

где  $U_0$  – начальное значение энергии активации,  $\alpha p$  – член, учитывающий влияние давления на вязкость жидкости,  $f(y)$  – упомянутая выше функция, учитывающая влияние силового поля стенок щели. Далее мы зависимостью  $\eta_0(T)$  пренебрегаем, используя для удовлетворения экспериментальным данным только экспоненциальный множитель, который в интересующем нас диапазоне изменения температур достаточно хорошо их описывает. Для иллюстрации на рисунке 1 приведены данные для различных масел [2], перестроенные в координатах  $\ln \eta \sim T^{-1}$ . Как видим, с достаточной степенью точности эта зависимость может быть принята линейной.

Для более точного соответствия эксперименту в широком диапазоне температур следовало бы учитывать и температурные зависимости  $U_0(T), \alpha(T), f(T, y)$ , что требует, однако, специально поставленных опытов. Зависимость температуры от величины зазора  $T(h)$  принималась в соответствии рисунка 2. Изменение ее по поперечной координате не учитывалось.

Методика подбора числовых параметров соответствует принятой в [1]. И использованные в качестве исходных данных и полученные при подборе значения параметров модели приведены в таблице 1 и таблице 2. Параметр  $\alpha$  и коэффициент теплового расширения  $k_v$  жидкостей приняты одинаковыми для обеих сред -  $\alpha = 0.03 \cdot 10^{-6}$  1/МПа,  $k_v = 0.006$  1/°C.

Сравнительно с [1] заметно изменились значения параметра  $m$ . Соответственно с этим изменилось и распределе-

Таблица 2

Исходные и расчетные параметры сред

Жидкость	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Вязкость $\eta_0$ , н·с/м <sup>2</sup>	$\gamma$	$\beta_0 = \beta \cdot 10^{-6}$	$m$
Бензин	800.0	$0.57 \cdot 10^{-2}$	10.289	1.495	0.6545
Нефть	900.0	$2.05 \cdot 10^{-2}$	14.090	1.560	1.3250

Таблица 1

Расход жидкости через уплотнение

Зазор $2h$ , мкм	Расход $Q$ , см <sup>3</sup> /час	
	Бензин	Нефть
3.75	30	15.0
3.00	20	7.0
2.75	15	5.0
2.50	10	3.0

Санюкевич Ф.М.

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ НАПОРНЫХ МИКРОЦИКЛОНОВ

Перемещаемая в жидкости твердая частица испытывает сопротивление от инерции среды (динамическое) и от трения (вязкости). Преобладание соответствующего вида сопротивления зависит от скорости перемещения частицы и её обтекаемой поверхности. Известно [1], что для шарообразных частиц диаметром  $d_u$  скорость их осаждения пропорциональна

ние скорости по сечению щели - течение в большей степени концентрируется в срединной по высоте щели зоне (рисунок 3).

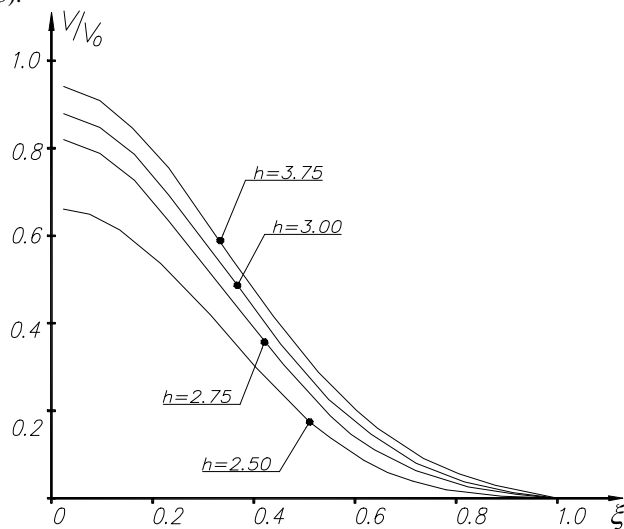


Рисунок 3. Распределение скорости потока по высоте щели

Из опыта проведения данной работы вытекает вывод об определяющей роли теплового фактора - именно принятые по рисунку 2 графики изменения температуры от величины щелевого зазора в уплотнении  $T(h)$  оказывают наиболее сильное влияние на выбор тех или иных значений остальных параметров. Для сближения расчетных и экспериментально найденных данных основной упор следует делать на максимально возможной строгости фиксации в опытах температуры протекающей через щель жидкости, которая включает в себя интегрально шероховатость стенок щели, скорость скольжения стенок друг относительно друга, теплоемкость среды, условия отвода тепла с уплотнения и другие факторы.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голуб В.М., Голуб М.В., Свищев М.А., Холодарь Б.Г. Течение жидкости через узкие щели контактных пар трения торцовых уплотнений (в настоящем сборнике).
2. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. Ред. Б.Б. Некрасов. - Вышэйшая школа - Минск. - 1985.
3. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. - Наука. - ЛЕНИНГРАД. - 1975.
4. А. Банди. Теория вязкости. В кн. Реология. Теория и приложения. Под ред. Ф. Эйриха. - ИЛ. - Москва. - 1962.
5. Дж. Ферри. Вязкоупругие свойства полимеров. - ИЛ. - Москва. - 1963.

УДК. 553.97+518

Санюкевич Федор Михайлович. Доцент каф. "Машиноведения" Брестского государственного технического университета. БГТУ, Беларусь, г. Брест, ул. Московская 267.

частицы. Скорость перемещения частицы в жидкости можно увеличить уменьшив вязкость среды или увеличив разность плотностей частицы и жидкости, размер частицы или величину ускорений. При этом, из всех перечисленных способов наиболее эффективным и без особых затруднений реализуемым в промышленности является увеличение ускорений, особенно в случае использования центробежных полей криволинейных потоков, что при соответствующих условиях может резко интенсифицировать процесс выделения частиц из жидкости. Получаемые ускорения в данном случае могут в сотни и более раз превосходить ускорение силы тяжести.

Наиболее простыми и эффективными аппаратами, обеспечивающими создание мощных центробежных полей, являются напорные микроциклоны с размером цилиндрической части  $D \leq 50$  мм, к которой снизу примыкает широким основанием коническая часть с углом конусности  $\alpha$  (в зависимости от разделяемой среды величина  $\alpha$  колеблется в пределах от 5 до 20°). Исходная суспензия поступает внутрь цилиндрической части через питающий патрубок под избыточным давлением, а вращательное движение её создаётся и поддерживается за счёт тангенциального ввода. Возникающие при этом мощные центробежные силы обеспечивают непрерывную сепарацию частиц из вращающейся жидкости от оси циклона к его стенкам по спиральной траектории вниз к шламовой насадке. Более легкая фаза движется во внутреннем спиральном потоке, направленном вверх и отводится из аппарата через соосно расположенный сливной патрубок. Следует отметить, что направление вращения нисходящего к шламовому отверстию и восходящего к сливному патрубку потоков в циклонном аппарате совпадают. Вдоль оси циклона образуется воздушный столб, определяющий устойчивость процесса сепарации.

Напорные микроциклоны обычно работают в вертикальном положении, однако при больших давлениях питания (около 0.5 МПа и выше) центробежные силы столь значительны, что аппараты устойчиво работают в любом положении.

Движение твёрдой частицы в криволинейном канале циклона наиболее удобно рассматривать в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$ , где положение её будет определяться функциями  $r(t), \varphi(t), z(t)$  (здесь  $t$  - время). Ось  $z$  в данном случае совпадает с осью симметрии аппарата, и за положительное её направление принимаем направление движения от сливного патрубка к шламовой насадке (при установке циклона шламовым отверстием вниз). Если известны скорости движения частицы  $\bar{U}$  в принятой системе координат и движения жидкости  $\bar{V}$  в точке, где находится частица, то скорость сепарации  $\bar{U}_c = \bar{U} - \bar{V}$ .

Скорость движения  $\bar{U}$  твёрдой частицы в данной системе координат можно определить дифференцируя по  $t$  выражение

$$\bar{p} = r(\bar{i} \cos \varphi + \bar{j} \sin \varphi) + z\bar{k}, \quad (1)$$

где  $\bar{p}$  - радиус-вектор частицы относительно точки пересечения оси аппарата с плоскостью, проходящей через ось питающего патрубка;  $\bar{i}, \bar{j}, \bar{k}$  - орты;  $r$  - текущий радиус.

Абсолютную скорость движения жидкости в цилиндрической системе координат можно записать следующим образом:

$$\bar{V} = \bar{V}_r + \bar{V}_\varphi + \bar{V}_z, \quad (2)$$

где  $V_r, V_\varphi, V_z$  - соответственно радиальная, тангенциальная и аксиальная составляющие скорости движения жидкости в точке, где находится частица.

Принимая радиальные скорости как усреднённые по коаксиальному сечению на любом радиусе вращения жидкости, движущейся от периферии циклона до поверхности воздушного столба и считая, что она распределена по высоте равномерно, характер изменения  $V_r$  вдоль радиуса  $r$  аппарата можно выразить зависимостью:

$$V_r = \frac{Qtg(\alpha/2)}{2400\pi r [3tg(\alpha/2)(H_\varphi - h_{cl}) + D - d_{шл}]} \quad (3)$$

Распределение тангенциальной составляющей скорости по радиусу вращения  $r$  может быть выражено зависимостями:

- ♦ на участке  $0,8r_{cl} \leq r \leq D/2$

$$V = \frac{Q(0,5D)^n}{957,45\pi d_{cl}^{0,5} d_{num}^{1,5} r^n}; \quad (4)$$

- ♦ на участке  $0,6r_{cl} \leq r \leq 0,8r_{cl}$

$$V = \frac{Q(0,5D)^n r}{957,45(0,4)^{n+1} \pi d_{num}^{1,5} d_{cl}^{n+1,5}} \quad (5)$$

Аксиальная составляющая скорости  $V_z$  плавно и быстро возрастает по мере приближения от стенки циклона к воздушному столбу, изменяя при этом значение с положительного на отрицательное (для принятой расчётной схемы). Изменение знака  $V_z$  связано с наличием в циклоне внешнего нисходящего и внутреннего восходящего потоков. Внешний поток образует поступающая в аппарат жидкость, которая движется по стенке вниз в коническую часть, где изменяет направление и образует внутренний восходящий поток. В связи с этим резко падает скорость внешнего потока и возрастает скорость внутреннего потока.

Для нашей модели сепарации

$$V_z = \frac{Q}{3 \cdot 10^3 \pi d_{num}^2} [1 - 0,8\sqrt[3]{(0,5D/r)^2}]. \quad (6)$$

В формулах (3)...(6):  $V_r, V_\varphi, V_z$  - м/с;  $Q$  - производительность микроциклона по питанию,  $M^3/ч$ ;  $D, H_\varphi$  - диаметр и высота цилиндрической части, м;  $d_{num}, d_{cl}, d_{шл}$  - диаметры питающего, сливного и шламового патрубков, м;  $h_{cl}$  - высота заглибления сливного патрубка, м;  $\alpha$  - угол конусности конической части, град;  $n = 0,4d_{num}^2 / d_{cl}^2 + 0,2$ .

Производительность питания микроциклона ( $M^3/ч$ )

$$Q = 0,59 - 35D - 80,1d_{шл} + 0,08 \cdot 10^{-5} P_{num} + 12,9 \cdot 10^{-5} P_{num} D + 19,12 \cdot 10^{-5} P_{num} d_{шл} + 1190D^2 + 3900d_{шл}^2. \quad (7)$$

Эффект очистки исходной суспензии (%)

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = & 100,3 - 2690D + 2950d_{\text{шл}} + 6,2 \cdot 10^{-5} P_{\text{нит}} + \\ & + 29 \cdot 10^4 Dd_{\text{шл}} - 82,5 \cdot 10^4 d_{\text{шл}}^2. \end{aligned} \quad (8)$$

В формулах (7) и (8):  $D, d_{\text{шл}}$  - м;  $P_{\text{нит}}$  - Па.

Учитывая, что производительность по сливу единичных микроциклонов с  $D \leq 50$  мм, незначительна, с целью обработки необходимого объёма исходной суспензии их рекомендуется компоновать в батареи или мультициклоны, имеющие общее питание, разгрузку слива и шлама. Они получили широкое распространение в горнорудной, угледобывающей, химической, нефтедобывающей и нефтеперерабатывающей, пищевой и микробиологической промышленности, а также в машиностроении [2,3]. По мере повышения технологических требований к разделяемым продуктам разрабатыва-

УДК 543.3: 621.532

**Громыко О.В., Санюкевич Ф.М.**

## РАСЧЁТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЦИКЛОННЫХ АППАРАТОВ

Для снижения массы циклонных аппаратов в конструкциях мультициклонов используют тонкие цилиндрикоконические оболочки. При работе с агрессивными средами их выполняют из химически стойких материалов: композитов, пластмасс. На пути подобного совершенствования конструкции встаёт проблема исследования динамических характеристик, так как частоты собственных колебаний оболочечной части системы снижаются и могут совпадать с частотами возмущающих воздействий, т.е. входить в зону резонанса. В результате амплитуды колебаний значительно увеличиваются, что существенно сказывается не только на эффективности работы самих аппаратов, но и на динамической прочности всей конструкции.

Исследование собственных колебаний оболочек циклонов проводили на базе уравнений теории оболочек с учетом деформаций поперечного сдвига [1]. Для замкнутых в окружном направлении оболочек основные соотношения могут быть записаны для каждой  $n$ -й гармоники разложений факторов напряжённо-деформированного состояния в тригонометрические ряды Фурье по окружной координате.

Уравнения движения элемента оболочки в векторно-матричной форме имеют вид [2]:

$$[L_1]\{q_1\} + [L_2]\{q_2\} = \{p\}, \quad (1)$$

где  $[L_1], [L_2]$  - операторные матрицы размерностью  $5 \times 5$ ;

$$\{q_1\} = (T_1 T_{12} N_1 M_1 M_{12})^T, \quad \{q_2\} = (T_2 T_2 N_2 M_2 M_{21} M_2)^T$$

- векторы внутренних сил и моментов;

$$\{p\} = (p_1 p_2 p_3 p_4 p_5)^T \text{ - вектор внешних нагрузок.}$$

В задачах динамики при отсутствии внешних сил в соответствии с принципом Даламбера

$$\{p\} = -[\bar{m}] \frac{\partial}{\partial t^2} \{\delta\}, \quad (2)$$

где  $[\bar{m}]$  - матрица инверсионных характеристик размерностью  $5 \times 5$ ;  $\{\delta\} = (uvw\zeta_1\zeta_2)^T$  - вектор смещений точек средней поверхности оболочки.

ются новые конструкции аппаратов, в которых сочетается комбинированное воздействие на исходную суспензию центробежного, электрического, электромагнитного, ультразвукового и других полей.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шестов Р.Н. Гидроциклоны.-Л.: Машиностроение, 1967. - 80с.
2. Найденко В.В. Применение математических методов и ЭВМ для оптимизации и управления процессами разделения суспензий в гидроциклонах. Горький: Волго-Вятское кн. издательство, - 1976. - 287с.
3. Исследование и промышленное применение гидроциклонов: Тезисы докладов первого симпозиума. Горький - 1981. - 300с.

Связь компонент векторов  $\{q_1\}$  и  $\{q_2\}$  с компонентами векторов деформированного состояния  $\{l_1\} = (\varepsilon_1 \omega_1 \gamma_1 x_1 \tau_1)^T$  и  $\{l_2\} = (\varepsilon_2 \omega_2 \gamma_2 x_2 \tau_2)^T$  записывается в форме физических соотношений.

$$\begin{aligned} \{q_1\} &= [B_1]\{l_1\} + [B_2]\{l_2\}, \\ \{q_2\} &= [B_3]\{l_1\} + [B_4]\{l_2\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $[B_i]$  ( $i=1, \dots, 4$ ) - матрицы жесткостей размерности  $5 \times 5$ .

Для обеспечения замкнутости системы уравнений добавим геометрические соотношения, описывающие дифференциальную связь деформаций с компонентами вектора  $\{\delta\}$ :

$$\{l_1\} = [L_3]\{\delta\}, \quad \{l_2\} = [L_4]\{\delta\} \quad (4)$$

где  $[L_3], [L_4]$  - операторные матрицы размерностью  $5 \times 5$ .

Решение отыщем в форме периодических функций

$$\{\delta\} = \{\bar{\delta}\} e^{j\omega t}, \quad (5)$$

где  $\omega$  - круговая частота собственных колебаний;  $\{\bar{\delta}\}$  - амплитудное значение вектора  $\{\delta\}$ ;  $j = \sqrt{-1}$ .

Последовательно исключая векторы  $\{q_1\}$  и  $\{q_2\}$  из соотношений (1)...(5), получаем обыкновенное дифференциальное матричное уравнение колебаний

$$\begin{aligned} [A_1] \frac{d^2}{dx^2} \{\bar{\delta}\} + [A_2] \frac{d}{dx} \{\bar{\delta}\} + [A_3] \{\bar{\delta}\} = \\ = \omega^2 [\bar{m}] \{\bar{\delta}\} \end{aligned} \quad (6)$$

где  $x$  - меридиональная координата оболочки.

Дополняя систему дифференциальных уравнений (6) граничными условиями [2], получаем краевую задачу на собственные значения. Решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений 2-го порядка вдоль меридиональной координаты  $x$  осуществлялось методом конечных разностей