

В. М. МУСАЛИМОВ, М. А. НОЗДРИН, Н. В. РОДИН

## ДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ УПЛОТНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА СКВАЖИННОГО ПРИБОРА

Исследована зависимость давлений, действующих на фторопластовую уплотнительную прокладку скважинного прибора. С использованием кривой Штрибека, гидродинамического уравнения Рейнольдса и задачи Буссинеска получено выражение для предельной осевой нагрузки на уплотнитель.

**Ключевые слова:** скважинный прибор, фторопластовый уплотнитель, упругость, трение, кривая Штрибека, задача Буссинеска, задача Рейнольдса.

Конструкция геотехнического зонда имеет подвижную часть (блок измерителей), которая закреплена на выходном валу блока кинематики. В связи с особенностями условий эксплуатации (наличие высокого внешнего давления и химически активной среды) необходимо защитить блок кинематики от проникновения внутрь него жидкой активной среды. Поэтому на выходной вал блока кинематики ставят уплотнительную прокладку. Материал прокладки — фторопласт с графитовыми нитями. На прокладку действует внешнее давление жидкой активной среды и внутреннее давление масла, создаваемое компенсатором (компенсатор необходим для выравнивания внешнего давления).

Для расчета предельной осевой нагрузки на уплотнительную прокладку необходимо, в зависимости от различных исходных данных, решить следующие задачи:

- нахождение эпюр граничных давлений по осевому и радиальному направлениям;
- определение гидроупругости прокладки;
- вычисление минимального значения момента, с которым необходимо затягивать гайку, прижимающую прокладку;
- определение момента трения, возникающего вследствие избыточного внешнего давления.

С точки зрения механики, уплотнители не являются чисто упругими элементами, так как, во-первых, находятся в среде со смазкой, а, во-вторых, подвергаются продольному давлению относительно вала двигателя. Исходя из этого возникает задача, при решении которой необходимо учесть взаимодействие при работе уплотнителя и вращающегося вала, торцевое давление на уплотнитель со стороны гайки, гидродинамические и реологические свойства (так как волокна находятся в жидкости).

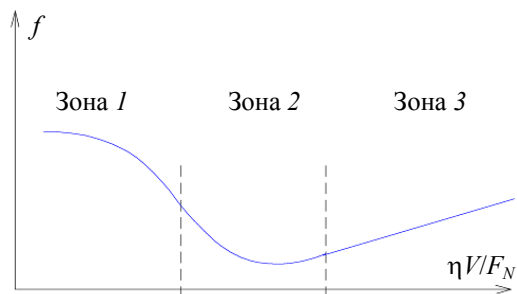


Рис. 1

Первоначально разобраться в этом вопросе помогает кривая Штрибека [1], график которой представлен на рис. 1, где  $\eta$  — коэффициент вязкости,  $V$  — линейная скорость движения вала,  $f$  — коэффициент трения,  $F_N$  — нормальное давление. На кривой условно выделяются три зоны: 1 — зона гидродинамической смазки, так как рассматривается взаимодействие тел на относительно большом расстоянии, когда мера шероховатости не играет роли, т.е. плоскости тел разделены смазкой и не соприкасаются; 2 — зона упругогидродинамической смазки, т.е. мера шероховатости важна, но смазка находится между взаимодействующими телами; 3 — зона граничной смазки, где наблюдаются контактные явления.

прикасаются; 2 — зона упругогидродинамической смазки, т.е. мера шероховатости важна, но смазка находится между взаимодействующими телами; 3 — зона граничной смазки, где наблюдаются контактные явления.

Будем рассматривать уплотнитель во второй зоне кривой Штрибека. Схема влияния на уплотнитель продольного и радиального давлений представлена на рис. 2, где  $q$  — продольное давление со стороны гайки,  $P$  — радиальное давление со стороны вращающегося вала.

Характерная особенность данной задачи — возникновение „плывущей“ зоны давления при вращении вала относительно уплотнителя. Поэтому необходимо найти соотношение между величинами  $P$  и  $q$ , учитывая возникающую вязкость, модуль упругости, коэффициент Пуассона и угловую скорость вала ( $\omega$ ). Проблема решается с помощью гидродинамического уравнения Рейнольдса

$$\frac{dP}{dx} = 6\eta V \frac{1}{h^2}, \quad (1)$$

где  $h=h(P)$  — радиальное перемещение уплотнителя,  $\eta=\eta(P)$ , и уравнения теории упругости, которое в локальном приближении имеет следующий вид:

$$h = \frac{x^2}{2r} + h_{\text{упр}},$$

где  $r$  — радиус кривизны;  $x$  — координата локального приближения;  $h_{\text{упр}}$  — упругая составляющая, определяемая с помощью решения задачи Буссинеска [2]:

$$\sigma_r = \frac{-3+\mu}{4\pi} \frac{P \cos \theta}{r}; \quad \sigma_\theta = \frac{-1-\mu}{3+\mu} \sigma_r,$$

здесь  $\sigma_r$ ,  $\sigma_\theta$  — нормальные напряжения, имеющие направления параллельно цилиндрическим координатным осям  $r$ ,  $\theta$  и действующие по перпендикулярным площадкам, для которых внешние нормали соответственно параллельны осям  $r$ ,  $\theta$ ;  $\mu$  — коэффициент Пуассона.

Определим локальные перемещения для каждой точки уплотнителя по внутреннему радиусу  $r_{\text{вн}}$  его кольца с использованием закона Гука в полярных координатах:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} (\sigma_r - \mu \sigma_\theta) = \frac{1}{E} \left( \frac{-3+\mu}{4\pi} - \mu \frac{1+\mu}{4\pi} \right) \frac{P \cos \theta}{r},$$

где  $\varepsilon_r = \frac{\partial u_r}{\partial r}$  — радиальная деформация уплотнителя;  $E$  — модуль упругости;  $u_r$  — радиальное перемещение:

$$u_r = \int \varepsilon_r dr = A \int \frac{dr}{r} = A \ln r \Big|_{r_{\text{н}}}^{r_{\text{вн}}}, \quad (2)$$

здесь  $A$  — константа интегрирования,  $r_{\text{н}}$  — наружный радиус кольца.

Равенство (2) выполняется для каждой точки  $u_r = h$ .

Далее определяется значение угла  $\theta^*$  из следующих формул:

$$r_{\text{вн}} \theta^* = x, \quad \cos \theta^* = \cos(x/r_{\text{вн}}).$$

Перейдем теперь к рассмотрению решения задачи. Для этого перепишем формулу Рейнольдса (1).

Известна формула зависимости вязкости от давления:

$$\eta(P) = \eta_0 e^{\psi P},$$

где  $\eta_0$  — вязкость при отсутствии давления;  $\psi$  — пьезокэффициент вязкости; эта формула является решением дифференциального уравнения

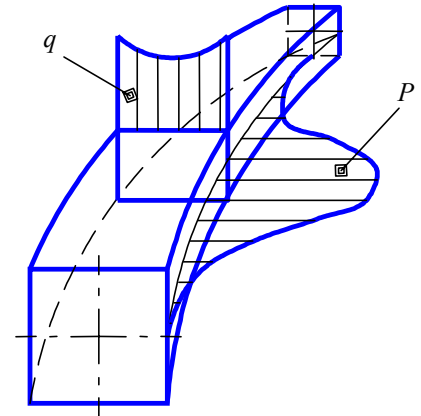


Рис. 2

$$\frac{d\eta}{dP} = \psi\eta_0. \quad (3)$$

Перемножив выражения (1) и (3), получим

$$\frac{d\eta}{dx} = \psi\omega\eta^2 \frac{1}{h^2}. \quad (4)$$

Далее, из выражения (4) необходимо получить зависимость вязкости и продольного давления со стороны гайки.

Представим радиальное давление в экспоненциальном виде:

$$P = P_0 e^{-\beta q},$$

где  $P_0$  — начальное давление,  $\beta$  — коэффициент релаксации уплотнителя.

После преобразований получим

$$\int_{\eta_0}^{\eta} \frac{d\eta}{\eta^2} = \int_{x_0}^x \psi\omega r_{\text{BH}} \frac{dx}{h^2},$$

где радиальное перемещение уплотнителя определяется как

$$h = \frac{x^2}{2r_{\text{BH}}} - \frac{1}{E} \frac{\cos\theta \cdot P_0 e^{-\beta q}}{r_{\text{BH}}} \left( \frac{-3+\mu}{4\pi} + \mu \frac{\mu+1}{4\pi} \right) \ln \frac{r_{\text{H}}}{r_{\text{BH}}} \cos \frac{x^2}{r_{\text{BH}}}.$$

Для удобства вычислений обозначим

$$B = \frac{1}{E} \frac{\cos\theta \cdot P_0 e^{-\beta q}}{r_{\text{BH}}} \left( \frac{-3+\mu}{4\pi} + \mu \frac{\mu+1}{4\pi} \right) \ln \frac{r_{\text{H}}}{r_{\text{BH}}}.$$

Разложив в ряд

$$\cos \frac{x^2}{r_{\text{BH}}} = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{x^{2k}}{2k!} = 1 - \frac{x^4}{2r_{\text{BH}}^2},$$

получим

$$h = \frac{x^2}{2r_{\text{BH}}} - B \left( 1 - \frac{x^4}{2r_{\text{BH}}^2} \right),$$

тогда

$$\int_{x_1}^x 2\omega r_{\text{BH}} \frac{dx}{h^2} = \frac{\psi\omega}{r_{\text{BH}}} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{x^4 \left( \frac{r_{\text{BH}} - 2B - r_{\text{BH}} B}{4r_{\text{BH}}} - B^2 - B^2 x^2 \right)}.$$

Обозначим

$$C = \frac{r_{\text{BH}} - 2B - r_{\text{BH}} B}{4r_{\text{BH}}},$$

тогда решение данного интеграла будет иметь следующий вид:

$$K \int \frac{dx}{a+bx+cx^4} = \frac{1}{4cq^3 \sin l} \left( \sin \frac{l}{2} \ln \frac{x^2 + 2qx \cos \frac{l}{2} + q^2}{x^2 - 2qx \cos \frac{l}{2} + q^2} + 2 \cos \frac{l}{2} \operatorname{arctg} \frac{x^2 - q^2}{2qx \sin \frac{l}{2}} \right),$$

где

$$q = 4\sqrt{\frac{a}{c}}, \quad l = 2a(n-1)(b^2 - 4ac), \quad \cos l = -\frac{b}{2\sqrt{ac}}.$$

Данные расчета коэффициентов  $\beta q$  и  $\eta$  приведены ниже.

$\beta q$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\eta$	0,078	0,091	0,094	0,096	0,097	0,0976	0,0979	0,0982	0,099

На рис. 3 представлен график зависимости коэффициента вязкости  $\eta$  от приведенного коэффициента релаксации  $\beta q$ . Характер зависимости явно нелинейный, но эта нелинейность приходится на интервал неустановившегося режима. Начиная от значения  $\beta q = 0,4$  зависимость явно линейная. Эта линейная зависимость определяется тангенсом угла наклона  $\alpha$ , где  $\alpha = \alpha(E, \mu, \omega, r)$  — функция модуля упругости, коэффициента Пуассона, угловой скорости вала и геометрических параметров уплотнителя. Поэтому целесообразно принять линейную зависимость

$$q\alpha\beta = \eta,$$

откуда получаем выражение для определения предельной осевой нагрузки:

$$q = \frac{\eta}{\alpha\beta}.$$

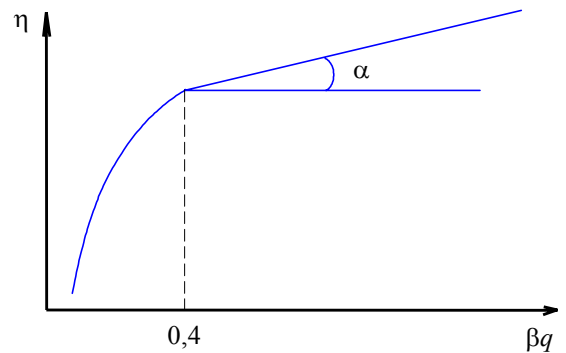


Рис. 3

Из этого выражения следует, что давление на уплотнитель должно обеспечивать равномерность распределения смазки, компенсацию внешнего осевого и радиального давлений. Причем давление  $q$  является функцией характеристики смазки, физико-механических характеристик материала уплотнителя и кинематических характеристик относительного движения вала.

Итак, сформулированы задачи, связанные с динамическим анализом уплотнительного элемента скважинного прибора; использование кривой Штрибека способствовало ограничению круга решаемых упругодинамических задач; использование достижений в области теории упругости (задача Буссинеска) и механики жидкости (задача Рейнольдса) позволило рассчитать предельную осевую нагрузку на уплотнительный элемент.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. Варшава, 1989. Т. 1; М.: Машиностроение, 1990. Т. 2; 1992. Т. 3.
2. Безухов Н. И. Примеры и задачи по теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высш. школа, 1965. 320 с.

#### Сведения об авторах

- Виктор Михайлович Мусалимов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: musalimov@mail.ifmo.ru
- Михаил Александрович Ноздрин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: m\_nozdrin@mail.ru
- Николай Владимирович Родин** — студент; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра мехатроники; E-mail: rus-orthodox@bk.ru

Рекомендована кафедрой  
мехатроники

Поступила в редакцию  
15.06.09 г.