

маршрутной системы и корректировка выпуска подвижного состава на линию для достижения соответствия частот движения пассажиропотокам.

Недостаточное внимание к такой функции управления, как формирование оптимальных маршрутных систем по видам транспорта, приводит к значительным непроизводительным затратам. Так, по статистическим данным троллейбусного депо №1 Харьковского коммунального предприятия «Горэлектротранс» нулевые пробеги составляют 11% от общего объема, в том числе 5,5% от нерационального решения подачи подвижного состава на линию.

Отсутствие стимулирования в системе тарифов не позволяет повысить пересадочность. При положительном решении этого вопроса достигается существенная экономия пробега и соответствующих затрат.

Реконструкция и новое строительство города должны проводиться с учетом требований пассажироперевозок (отводом участков для маневровых устройств, для депо и т.д.). Неучет этих требований вызывает ощутимые потери. Например, потери на нулевые пробеги троллейбусов из депо №2 и №3 г. Харькова за 3,5 года достигают стоимости строительства нового депо.

Формирование оптимальных маршрутных систем по видам транспорта как процесс управления перевозками позволяет привести планируемые объемы работы транспорта в соответствие с пассажиропотоками. Наблюдаемое в настоящее время несоответствие здесь составляет, например, 63% по трамваю и 37% по троллейбусу.

Важной задачей оперативного управления движением является дальнейшее развитие математического обеспечения и автоматизированной системы диспетчерского управления.

1. Крат В.І. Проблеми реформування міського електротранспорту // Коммунальное хозяйство городов: Науч.-техн. сб. Вып.17. – 1998. – С. 18-35.

*Получено 04.05.2000*

УДК 532.1

**И.Я.ТОКАРЬ**, д-р техн. наук, **А.И.РЯЗАНЦЕВ**  
*Харьковский государственный технический университет  
строительства и архитектуры*

## **ГИДРОСТАТОДИНАМИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА СМАЗКИ НЬЮТОНОВСКИМИ ЖИДКОСТЯМИ**

Рассматривается решение модифицированного уравнения Рейнольдса гидродинамической теории смазки ньютоновскими жидкостями, в котором учитываются эффек-

ты, обусловленные вращением стенки опоры и подводом смазки высокого давления в отдельные области, расположенные на несущей поверхности. Приводятся алгоритм и численные результаты решения системы уравнений, включающих нелинейное уравнение Рейнольдса и интегро-дифференциальное уравнение, описывающее расход жидкости высокого давления через регулирующие устройства, например, жиклер.

Существует значительное число машин, опоры трения которых работают нормально при номинальных частотах вращения, но сильно истираются на пониженных частотах и при переходных режимах. В таких случаях применяется подвод смазки высокого давления через отдельные области (гидростатический подъем валов).

Чтобы определить частоты вращения, при которых подвод смазки высокого давления должен быть отключен или включен, нужно решить гидростатодинамическую задачу смазки. Такие задачи решались для случаев смазки ньютоновскими жидкостями. Для смазки неньютоновскими жидкостями, необходимость которой обнаружилась в последние годы, эта задача не применялась. Ниже приводится ее решение.

Систему уравнений Рейнольдса с учетом неньютоновских свойств жидкости записываем в форме

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) = \frac{\partial p}{\partial x}, \quad \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) = \frac{\partial p}{\partial z}, \quad \frac{\partial p}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

Здесь  $x = \frac{X}{R}$ ,  $y = \frac{Y}{\delta}$ ,  $z = \frac{Z}{R}$  - безразмерные координаты;  $R$  - радиус вала;  $X, Y, Z$  - координаты точек смазочного слоя;  $\delta = R_1 - R$  - радиальный зазор;  $R_1$  - радиус расточки вкладыша радиального подшипника (рис.1);  $v_x = \frac{V_x}{\omega R}$ ,  $v_y = \frac{V_y}{\omega \delta}$ ,  $v_z = \frac{V_z}{\omega R}$  - безразмерные компоненты скоростей;  $V_x, V_y, V_z$  - компоненты скоростей;  $p = \frac{P \psi^2}{\mu_0 \omega}$  - безразмерное давление;  $P$  - давление;  $\psi = \frac{\delta}{R}$  - относительный зазор;

$\mu_0$  - характерный коэффициент абсолютной вязкости;  $\omega$  - частота вращения вала.

218

Интегрируя первое и второе уравнения системы (1), подставив выражения скоростей в четвертое уравнение этой системы и проинтегрировав его, получим

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ (c_1 - c_2) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ (c_1 - c_2) \frac{\partial p}{\partial x} \right] = \frac{\partial}{\partial x} (c_3 - h). \quad (2)$$

Здесь  $h$  – безразмерная толщина пленки;  $h = \frac{H}{\delta}$ ,  $H$  – толщина

пленки,

$$c_1 = \iint_{00}^{\mu} \frac{hy}{\mu} dy dy, \quad c_2 = \frac{I_1}{I_2} \iint_{00}^{\mu} \frac{1}{\mu} dy dy, \quad c_3 = \frac{1}{I_2} \iint_{00}^{\mu} \frac{1}{\mu} dy dy,$$

$$I_1 = \int_0^h \frac{y}{\mu} dy, \quad I_2 = \int_0^h \frac{dy}{\mu}.$$

Зависимость, отражающую неньютоновские свойства жидкости и определяемую экспериментально, можно аппроксимировать кусочно-гладкими параболическими и гиперболическими функциями коэффициента абсолютной вязкости от скорости относительной деформации.

Безразмерная толщина смазочного слоя в радиальном подшипнике описывается выражением

$$h = 1 + \chi \cos(x - \beta). \quad (3)$$

Здесь  $\chi$  – относительный эксцентриситет;

$\chi = \frac{e}{\delta}$ ,  $e$  – эксцентриситет;  $\beta$  – угол линии центров (см. рис.1).

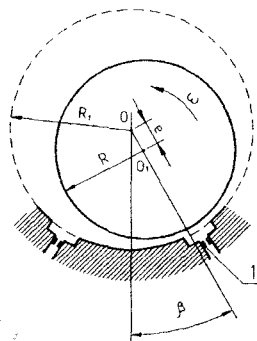


Рис.1

Граничными условиями для уравнения (2) являются нули на контуре, ограничивающем несущую поверхность и давления в областях подвода смазки высокого давления на контурах этих областей. Последние должны определяться из решения уравнения Рейнольдса и системы интегро-дифференциальных уравнений, описывающих расходы через области подвода смазки высокого давления.

Полагая, что решение этой системы возможно (приводится ниже), опишем решение уравнения (1). Для этого нанесем на несущую поверхность сетку с неравномерными шагами, как показано на рис.2. Вблизи областей подвода смазки высокого давления шаг сетки умень-

шен. Это диктуется необходимостью определения расходов с достаточной точностью. Заменяем производные уравнения (2) конечно-разностными отношениями. Получим

$$P_{i,k} = \frac{T_{1i,j}P_{i+1,j} + T_{2i,j}P_{i-1,j} + T_{3i,j}P_{i,j+1} + T_{4i,j}P_{i,j-1} - F}{T_{1i,j} + T_{2i,j} + T_{3i,j} + T_{4i,j}}, \quad (4)$$

$$i=0,1 \dots N; j=-1, 0, 1 \dots M.$$

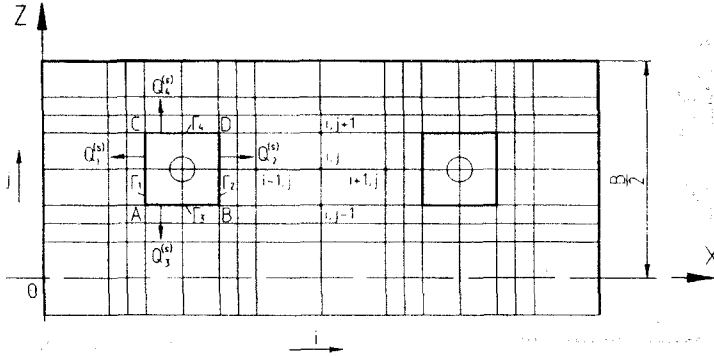


Рис.2

Здесь

$$F = \frac{c_{3i+1,j} - c_{3i-1,j}}{\Delta x_{i-1} + \Delta x_i} - \chi \sin(x_i - \beta), \quad T_{1i,j} = \frac{D_{i+1,j} + D_{i,j}}{\Delta x_i (\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)},$$

$$T_{2i,j} = \frac{D_{i,j} - D_{i-1,j}}{\Delta x_{i-1} (\Delta x_{i-1} + \Delta x_i)}, \quad T_{3i,j} = \frac{D_{i,j+1} + D_{i,j}}{\Delta z_j (\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)},$$

$$T_{4i,j} = \frac{D_{i,j} - D_{i,j-1}}{\Delta z_{j-1} (\Delta z_{j-1} + \Delta z_j)}, \quad i=1,2,\dots,N; \quad j=0,1,2,\dots,M,$$

$D = c_1 - c_2$ ,  $\Delta x, \Delta z$  - шаги сетки.

Поскольку коэффициенты  $D_{i,j}$  являются функциями коэффициентов вязкости, зависящих от скоростей относительных деформаций, которые, в свою очередь, являются функциями давлений, нам необходимо решать существенно нелинейную систему уравнений (4). Это осуществляется последовательными приближениями по следующему алгоритму. Сначала, полагая безразмерный коэффициент вязкости постоянным и равным, например, единице, по итерационному методу Зайделя находим распределение давлений, а по известным гради-

ентам скоростей – поле коэффициентов абсолютных вязкостей. Снова определяем поле давлений при зафиксированном поле только что определенных вязкостей. Несмотря на нелинейность уравнений (4), сочетание метода Зайделя и последовательных приближений имеет быструю сходимость и требует проведения 3...5 приближений.

Приступая к определению давлений в областях 1, 2 (см. рис.2), представим давление в смазочном слое в виде

$$p = a^{(0)} + \sum_{s=1}^k a^{(s)} p^{(s)}. \quad (5)$$

Здесь  $s$  – номер области подвода смазки высокого давления;  $k$  – число областей;  $p^{(s)}$  – давления в них. Коэффициенты  $a^{(0)}$  и  $a^{(s)}$  определяем следующим образом. Полагая давления во всех камерах равными нулю, вычисляем поле давлений, используя метод Зайделя. Согласно (5) находим коэффициенты  $a^{(0)}$  во всех узлах сетки, приравняв их давлениям в этих узлах. Далее, полагая

$$p^{(s)} = \begin{cases} 1 & \text{при } s = m, \\ 0 & \text{при } s \neq m, \quad m = 1, 2, \dots, k, \end{cases}$$

вычисляем поле давлений и последовательно определяем коэффициенты  $a^{(s)}$  во всех узлах сетки по формуле

$$a^{(s)} = p - a^{(0)},$$

которую легко получить из выражения (5). Связи между перепадом давления на жиклерах, установленных на входе в каждую область подвода смазки (поз. 1 на рис.1), и расходом через них записываем в виде

$$p_{см} - p^{(s)} = C^{(s)} Q^{(s)2}, \quad (6)$$

где  $p_{см}$  – давление смазки, обеспечиваемое насосом высокого давления,  $C^{(s)}$  – гидравлическая постоянная жиклера. Уравнения (6) образуют систему интегро-дифференциальных уравнений относительно  $p^{(s)}$ .

Выразив расходы смазки по контуру каждой области через  $p^{(s)}$  и используя формулу (5), получим вместо системы интегро-дифференциальных уравнений систему трансцендентных алгебраических уравнений относительно неизвестных  $p^{(s)}$ . Эту систему решали итерационным методом Ньютона.

На рис.3 приведены распределения давлений в направлении вращения вала по линии, проходящей через середины областей подвода смазки (кривая 1), и по оси симметрии несущей поверхности (кривая 2). На этом рисунке  $X_2 - X_1$  представляет собой безразмерную длину поверхности вдоль оси X.

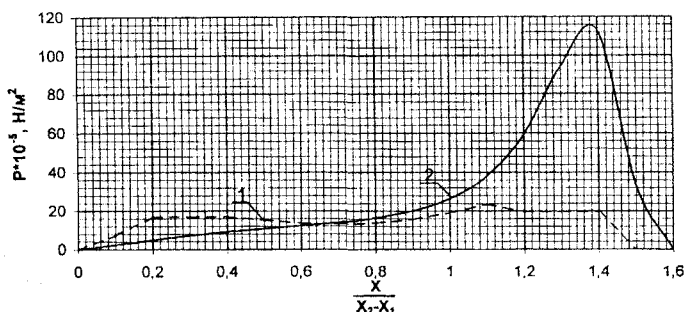


Рис.3.

Получено 10.05.2000

УДК 614.84:664

И.А.КРИСА, В.П.МАМОН, канд. техн. наук,

В.П.ОЛЬШАНСКИЙ, д-р физ.-матем. наук

Харьковский институт пожарной безопасности МВД Украины

### К ВЫЧИСЛЕНИЮ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЛАСТОВОГО САМОНАГРЕВАНИЯ СЫРЬЯ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

Построено в форме ряда решение задачи стационарной теплопроводности, удовлетворяющее граничным условиям третьего рода на торцах насыпи. Ускорена его сходимость. Проведен анализ влияния различных факторов на вычисленные значения избыточной температуры.

Задачи пластового самонагрева сырья в установившемся режиме решались в работах [1,2]. Предполагалось, что тепловой очаг локализован в глубине насыпи и влиянием торцевого теплообмена на распределение избыточной температуры в очаге и его окрестности можно пренебречь. Ниже строится решение с учетом торцевого теплообмена, что позволяет находить избыточную температуру и в случае, когда внутренний термоисточник расположен возле нижнего или верхнего оснований насыпи.