\beta^2)}{2r^2}\frac{\partial V^\varphi}{\partial z}\right]+$$

$$+2kh^{n-1}\left[\frac{\beta}{2r}\frac{\partial V^\varphi}{\partial r}+\frac{\beta}{2}\frac{\partial^2 V^\varphi}{\partial r^2}+\frac{\beta(r^2+\beta^2)^2}{2r^2}\frac{\partial^2 V^\varphi}{\partial z^2}\right]-\frac{\partial P}{\partial z}=0, \quad (11)$$

где

$$h=\sqrt{\frac{(r^2+\beta^2)^2}{r^2}\left(\frac{\partial V^\varphi}{\partial z}\right)^2+(r^2+\beta^2)\left(\frac{\partial V^\varphi}{\partial z}\right)^2}.$$

Третья глава посвящена теоретическому исследованию движения переработанного торфа в шнеке, между двумя наклонными плоскостями и в плоском параболическом конфузоре.

Рассмотрен вопрос о стационарном изотермическом движении вязко-пластичной несжимаемой системы (в частности торфа) в шнеке в предположении, что система скользит относительно твердых стенок.

Сделаем ряд допущений для упрощения уравнения (7).

Составляющая V^{φ} является функцией от r и z. Интенсивность скоростей деформации h также зависит только от r и z. Следовательно, производная $\frac{\partial P}{\partial \varphi}$ равна постоянной величине, которую мы полагаем равной нулю. Кроме того, считаем, что $\frac{\partial V^{\varphi}}{\partial z} \gg \frac{\partial V^{\varphi}}{\partial r}, \frac{\partial V^{\varphi}}{\partial r \partial z} = 0$ и силы инерции ничтожно малы.

В результате уравнение (7) получено в виде

$$\frac{(r^2+\beta^2)^2}{r^2}\frac{\partial^2 V^{\varphi}}{\partial z^2}+(r^2+\beta^2)(1+a)\frac{\partial^2 V^{\varphi}}{\partial r^2}+\frac{\beta^2(1+2a)+r^2(3+2a)}{r}\frac{\partial V^{\varphi}}{\partial r}=0, \qquad (12)$$

где

$$a=\frac{\tau_0}{\eta h}\ ; \quad a \gg 1{,}5.$$

Значение h считаем постоянным и равным его среднему значению. Введением безразмерных параметров $\lambda=\frac{r}{R_2}$ и $\nu=\frac{z}{H}$ получено уравнение (12) в виде

$$\frac{1}{H^2}\frac{\partial^2 V^{\varphi}}{\partial \nu^2}+\frac{a\lambda^2}{\lambda^2 R_2^2+\beta^2}\frac{\partial^2 V^{\varphi}}{\partial \lambda^2}+\frac{2a\lambda}{\lambda^2 R_2^2+\beta^2}\frac{\partial V^{\varphi}}{\partial \lambda}=0. \qquad (13)$$

Решение этого уравнения найдено по методу Фурье

$$V^{\varphi}=\omega+\sum_{i=0}^{\infty}\left[A_i\sin(Hk_i\nu)+B_i\cos(Hk_i\nu)\right]\frac{1}{\sqrt{x_i}}\left[J_{\zeta_i}(x_i)+C_iK_{\zeta_i}(x_i)\right], \qquad (14)$$

где

$$x_i=\frac{k_iR_2\lambda}{\sqrt{a}}\ ; \quad \zeta_i^2=\frac{k_i^2\beta^2}{a}+\frac{1}{4}.$$

Цилиндрические функции $J_{\zeta_i}(x_i)$ и $K_{\zeta_i}(x_i)$ определяются по формулам

$$J_{\zeta_i}(x_i) = \sum_{\ell=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{x_i}{2}\right)^{\zeta_i + 2\ell}}{\Gamma(\ell+1)\Gamma(\ell+\zeta_i+1)} \;;$$

$$K_{\zeta_i}(x_i) = \frac{\pi}{2} \; \frac{J_{\zeta_i}(x_i) - J_{\zeta_i}(x_i)}{\sin \zeta_i \pi} \,.$$

Получено выражение для составляющей скорости, направленной по касательной к лопасти шнека,

$$V_{отн} = -\sum_{i=0}^{\infty}\left[A_i \sin(H\kappa_i \nu) + B_i \cos(H\kappa_i \nu)\right]\left[J_{\zeta_i}(x_i) + C_i K_{\zeta_i}(x_i)\right]\sqrt{\frac{r^2+\beta^2}{x_i}} \,. \qquad (15)$$

Произвольные постоянные найдены из условия скольжения торфа относительно лопасти, вала и кожуха шнека.

Для установления профиля скоростей точек движущегося в шнеке вязко-пластичного торфа на ЭВМ "Одра" был выполнен численный пример. Результаты вычислений показали, что эпюра относительных скоростей точек, расположенных вдоль радиуса, линейна, а расположенных вдоль прямой, параллельной оси шнека, имеет S-образную форму. Такой характер эпюр скоростей можно наблюдать при движении торфа большой влажности при достаточно большом противодавлении.

Как показывают экспериментальные исследования движения в шнеке непереработанного торфа влажностью 80–87%, эпюра относительных скоростей частиц, расположенных вдоль оси, имеет форму, близкую к параболической.

Получено решение задачи движения в шнеке переработанного торфа влажностью 80–87%. Выражение для полной энергии принято в виде

$$A = \int_0^{2\pi}\int_{R_1}^{R_2}\int_0^{H}\left(\tau_0 h + \frac{\eta h^2}{2}\right) r\,dr\,dz\,d\varphi \,. \qquad (16)$$

Относительная скорость выражена через функцию, удовлетворяющую граничным условиям,

$$V_{отн} = \left[a + \ell\,(Hz - z^2)\right] r,$$

где a и ℓ – постоянные, которые найдены из условий скольжения системы относительно лопасти шнека и постоянства расхода через поперечное сечение шнека.

Задача решена с точностью до третьей координатной функции

$$V_{отн} = \left\{ a + \left[\ell\,(Hz - z^2) + \lambda_1 (Hz - z^2)^2 + \lambda_2 (Hz - z^2)^3 \right] \right\} r. \qquad (17)$$

Из условия минимума полной энергии получены

$$\lambda_1 = -\frac{9\ell}{H^2} \quad \text{и} \quad \lambda_2 = \frac{22\ell}{H^4}.$$

Рассмотрена задача стационарного изотермического движения в шнеке неньютоновской системы, подчиняющейся степенному закону.

Многие дисперсные системы, которые при больших скоростях сдвига ведут себя как тело Шведова-Бингама, при малых скоростях сдвига подчиняются степенному закону. Это утверждение можно отнести и к некоторым торфяным системам.

Для решения поставленной задачи использовано уравнение (10), которое при допущениях, принятых ранее, примет вид

$$\frac{\partial^2 V^2}{\partial z^2} + \frac{r^2}{n(r^2+\beta^2)}\frac{\partial^2 V^\varphi}{\partial r^2} + \frac{\left[(r^2+\beta^2)(2+n) - 2n\beta^2\right] r}{n(r^2+\beta^2)^2}\frac{\partial V^\varphi}{\partial r} = 0. \qquad (18)$$

Уравнение (18) решено методом Фурье. Выражение для относительной скорости получено в виде

$$V_{отн} = -\sum_{i=0}^{\infty}\left[A_i \sin(K_i z) + B_i \cos(K_i z)\right] \sum_{\lambda=2}^{\infty} C_{\lambda i}\,\frac{\beta^\lambda}{r^\lambda}\sqrt{r^2+\beta^2}. \qquad (19)$$

Здесь коэффициенты $C_{\lambda i}$ связаны рекуррентной формулой

$$\left[\lambda(\lambda+n-1)-nk_i^2\beta^2\right]C_{\lambda i}+\left[(\lambda+2)(\lambda-n+1)-\right.$$
$$\left.-2nk_i^2\beta^2\right]C_{(\lambda+2)i}-nk_i^2\beta C_{(\lambda+4)i}=0.$$

Произвольные постоянные в выражении (19) получены из условий прилипания системы к твердым стенкам и постоянства расхода.

Рассмотрено приближенное решение задачи о течении вязко-пластичного торфа между наклонными плоскостями. Задача решена в полярной системе координат (r,θ).

Записано уравнение (3) в проекциях на оси полярной системы координат, исключено из полученных уравнений давление, и массовые силы приняты ничтожно малыми.

В результате получено

$$2\frac{\partial^2\lambda}{\partial r\partial\theta}+\frac{2}{r}\frac{\partial\lambda}{\partial\theta}+\frac{1}{r}\frac{\partial^2\tau}{\partial\theta^2}-r\frac{\partial^2\tau}{\partial r^2}+3\frac{\partial\tau}{\partial r}=0, \qquad (20)$$

где

$$\lambda=2\left(\eta+\frac{\tau_0}{h}\right)\frac{\partial V_r}{\partial r};$$

$$\tau=\left(\eta+\frac{\tau_0}{h}\right)\left(\frac{1}{r}\frac{\partial V_r}{\partial\theta}+\frac{\partial V_\theta}{\partial r}-\frac{V_\theta}{r}\right).$$

Задача решена методом Стокса.

Введена функция тока

$$\psi(r,\theta)=\sum_{i=0}^{\infty}\frac{\omega_i(\theta)}{r^{i-1}}.$$

Найдена сначала основная функция ω_0. Уравнение для основной функции

$$\omega_0^{IV}+2\omega_0''+\omega_0=0.$$

Решение этого уравнения

$$\omega_0=A\sin\theta+B\cos\theta+\theta(C\sin\theta+D\cos\theta). \qquad (21)$$

Произвольные постоянные в (21) найдены из условия прилипания системы к твердым стенкам.

В работе рассмотрен случай, когда верхняя плоскость неподвижна, а нижняя – горизонтальная – движется со скоростью V_0. Получены выражения для радиальной и трансверсальной составляющих скорости

$$V_r = -\frac{V_0}{\sin^2\alpha-\alpha^2}\Big[(\alpha-\sin\alpha\cos\alpha)\sin\theta+(\alpha-\sin\alpha\cos\alpha)\theta\cos\theta+$$

$$+(\sin^2\alpha-\alpha^2)\cos\theta-\sin^2\alpha\,\theta\sin\theta\Big];$$

$$V_\theta = \frac{V_0}{\sin^2\alpha-\alpha^2}\Big[\theta\sin\theta\,(\alpha-\sin\alpha\cos\alpha)-\alpha^2\sin\theta+\theta\sin^2\alpha\cos\theta\Big],$$

где α – угол между плоскостями.

В случае, если и верхняя плоскость движется со скоростью V_1, выражения для V_r и V_θ примут вид

$$V_r = \frac{V_0(\alpha-\sin\alpha\cos\alpha)-V_1(\alpha\cos\alpha-\sin\alpha)}{\alpha^2-\sin^2\alpha}(\sin\theta+\theta\cos\theta)-$$

$$-V_0\cos\theta-\frac{V_1\alpha\sin\alpha+V_0\sin^2\alpha}{\alpha^2-\sin^2\alpha}\theta\sin\theta;$$

$$V_\theta = \frac{V_0\alpha^2+V_1\alpha\sin\alpha}{\alpha^2-\sin^2\alpha}-\frac{V_0(\alpha-\sin\alpha\cos\alpha)-V_1(\alpha\cos\alpha-\sin\alpha)}{\alpha^2-\sin^2\alpha}\theta\sin\theta-$$

$$-\frac{V_1\alpha\sin\alpha-V_0\sin^2\alpha}{\alpha^2-\sin^2\alpha}\theta\cos\theta.$$

В обоих случаях расход системы равен нулю, так как нет выходного отверстия между плоскостями, что приводит к появлению противотока.

Если же имеется выходное отверстие, то область между плоскостями можно разбить на две некоторой воображаемой плоскостью, параллельной нижней плоскости и проходящей через нижний конец верхней плоскости.

В верхней области осуществляются условия задачи вязко-пластичного течения торфа между наклонными плоскостями, когда верхняя плоскость неподвижна, а нижняя движется со скоростью V_0. Отличие от рассмотренной уже задачи будет в том, что на нижней плоскости не удовлетворяется условие непроницаемости стенки $V_\theta|_{\theta=0} = -V$.

Часть торфа проникает в нижнюю область.

В этом случае

$$V_r = -V_0 \cos + \frac{V_0(\alpha - \sin\alpha\cos\alpha)}{\alpha^2 - \sin^2\alpha}(\sin\theta + \theta\cos\theta) -$$

$$- \frac{V_0 \sin^2\alpha - V(\alpha - \sin\alpha\cos\alpha)}{\alpha^2 - \sin^2\alpha}\theta\sin\theta;$$

$$V_\theta = -V\cos\theta + \frac{V_0\alpha^2 - V(\alpha - \sin\alpha\cos\alpha)}{\alpha^2 - \sin^2\alpha}\sin\theta -$$

$$- \frac{V_0(\alpha - \sin\alpha\cos\alpha) - V\sin^2\alpha}{\alpha^2 - \sin^2\alpha}\theta\sin\theta - \frac{V_0\sin^2\alpha - V(\alpha + \sin\alpha\cos\alpha)}{\alpha^2 - \sin^2\alpha}\theta\cos\theta.$$

Во второй области имеет место течение между двумя подвижными параллельными плоскостями, причем верхняя-проницаема, а к нижней - частицы системы прилипают.

Решена задача для второй области.

Составляющая скорости вдоль канала представлена в виде

$$V_x = a e^{-by} + c y (H - y) x,$$

где a, b, c - произвольные постоянные;
H - расстояние между плоскостями.

Из условия несжимаемости системы определено

$$V_y = -c\left(\frac{Hy^2}{2} - \frac{y^3}{3}\right) + f(x).$$

Произвольные постоянные найдены из граничных условий

$$V_x\Big|_{y=0} = V_1; \qquad V_x\Big|_{y=H} = V_0;$$

$$V_y\Big|_{y=0} = 0; \qquad V_y\Big|_{y=H} = -V.$$

Приближенное решение задачи получено в виде

$$V_x = V_1 e^{-\frac{y}{H}\ln\frac{V_1}{V_0}} + \frac{6V}{H^3}y(H-y)x + \lambda_1(Hy - y^2)^2 + \lambda_3(Hy - y^2)^3.$$

Из условия минимума полной энергии определены λ_1 и λ_2.

Рассмотрено приближенное решение задачи стационарного изотермического вязко-пластичного течения торфа между двумя цилиндрическими поверхностями, профили которых представляют собой кубические параболы. Задача решена в параболической системе координат методом Стокса. Рассмотрены случаи прилипания системы к твердым стенкам и случай скольжения. Исследован вопрос о корректирующих функциях.

Глава четвертая посвящена экспериментальному исследованию течения переработанного торфа в шнеке и других фасонных частях торфяных машин. Здесь рассмотрен вопрос об экспериментальном исследовании движения вязко-пластичного торфа в шнеке, дано описание установки, методики проведения экспериментов и обработки полученных данных.

Исследование проводилось дифференциальным методом реологического исследования – рентгеновским просвечиванием, для чего применялась установка, состоящая из рентгеновского диагностического аппарата РУМ-4.

Для проведения опытов были изготовлены две модели шнека. Первая модель из прозрачного для световых и рентгеновских лучей материала имела следующие размеры: шаг винта $H = 68$ мм, радиус наружной кромки лопасти $R_2 = 53,6$ мм, радиус вала шнека $R_1 = 20,7$ мм, толщина лопасти $t = 6,5$ мм, длина корпуса $\ell = 560$ мм. Вторая модель была изготовлена из пластика прозрачного только для рентгеновских лучей. Ее размеры: $H = 45,5$ мм, $R_2 = 29$ мм, $R_1 = 11,8$ мм, $\ell = 285$ мм, $t = 6,5$ мм.

Для удобства заполнения шнека торфом корпусы обеих моделей были разъёмными. При проведении опыта модель укреплялась на рентгеновском столе под рентгеновской трубкой. Под корпусом шнека помещалась кассета с рентгеновской пленкой. Вращение шнекового винта осуществлялось при помощи рукоятки.

Нами применялась двухпозиционная съёмка со смещением объекта в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях по отношению к центральному рентгеновскому лучу.

Для установления профиля скоростей точек, расположенных в плоскости, перпендикулярной оси шнека, вдоль радиуса в переработанный на мясорубке и тщательно перемешанный торф помещались свинцовые реперы. Для получения эпюры скоростей точек, расположенных в плоскости, проходящей через ось шнекового винта, реперы укладывались между двумя витками от одной лопасти до другой на одинаковом расстоянии от оси шнека.

Фиксируя положения проекций реперов в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях на рентгеновских пленках в различные моменты времени и перенося эти положения с пленок на кальку, мы получили проекции траекторий реперов в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях, что дало возможность построить их проекции траекторий в третьей плоскости. Обработка пленок показала, что все реперы движутся по эквидистантным винтовым линиям (третьи проекции реперов с достаточной степенью точности укладываются на окружности).

Для построения эпюр относительных скоростей точек измерялся угол, на который поворачивалась третья проекция каждого репера в относительном движении. Этот угол равен разности углов переносного поворота репера вместе с винтом шнека (он для всех реперов одинаков) и абсолютного поворота третьей проекции репера.

Для построения эпюр скоростей реперов, движущихся в первой модели, производилось по 40 снимков; во второй - по I2.

Влажность торфа в опытах варьировалась от 80 до 87%. Опыты показали, что движение переработанного торфа происходит с пристенным скольжением. Эпюра распределения относительных скоростей точек по радиусу линейна, по оси имеет параболическую форму.

Рассмотрено экспериментальное исследование движения вязкопластичного торфа между двумя плоскостями, образующими между собой угол. Для этой цели была изготовлена установка, состоящая из двух ленточных транспортеров, имитировавших собой подвижные плоскости. Одновременное движение транспортеров или одного из них осуществлялось при помощи рукоятки. Конструкция установки позволяла закреплять верхний транспортер под различными углами по отношению к нижнему горизонтальному. Ленты транспортеров были изготовлены из ребристой резины, что практически исключало скольжение. Сбоку установки был помещен специальный карман, в который вкладывалась рентгеновская пленка. Исследование проводилось с помощью рентгеновского просвечивания. Для выяснения характера фронта течения и построения траекторий движения отдельных точек в торф закладывался один ряд реперов и с помощью рентгеновских лучей фиксировался в различные моменты движения на пленки (не более двух положений на одну пленку). Для построения эпюр закладывались три ряда реперов и фиксировались два их положения на одну пленку.

Для экспериментов брался торф двух различных ботанических составов и различной влажности. Исследовалось движение в случае, когда угол между плоскостями составлял 20, 34 и 52^{o}.

Опыты показали, что траектории движения представляют собой прямые линии.

В случае движения обеих плоскостей сдвиг распространяется на всю область между плоскостями и противоток не наблюдается, так как имеется выходное отверстие. В случае, когда верхняя плоскость неподвижна, скорости точек, расположенных у этой плоскости, равны нулю. Сдвиг от нижней плоскости уже не распространяется на всю область между плоскостями, а величина неподвижной зоны зависит от величины угла между плоскостями. Чем больше угол, тем больше эта область.

Методом рентгеновского просвечивания проведено экспериментальное исследование течения вязко-пластичного торфа в параболическом конфузоре. Для этой цели из плексигласа был изготовлен насадок, профили двух поверхностей которого описывались уравнением $y = \pm 0{,}0001\ x^{3}$. Длина параболической части конфузора 150 мм, ширина входного отверстия 94 мм, выходного 18 мм.

Для исключения краевых эффектов параболическая часть конфузора переходила в прямоугольную, оканчивающуюся фланцем, с помощью которого насадок крепился на рентгеновском столе к стойке с обоймой.

Движение торфа происходило при определенном давлении, которое создавалось лабораторным компрессором.

Опыты показали, что реперы движутся по параболическим траекториям. Движение происходит с пристенным скольжением и подтверждает выводы проф. А.Х.Кима о том, что при малых параметрах параболы следует ожидать возникновений пристенного скольжения, при больших - прилипания системы.

В Ы В О Д Ы

1. Получены уравнения движения (6), (7), (8) вязко-пластичного торфа в проекциях на винтовые оси координат.

2. Получены уравнения движения (9), (10), (11) для переработанного торфа в проекциях на винтовые оси координат.

3. Дано приближенное решение задачи стационарного изотермического движения в шнеке переработанного торфа большой влажности. При этом в качестве граничных условий использованы условия пристенного скольжения торфа относительно вала, лопастей и кожуха шнека. Получено выражение для относительной скорости (15), как функции от переменных винтовых координат τ и z.

4. На основании полученной формулы в результате численного подсчета на ЭВМ "Одра" выяснено, что теоретические эпюры скоростей точек, расположенных по радиусу, имеют вид прямых линий, наклоненных к радиусу под некоторыми углами, а расположенных вдоль прямой, параллельной оси шнека, S - образную форму.

5. Дано приближенное решение задачи стационарного изотермического движения вязко-пластичного торфа влажности 80-87% в шнеке. При этом в качестве граничных использованы условия скольжения системы на границе с твердыми стенками.

6. Установлен параболический характер распределения функции относительной скорости точек, расположенных вдоль прямой, параллельной оси шнека.

7. Дано приближенное решение задачи стационарного изотермического течения степенных неньютоновских систем в шнеке. В качестве граничных использовались условия прилипания системы к валу и лопастям шнека. Кроме того, для определения постоянных интегрирования использовалось условие постоянства расхода через поперечное сечение шнека.

8. Рассмотрено приближенное решение задачи движения вязко-пластичного торфа между двумя наклонными плоскостями для случаев:

а) верхняя плоскость неподвижна, а нижняя (горизонтальная) - движется с постоянной скоростью;

б) обе плоскости движутся с постоянными скоростями.

Задача решена в полярной системе координат при условии прилипания системы к твердым стенкам. Так как в обоих случаях расход равен нулю, теоретические эпюры распределения скоростей по радиусам показывают наличие противотока. Приведены числовые примеры.

9. Решена задача стационарного изотермического течения переработанного торфа между двумя плоскостями, составляющими угол α, при наличии выходного отверстия.

10. Рассмотрено движение вязко-пластичного торфа между двумя цилиндрическими поверхностями, профили которых являются кубическими параболами. Задача решена в параболической системе координат методом Стокса для случаев прилипания и скольжения системы относительно твердых стенок.

11. С помощью метода рентгеновского просвечивания экспериментально исследован характер движения переработанного торфа в шнеке (w = 80-87%). Выяснено, что движение происходит с пристенным скольжением. Подтверждено сделанное при теоретическом исследовании предположение, что частицы торфа движутся по эквидистантным винтовым линиям ($V^{z} = 0$). Характер экспериментальных эпюр скоростей точек, расположенных по радиусу и прямой, параллельной оси шнека, соответствует теоретическим.

12. С помощью метода рентгеновского просвечивания исследовано движение переработанного торфа между двумя плоскостями, образующими между собой угол. Экспериментально построенные эпюры скоростей для двух различных по ботаническому составу и влажности торфов совпадают с теоретическими и для случая движения обеих плоскостей, и для случая, когда верхняя плоскость неподвижна.

13. Рентгеновским просвечиванием исследован характер течения переработанного торфа в плоском параболическом конфузоре ($y = \pm ax^3$). Выяснено, что частицы торфа при своем движении описывают траектории, близкие к кубическим параболам. Построенные эпюры скоростей точек хорошо согласуются с теоретическими. Экспериментально подтверждено предположение о том, что при малом параметре параболы ($a \ll 1$) на границе должно наблюдаться пристенное скольжение.

14. Полученные в диссертации результаты могут быть использованы не только в торфяной, но и в других отраслях промышленности, производящих и перерабатывающих различные материалы, которые являются по своим структурно-механическим свойствам вязко-пластичными и неньютоновскими системами.

Обозначения

Π_0 – девиатор тензора напряжений,
Φ_0 – девиатор тензора скоростей деформации,
η – вязкость,
τ_0 – предельное напряжение сдвига,
h_i – интенсивность скоростей деформации,
ε^i_k – компоненты смешанного тензора скоростей деформации,
p – давление,
k – мера консистенции,
n – показатель отклонения от ньютоновского поведения,
V^λ – контравариантные составляющие скорости,
H – шаг винта, $\beta = \frac{H}{2\pi}$,
ω – угловая скорость вращения вала шнека,
J_{γ_i}, K_{γ_i} – цилиндрические функции.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. А.Х.Ким, Н.Б.Змеевская. Теоретическое и экспериментальное исследование движения вязко-пластичного торфа в шнеке. "Известия АН БССР", Физико-техническая серия, 1969, №2.

2. А.Х.Ким, Н.Б.Лембович. Движение вязко-пластичной среды между неподвижной наклонной плоскостью и подвижной горизонтальной. "Известия АН БССР", Физико-техническая серия, 1969, № 3.

3. А.Х.Ким, Н.Б.Лембович. Винтовое движение торфяной системы, подчиняющейся степенному закону. Сб. "Материалы секции теоретической и прикладной механики" XXVI научно-технической конференции Белорусского ордена Трудового Красного Знамени политехнического института, Минск, 1970.

4. А.Х.Ким, Н.Б.Лембович. Движение вязко-пластичного торфа между двумя цилиндрическими поверхностями. Сб. "Прогрессивная технология машиностроения", вып.2, изд-во "Вышэйшая школа", 1971.

Основные результаты доложены и обсуждены:

1. На XIX, XXII, XXIV, XXV, XXVI научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава Белорусского ор-

дена Трудового Красного Знамени политехнического института совместно с работниками промышленности и строительства. (Минск, 1963,1966, 1968, 1969, 1970 г.г.)

2. На Всесоюзной конференции по физико-химической механике дисперсных материалов (Минск, АН БССР, 1969г.).

3. На Первой Украинской конференции по научным основам технологии и развитию производства стеновой строительной керамики (Киев, 1969 г.).

4. На научно-техническом семинаре-коллоквиуме по технологии переработки пластмасс для работников Белоруссии и Прибалтики (Минск, 1969 г.).

5. На семинаре "Гетерогенные процессы и межфазные слои", созванном Новочеркасским отделением Всесоюзного химического общества им. Д.И.Менделеева, Новочеркасским ордена Трудового Красного Знамени государственным университетом (Новочеркасск, 1970 г.)