

O‘ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI
АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

МЕХАНИКА
МУАММОЛАРИ

O‘ZBEKISTON
JURNALI

2
2019

УЗБЕКСКИЙ
ЖУРНАЛ

ПРОБЛЕМЫ
МЕХАНИКИ

Журнал под таким названием издается с января 1992 г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор - акад. АН РУз Т.Р. РАШИДОВ
Зам. главного редактора, и.о. секретаря – докт. техн. наук, проф. Г.Х. ХОЖМЕТОВ

Члены редколлегии: докт. техн. наук, проф. А. АБДУСАТТАРОВ,
докт. физ.-мат. наук Р.А. АБИРОВ, докт. техн. наук, проф. Р.И. БАЙМЕТОВ,
докт. техн. наук Г.А. БАХАДИРОВ, докт. физ.-мат. наук, проф. А.Б. БЕГМАТОВ,
докт. техн. наук А.Д. ДАМИНОВ, докт. техн. наук, проф. А. ДЖУРАЕВ,
докт. физ.-мат. наук, проф. Н.А. КОРШУНОВА, докт. техн. наук, проф. Ш. МАМАТКУЛОВ,
докт. физ.-мат. наук, проф. Б.М. МАРДОНОВ, докт. техн. наук, проф. Э.Ж. МАХМУДОВ,
докт. техн. наук, проф. А.А. РИЗАЕВ, докт. техн. наук, проф. З. СИРОЖИДДИНОВ,
докт. физ.-мат. наук, проф. Б.Х. ХУЖАЁРОВ, докт. техн. наук, проф. А.А. ШЕРМУХАМЕДОВ,
докт. техн. наук, проф. Ш.С. ЮЛДАШЕВ, канд. техн. наук Х.С. САГДИЕВ

В работе редколлегии принимают участие:

докт. техн. наук, проф. А. АБДУЖАББАРОВ,
докт. техн. наук, проф. Е.А. ИСАХАНОВ

Адрес редакции:
100125, Ташкент, Академгородок, Дурмон йули, 33.
Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз

Телефон: + 99871 262-78-34

Факс: +99871 262-71-52

E-mail: tur.rashidov@list.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ – КОТЛА ЦИСТЕРНЫ ПО ПОЛУБЕЗМОМЕНТНОЙ ТЕОРИИ

При проектировании реальных конструкций наряду с точным численным решением может оказаться полезным приближенное аналитическое решение, дающее простую расчетную формулу и правильно отражающее влияние основных факторов. В этом отношении для ряда задач прочности и устойчивости изотропных и ортотропных оболочек полубезмоментная теория В.З. Власова даёт возможность построить такое упрощенное аналитическое решение. Поэтому при выводе основной зависимости для анализа НДС цилиндрической части оболочных конструкций – котла цистерны воспользуемся полубезмоментной теорией В.З. Власова [1 – 3].

Постановка задачи. Рассмотрим построение геометрических и физических соотношений для цилиндрической части цистерны. Пусть R – радиус дуги окружности срединной поверхности, $\alpha = x/R$ – относительное расстояние в направлении образующей, $\beta = s/R$ – центральный угол пропорциональной дуги s поперечного круга. В этом случае $A=R$, $B=R$, $k_1=0$, $k_2=1/R$.

Приведем геометрические соотношения, связывающие компоненты деформации и углы поворота с перемещениями срединной поверхности цилиндрической части оболочки. Согласно [1], для выражения параметров ε_1 , ε_2 , γ и χ_1 , χ_2 , χ имеем:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial U}{\partial \alpha}, \quad \varepsilon_2 = \frac{1}{R} \left(\frac{\partial V}{\partial \beta} - W \right), \quad \gamma = \frac{1}{R} \left(\frac{\partial V}{\partial \alpha} + \frac{\partial U}{\partial \beta} \right), \quad \chi_1 = \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha^2}, \\ \chi_2 &= \frac{1}{R^2} \left(\frac{\partial^2 W}{\partial \beta^2} + W \right), \quad \tau = \frac{1}{2R^2} \left(\frac{\partial U}{\partial \beta} - \frac{\partial V}{\partial \alpha} + 2 \frac{\partial^2 W}{\partial \alpha \partial \beta} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Связь между деформациями и силовыми факторами для оболочки выражается уравнениями

$$\begin{aligned} N_1 &= \frac{Eh}{1-\nu^2} (\varepsilon_1 + \nu \varepsilon_2), \quad N_2 = \frac{Eh}{1-\nu^2} (\varepsilon_2 + \nu \varepsilon_1), \quad S = \frac{Eh}{2(1+\nu)} \gamma, \quad M_1 = D(\chi_1 + \nu \chi_2), \\ M_2 &= D(\chi_2 + \nu \chi_1), \quad H = D(1-\nu)\tau. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения равновесия рассматриваемого элемента оболочки в безразмерных координатах (α, β) при отсутствии поверхностных сил определяются следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} 1) \quad \frac{\partial N_1}{\partial \alpha} + \frac{\partial S}{\partial \beta} &= 0; & 2) \quad \frac{\partial S}{\partial \alpha} + \frac{\partial N_2}{\partial \beta} + Q_1 &= 0; & 3) \quad \frac{\partial M_1}{\partial \alpha} - \frac{\partial H}{\partial \beta} - RQ_1 &= 0; \\ 4) \quad \frac{\partial M_2}{\partial \beta} - \frac{\partial H}{\partial \alpha} - RQ_2 &= 0; & \frac{\partial Q_1}{\partial \alpha} + \frac{\partial Q_2}{\partial \beta} - N_2 &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Для определения внутренних усилий и перемещений используем полубезмоментную теорию оболочек. Модель такой оболочки можно получить, если в уравнениях равновесия (3) положить равными нулю поперечные силы и изгибающие моменты, а также крутящие моменты:

$$Q_1 = M_1 = H = 0.$$

Кроме того, вводятся геометрические гипотезы, согласно которым считается срединная поверхность нерастяжимой в дуговом направлении и деформация сдвига в срединной поверхности отсутствует, т.е. $\varepsilon_2=0$ и $\gamma=0$. Согласно принятым предположениям, уравнения равновесия после исключения из них S_1 , N_2 и Q приводятся к одному уравнению [1, 2]:

$$R \frac{\partial^2 N_1}{\partial \alpha^2} + \Omega M = 0, \quad (4)$$

где $\Omega = \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \left(1 + \frac{\partial^2}{\partial \beta^2} \right)$ – оператор В.З. Власова.

Второе уравнение получаем, исключив из первых четырех уравнений (2) перемещения U , V , W с учетом вышеотмеченных гипотез. Оно представляет собой уравнение неразрывности деформаций и имеет вид

$$\Omega \varepsilon_1 + R \frac{\partial^2 \chi_2}{\partial \alpha^2} = 0. \quad (5)$$

Предполагая, что коэффициент Пуассона $\mu=0$, из первого уравнения (4) находим ε_1 , а из пятого χ_1 :

$$\varepsilon_1 = \frac{N_1}{Eh}, \quad \chi_2 = -\frac{12}{Eh^3} M. \quad (6)$$

С учетом (6) уравнение (5) имеет вид

$$\Omega N_1 - \frac{12R}{h^2} \frac{\partial^2 M}{\partial \alpha^2} = 0. \quad (7)$$

Уравнения (4) и (7) представляют полную систему совместных дифференциальных уравнений. Решив систему, определяем основные усилия N_1 и M и через них находим напряжения.

Из третьего и четвертого уравнений (1) найдем Q_1 и Q_2 , и подставим в пятое уравнение. Тогда получим

$$\frac{\partial N_1}{\partial \alpha} + \frac{\partial S}{\partial \beta} = 0; \quad \frac{\partial S}{\partial \alpha} + \frac{\partial N}{\partial \beta} - Q = 0; \quad \frac{\partial^2 M_1}{\partial \alpha^2} - 2 \frac{\partial^2 H}{\partial \alpha \partial \beta} + \frac{\partial^2 M}{\partial \beta^2} + RN_2 = 0. \quad (8)$$

Методика решения. Представим тангенциальное перемещение в виде ряда [1]

$$V = \sum_{n=2}^{\infty} V_n(\alpha) \sin n\beta. \quad (9)$$

Здесь коэффициенты $V_n(\alpha)$ зависят только от координаты α и выражают обобщенные перемещения оболочки. Функция удовлетворяет условиям периодичности и называется функцией поперечного распределения перемещений. Из геометрических соотношений (2) на основании гипотезы об отсутствии сдвигов и удлинения контура поперечного сечения ($\gamma=0$; $\varepsilon_2=0$) находим для n -го члена ряда функции перемещений U_n и W_n :

$$W_n(\alpha) = V_n(\alpha) n \cos n\beta, \quad U_n(\beta) = \frac{\partial V_n(\alpha)}{\partial \alpha} \cdot \frac{1}{n} \cos n\beta. \quad (10)$$

Подставляя в уравнения (3) выражения (4) с учетом формул (9) и (10), получим следующие соотношения для определения членов ряда внутренних сил [1, 2]:

$$\begin{aligned} N_{n1} &= \frac{Eh}{R} \cdot \frac{\partial^2 V_n(\alpha)}{\partial \alpha^2} \cdot \frac{1}{n} \cos n\beta; \quad H_n = -\frac{Eh^3}{12R} \cdot \frac{\partial V_n(\alpha)}{\partial \alpha} \cdot n^2 \sin n\beta; \\ M_{n1} &= -\frac{Eh^3}{12R^2} \cdot \frac{\partial^2 V_n(\alpha)}{\partial \alpha^2} \cdot n \cos n\beta; \quad M_n = -\frac{Eh^3}{12R} \cdot V_n(\alpha) n(n^2 - 1) \cos n\beta. \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, согласно уравнениям (10) и (11), все неизвестные силы и перемещения будут выражены через тангенциальную составляющую $V(\alpha)$ полного перемещения. Для определения искомой функции $V(\alpha)$ воспользуемся принципом возможных перемещений. Чтобы применить этот принцип, сведем три уравнения равновесия к одному:

$$\frac{\partial^2 N_1}{\partial \alpha^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial^4 M_1}{\partial \alpha^2 \partial \beta^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial^4 M}{\partial \beta^4} + \frac{1}{R} \frac{\partial^2 M}{\partial \beta^2} - \frac{2}{R} \frac{\partial^4 H}{\partial \alpha \partial \beta^3} = 0. \quad (12)$$

Умножим уравнение (12) на возможное перемещение $\cos n\beta$ и проинтегрируем по окружности поперечного сечения оболочки. С учетом ортогональности тригонометрических функций приходим к бесконечной системе однородных независимых уравнений относительно $V_n(\alpha)$:

$$V_n^{IV}(\alpha) - 2r_n^2 V_n^{II}(\alpha) + S_n^4 V_n(\alpha) = 0, \quad (13)$$

$$\text{где } r_n^2 = \frac{Jn^6}{R^2h + Jn^4}; \quad S_n^4 = \frac{Jn^4(n^2 - 1)}{R^2h + Jn^4}; \quad J = \frac{h^3}{12}.$$

Корни характеристического уравнения являются комплексными вида $k = \pm\gamma \pm i\beta$, где коэффициенты γ и β действительные и положительные числа, определяемые по формулам

$$\gamma = \sqrt{\frac{s^2 + r^2}{r}}; \quad \beta = \sqrt{\frac{s^2 - r^2}{r}}.$$

Решение дифференциальных уравнений (13) может быть представлено в виде

$$V(\alpha) = c_1\phi_1 + c_2\phi_2 + c_3\phi_3 + c_4\phi_4. \quad (14)$$

где $\phi_1 = ch\gamma\alpha \sin \beta\alpha$, $\phi_2 = ch\gamma\alpha \cos \beta\alpha$, $\phi_3 = Sh\gamma\alpha \cos \beta\alpha$, $\phi_4 = sh\gamma\alpha \sin \beta\alpha$ – функции; c_1, c_2, c_3, c_4 – постоянные интегрирования.

Таким образом, решение однородного уравнения (13) имеет вид (14). Определив произвольные постоянные c_1, c_2, c_3, c_4 , найдем перемещение $V(\alpha)$.

Пример расчета. В качестве примера рассмотрим процедуру расчета цилиндрической оболочки, усиленной в опорных сечениях $z=0$ и $z=l$ жесткими кольцами (рис. 1).

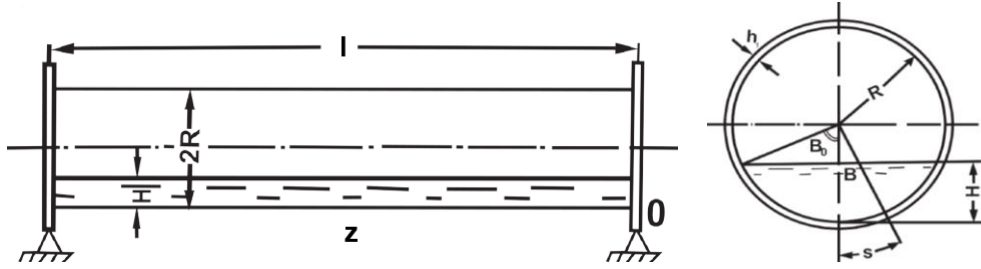


Рис. 1. Расчетная схема цилиндрической оболочки

Предположим, что оболочка заполнена до некоторого уровня H жидкостью, создающей нормальные давления $p_n = p_n(s)$ на её стенки.

Давление жидкости P_n определяется по формуле [2]:

$$p_n = -\tilde{\gamma}R(\cos \beta - \cos \beta_0), \quad (15)$$

где $\tilde{\gamma}$ – объемный вес жидкости; β_0 – центральный угол, характеризующий степень наполнения оболочки.

Предполагая, что оболочка подвержена действию только нормальной нагрузки $P_n(z,s)$, решающая система уравнений будет сведена к виду [1]

$$F_n^{IV} + 4\mu_n^4 F_n = G_n, \quad (16)$$

$$\text{где } \mu_n^4 = \frac{h^2}{48} \frac{n^4(n^2 - 1)^2}{R^6};$$

$$G_n = -\frac{n^2}{\pi R h E} \int p_n \cos n\beta d\beta. \quad (17)$$

Общее решение дифференциального уравнения (16) имеет вид

$$F_n = C_1 \Phi_1 + C_2 \Phi_2 + C_3 \Phi_3 + C_4 \Phi_4 + F_n^0,$$

где F_n^0 – частный интеграл неоднородного уравнения (16), зависящий от характера внешней нагрузки P_n .

Если искомую функцию F_n представим в виде ряда

$$F_n = \sum_m A_{nm} \sin \frac{m\pi z}{l}, \quad (18)$$

то для коэффициентов A_{nm} получим

$$A_{nm} = \frac{2}{l((n\pi/l)^4 + 4\mu_n^4)} \int_0^l G_n \sin \frac{m\pi z}{l} dz.$$

Подставляя (15) в (17), после некоторых преобразований для G_n получаем

$$G_n = \frac{2n^2 \gamma}{\pi E h} \left[\frac{\sin(n+1)\beta_0}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\beta_0}{2(n-1)} - \frac{\sin n\beta_0 \cos \beta_0}{n} \right].$$

Согласно приведенным формулам, для функции перемещений имеем

$$\Phi = \frac{8\gamma l^4}{\pi^2 E h} \sum_n \sum_m \frac{n^2 \omega_n}{m \left[m^4 \pi^4 + \frac{n^4 (n^2 - 1)^2}{12} \frac{h^2 l^4}{R^6} \right]} \sin \frac{m\pi z}{l} \cos n\beta.$$

$$\text{Здесь } \omega_n = \frac{\sin(n+1)\beta_0}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\beta_0}{2(n-1)} - \frac{\sin n\beta_0 \cos \beta_0}{n}.$$

Перемещения и внутренние усилия оболочки через функции перемещений определяются следующим образом:

$$u(z, s) = -\frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad v(z, s) = \frac{\partial \Phi}{\partial s}, \quad w(z, s) = R \frac{\partial^2 \Phi}{\partial s^2}, \quad \sigma(z, s) = -E \frac{\partial \Phi}{\partial z^2}. \quad (19)$$

Отсюда следует, что

$$\begin{aligned} w(z, s) &= -\frac{8\tilde{\gamma} l^4}{\pi^2 E R h} \sum_n \sum_m \frac{n^4 \omega_n}{m \left[m^4 \pi^4 + \frac{n^4 (n^2 - 1)^2}{12} \frac{h^2 l^4}{R^6} \right]} \sin \frac{m\pi z}{l} \cos n\beta, \\ M(z, s) &= -\frac{2\tilde{\gamma} l^4 h^2}{3\pi^2 R^3} \sum_n \sum_m \frac{n^4 (n^2 - 1) \omega_n}{m \left[m^4 \pi^4 + \frac{n^4 (n^2 - 1)^2}{12} \frac{h^2 l^4}{R^6} \right]} \sin \frac{m\pi z}{l} \cos n\beta, \\ \sigma(z, s) &= -\frac{8\tilde{\gamma} l^2}{h} \sum_n \sum_m \frac{mn^2 \omega_n}{m^4 \pi^4 + \frac{n^4 (n^2 - 1)^2}{12} \frac{h^2 l^4}{R^6}} \sin \frac{m\pi z}{l} \cos n\beta. \end{aligned} \quad (20)$$

В таблице приведены численные результаты расчета цилиндрической оболочки – котла цистерны (для сечения $z=l/2$) при следующих исходных данных: $R=150$ см; $l=1120$ см; $h=0.6$ см; $\beta_0=33^\circ$; $\tilde{\gamma}=0.001$ кг/см².

Результаты расчетных величин

	β	$U(z,s) \cdot 10^6$	$V(z,s)$	$W(z,s)$	$M(z,s)$	$\sigma(z,s)$
$n=2$	0	4.13911	0	-0.0622133	-0.298624	36.7416
	$\pi/6$	2.06804	-0.0269457	-0.031084	-0.149203	18.3574
	$\pi/3$	-2.07257	-0.026926	0.0311521	0.14953	-18.3976
	$\pi/2$	-4.1391	3.93319e-005	0.0622133	0.298624	-36.7416
	$2\pi/3$	-2.06351	0.0269653	0.0310158	0.148876	-18.3171
	$5\pi/6$	2.0771	0.0269063	-0.0312201	-0.149857	18.4378
	π	4.13909	-7.86638e-005	-0.0622131	-0.298623	36.7415
$n=3$	0	6.43922	0	-0.217767	-2.78742	57.159
	$\pi/6$	-0.0040709	-0.0725891	0.000137675	0.00176224	-0.0361365
	$\pi/3$	-6.43922	9.17832e-005	0.217767	2.78742	-57.159
	$\pi/2$	0.0012214	0.072589	-0.000413076	-0.0052873	0.108423
	$2\pi/3$	6.4392	-0.000183566	-0.217767	-2.78741	57.1588
	$5\pi/6$	-10.8037	-0.0725888	0.000688425	0.00881184	-0.180696
	π	-6.43918	0.000275384	0.217766	2.7874	-57.1586
$n=4$	0	3.11144	0	-0.187068	-4.48962	27.6193
	$\pi/6$	-1.55799	-0.0404816	0.0936703	2.24809	-13.8298
	$\pi/3$	-1.55118	0.0405407	0.0932606	2.23825	-13.7693
	$\pi/2$	3.11143	-0.000118266	-0.187067	-4.48961	27.6192
	$2\pi/3$	-1.5648	-0.0404223	0.0940795	2.25791	-13.8902
	$5\pi/6$	-1.54435	0.0405995	0.0928501	2.2284	-13.7087
	π	3.1114	-0.000236531	-0.187065	-4.48957	27.619

На рис. 2 представлена эпюра нормальных напряжений для сечения $z=l/2$ при различных значениях $n=1, 2, 3, 4$. Сравнивая эти эпюры, заметим, что расчетные напряжения цилиндрической оболочки – котла цистерны существенно отличаются от напряжений, вычисленных при $n=1$.

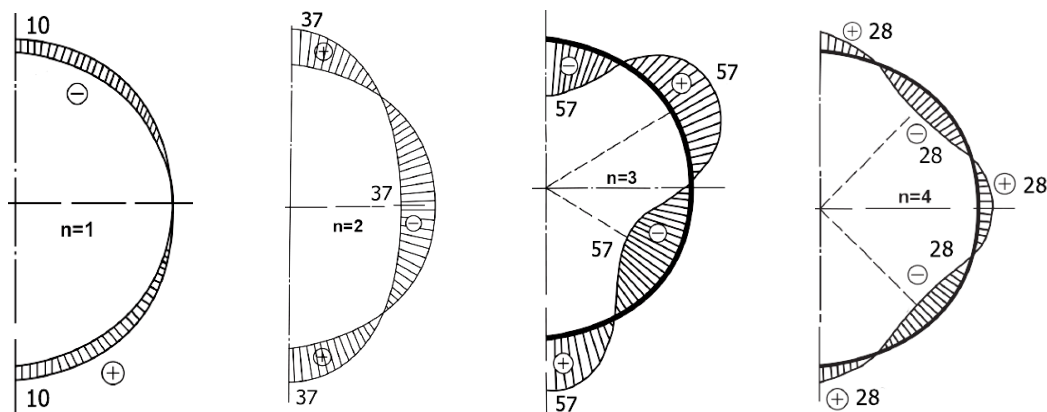


Рис. 2. Эпюры нормальных напряжений для сечения $z=l/2$ при различных значениях n

Теперь рассмотрим схему расчета оболочки – котла цистерны под действием q , равномерно распределенной вдоль образующей. В этом случае, исходя из формулы (17), для G_n имеем:

$$G_n = \frac{n^2 q}{\pi R^2 h E}. \quad (21)$$

Представим, как и ранее, функцию $F_n(z)$ в виде (18), а для коэффициентов A_{nm} имеем:

$$A_{nm} = -\frac{4n^2}{\pi^2 m} \frac{ql^4}{ER^2 h \left[m^4 \pi^4 + \frac{n^4(n^2-1)^2}{12} \frac{h^2 l^4}{R^6} \right]} \sin \frac{m\pi z}{l} \cos n\beta, \quad (n=2,3,4,\dots; m=1,3,5,\dots).$$

Согласно (16), определяем напряжение $\sigma(z,s)$ по формуле

$$\sigma = -\frac{q}{h} \frac{l^2}{R^2} \sum_n \sum_m \frac{4mn^2}{m^4 \pi^4 + \frac{n^4(n^2-1)^2}{12} \frac{h^2 l^4}{R^6}} \sin \frac{m\pi z}{l} \cos n\beta. \quad (22)$$

Теперь представим формулу (22) при $z=l/2$ в виде $\sigma = \frac{q\bar{\sigma}}{h\alpha^2}$,

где

$$\alpha = \frac{R}{l}, \quad \bar{\sigma} = \sum_1^m \left[\frac{4mn^2}{m^4 \pi^4 + \frac{n^4(n^2-1)^2}{12} \frac{h^2 l^4}{R^6}} \right] \cos n\beta. \quad (23)$$

Нетрудно построить эпюры $\bar{\sigma}$, рассчитанные по формуле (23) для значений α и $\gamma=h/R$.

Аналогично могут быть представлены и другие виды внешней нагрузки, например, в случае подкрепления оболочки упругим шпангоутом в зоне опор котла [2 – 4]. Подкрепление котла шпангоутами позволяет при малой толщине стенки обеспечить необходимую устойчивость котла, уменьшить статические и динамические напряжения в котле и увеличить частоту собственных колебаний оболочки [4]. В работе [5] на основе использования вариационного принципа Гамильтона – Остроградского получены уравнения равновесия (движения) применительно к цилиндрической части оболочечных конструкций с соответствующими граничными и начальными условиями. Задача решается с применением методов конечных разностей и прогонки.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В л а с о в В.З. Общая теория оболочек и ее приложения в технике. М.: Гостехиздат, 1949. – 761 с.
- [2] В е р ш и н с к и й С.В. и д р. Расчет вагонов на прочность. М.: Машиностроение, 1971. – 432 с.
- [3] К о т у р а н о в В.Н. Нагруженность элементов конструкций вагонов. М.: Транспорт, 1991. – 238 с.
- [4] О с и п о в Т.А. Определение частот собственных колебаний котлов цистерны // Труды МИИТа, 1968. С. 71 – 79.
- [5] А б д у с а т т а р о в А., С а б и р о в Н.Х. К решению разностных краевых задач составных оболочечных конструкций типа цистерны // Проблемы механики. 2018. № 1. С. 6 – 12.

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

Дата поступления
22.05.2019

А. Абдусаттаров, Н. Х. Сабиров. Цистерна типдаги цилиндрик қобикни кучланганлик ва деформацияланганлик ҳолати тадқиқ қилиш

Ушбу мақолада цистерна типдаги цилиндрик қобикни кучланганлик ва деформацияланганлик ҳолатини ҳисоблашни В.З. Власовнинг ярим-момент назарияси асосида аналитик ва сонли ечимлари график ва жадвал кўринишида келтирилган.

A. Abdusattarov, N.H. Sabirov. Investigation of the stress-strain state of a cylindrical shell-tank boiler according to a semi-momentless theory

In this work, the stress-strain state of a cylindrical shell – a tank boiler – was studied using the half-momentless theory of V.Z. Vlasov, given analytical and numerical solutions in the form of tables and graphs.

**А.И. АДЫЛХОДЖАЕВ, И.М. МАХАМАТАЛИЕВ, В.М. ЦОЙ,
И.А. КАДЫРОВ**

ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ НАПОЛНЕНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ МЕСТНЫМИ ЦЕОЛИТСОДЕРЖАЩИМИ ПОРОДАМИ

В настоящее время на предприятиях строительного комплекса Республики Узбекистан ведутся широкомасштабные работы по сокращению производственных затрат и повышению качества продукции. Внедряются новые технологии в производство бетона с целью экономии материалов и, прежде всего, цемента как наиболее дорогого из них.

Сегодня минеральные добавки стали почти обязательным компонентом бетона, обеспечивающим улучшение его технических свойств. В сравнении с другими видами добавок они создают предпосылки для более глубокого течения физико-химических взаимодействий и эффективно влияют на формирование структуры и свойств бетона с одновременным созданием резерва для экономии цемента.

В данном контексте несомненный интерес представляют наполненные системы, в которых применяются порошкообразные вещества, обладающие способностью к самостоятельному гидратационному твердению [1].

Наиболее распространенная группа таких соединений – природные цеолиты. Это новый, нетрадиционный, чрезвычайно перспективный тип неметаллических полезных ископаемых, использование которых в промышленности началось в 60-е годы прошлого столетия и связано с открытием в мире месторождений, образовавшихся за счет преобразования вулканического стекла.

В Республике Узбекистан в начале 1970-х годов были открыты месторождения цеолитосодержащих пород (ЦСП) [2]. Среди них особый интерес представляют ЦСП горной возвышенности Бельтау, которая находится в окрестности хребта Кульджуктау в пределах южной части Центральных Кызылкумов.

Цеолиты – алюмосиликаты со скелетной структурой, содержащие пустоты, занятые ионами щелочных и щелочноземельных металлов K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} и молекулами воды, имеющими значительную свободу движения, что приводит к ионному обмену и обратимой дегидратации [3].

Вследствие особенностей строения цеолитов: пористости микроструктуры, уникальной адсорбционной, ионообменной и каталитической способностей они способны участвовать в физико-химических процессах организации структуры цементного камня [4].

Для выявления эффективности наполнения цементных бетонов цеолитсодержащими породами Бельтауского месторождения и изучения технологических особенностей приготовления бетонных смесей с таким нетрадиционным наполнителем в лаборатории ТашИИТ проведены комплексные исследования в рамках государственных научно-технических программ и госбюджетных НИР.

В статье представлены результаты экспериментов по изучению влияния степени наполнения цеолитсодержащей породой модифицированного мелкозернистого (ММБ) и тяжелого бетонов на его прочностные показатели и параметры пористости.

Исследования выполнялись с использованием методов математического планирования эксперимента в трехфакторном пространстве. В качестве варьируемых факторов были приняты:

x_1 – степень наполнения цеолитом, % от массы цемента (Н/Ц), от 10 до 20 %;

x_2 – степень наполнения песком (П/Ц), от 1/1 до 4/1;

x_3 – водоцементное отношение (В/Ц), от 0.6 до 0.9.

Моделирование заключалось в определении коэффициентов регрессии полиномиального уравнения вида

$$Y = A_1x_1 + A_2x_2 + A_3x_3 + A_{12}x_1x_2 + A_{13}x_1x_3 + A_{23}x_2x_3 + A_{1-2}x_1x_2(x_1 - x_2) + A_{13}x_1x_3(x_1 - x_3) + A_{2-3}x_2x_3(x_2 - x_3) + A_{123}x_1x_2x_3,$$

где x_1 , x_2 , x_3 – варьируемые факторы; A_1 , A_2 , A_3 , A_{12} , A_{13} , A_{23} , A_{1-2} , A_{1-3} , A_{2-3} , A_{123} – статистически значимые коэффициенты регрессии.

В рамках активного эксперимента, согласно принятому плану, изготавливались образцы из ММБ. В качестве вяжущего использовали портландцемент М400 Ахангаранского цементного завода без минеральных добавок, заполнитель – песок $M_k=1.9$ Куйлюкского карьера. С целью экономии цемента и получения ММБ специальных свойств в состав бетонной смеси вводили наполнитель в виде измельченной цеолитсодержащей породы Бельтауского месторождения дисперсностью 0,14 мм.

Отформованные образцы из ММБ твердели в нормальных температурно-влажностных условиях ($t=20\pm 2^\circ\text{C}$; $\phi=100\%$) в течение 28 суток.

В качестве выходных параметров активного эксперимента были приняты: прочность ММБ при сжатии $R_{сж}$, истинная пористость ММБ - P_u . Испытания бетонных образцов на прочность производили, согласно ГОСТу 10180-90 [5]. Параметр поровой структуры ММБ определяли методом анализа кинетики водопоглощения, согласно ГОСТу 12730.4-78 [6].

После обработки данных активного эксперимента с использованием разработанной программы [7] были получены статистически значимые коэффициенты уравнения регрессии и соответствующие им математические модели.

Матрица планирования активного эксперимента и полученные результаты приведены в табл. 1, а статистически значимые коэффициенты уравнения регрессии – в табл. 2.

Таблица 1

Матрица планирования активного эксперимента и полученные результаты

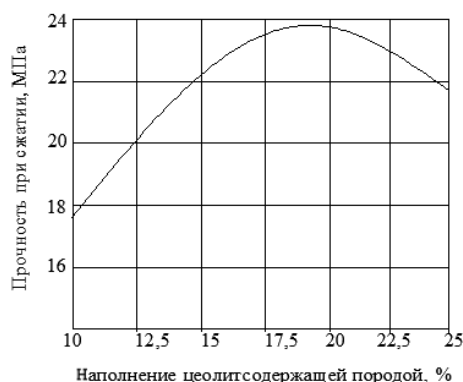
№ точки плана	Варьируемые факторы			Результаты эксперимента	
	X_1	X_2	X_3	$R_{сж}$, МПа	P_u , %
1	1	0	0	20.38	28.00
2	0	1	0	12.93	29.23
3	0	0	1	11.62	34.6
4	1/3	2/3	0	19.66	26.6
5	2/3	1/3	0	23.08	26.98
6	0	1/3	2/3	13.53	30.88
7	0	2/3	1/3	15.87	28.40
8	2/3	0	1/3	16.25	33.35
9	1/3	0	2/3	14.28	35.71
10	1/3	1/3	1/3	17.12	28.00

Таблица 2

Статистически значимые коэффициенты уравнения регрессии

Выходной параметр	A_1	A_2	A_3	A_{12}	A_{13}	A_{23}	A_{1-2}	A_{1-3}	A_{2-3}	A_{123}
$R_{сж}$	3.177	2.723	2.616	1.235	0	0.801	0	0	0.833	-1.530
P_u	3.284	3.326	3.495	0	0.464	0.320	0	0	0	-1.811

Анализ полиномиального уравнения прочности ММБ с использованием разработанных программных средств позволил выявить экстремальное значение $Y=R_{сж}=23.6$ МПа в точке с координатами: $x_1=0.6875$; $x_2=0.3750$; $x_3=0.0310$, что соответствует натуральным значениям: наполнение цеолитсодержащей породой 20 %; П/Ц=1/2.1; В/Ц=0.69. График влияния фактора x_1 на прочность ММБ при сжатии представлен на рисунке.



Влияние степени наполнения ЦСП на прочность ММБ

Анализ графика показывает, что с увеличением степени наполнения цеолитсодержащей породой ММБ прочность на сжатие на начальном этапе существенно возрастает, что связано, по-видимому, с формированием достаточно плотного каркаса структуры и подтверждается уменьшением общей пористости материала. Максимальное значение прочности составляет 23.6 МПа при вве-

дении цеолитсодержащей породы в количестве 20 % от массы цемента. При дальнейшем увеличении степени наполнения происходит пересыщение цементной системы наполнителем, что приводит к резкому падению прочности [8, 9].

Повышение прочности на сжатие ММБ при оптимальных степенях наполнения можно объяснить ориентирующим действием зерен наполнителя из цеолитсодержащей породы на продукты гидратации цемента с образованием кластерных структур. Положительное влияние оказывают также образующиеся в результате химических взаимодействий компонентов смешенного вяжущего дополнительные связи. При большем содержании наполнителя наблюдаются непосредственный контакт его зерен, нарушение сплошности цементной матрицы, что приводит к снижению прочности ММБ. Кроме того, значительно возрастает водопотребность бетонной смеси и, как следствие, пористость материала, так как цеолитсодержащая порода обладает большим количеством внутрикристаллических пустот.

Изменение физико-механических свойств цементных композитов, наполненных ЦСП, также связано с наличием в ней активных кремнезема и глинозема. Цеолитсодержащие породы, выступая в роли активных минеральных наполнителей, интенсивно связывают образующуюся в процессе твердения портландцемента гидроокись кальция и переводят ее в низкоосновные гидросиликаты и гидроалюминаты кальция. Представляется вполне достоверным, что при введении цеолитсодержащей породы в цементную систему свободная гидроокись кальция, образованная в результате гидратации цемента, вступает в реакцию с цеолитом и поглощается им, а это, в свою очередь, обеспечивает ускорение структурообразования ММБ. Дополнительно образующиеся в процессе твердения ММБ низкоосновные гидросиликаты кальция уплотняют структуру цементного камня и упрочняют её.

Выполненные исследования для песчаных бетонов показали высокую эффективность наполнения системы такого вида добавками. Несомненный интерес вызывает вопрос формирования структуры и физико-механических параметров тяжелых бетонов с использованием ЦСП.

Для проведения сопоставимых исследований выбран эффективный комплексно-модифицированный бетон [10] следующего состава, масс. %: цемент – 17.41 – 18.37, щебень – 40.79 – 41.42, песок – 32.22 – 32.64, суперпластификатор С-3 – 0.098 – 0.110, минеральный наполнитель – 0.96 – 1.91, вода – остальное. В качестве минерального наполнителя использован измельченный до удельной поверхности 2200 – 2500 см²/г бетонный лом.

С целью подтверждения предположений на основании лабораторных исследований был разработан состав бетонной смеси, включающий: цемент, щебень, песок, суперпластификатор С-3, минеральный наполнитель, воду и дополнительно кубовый остаток производства На-карбоксиметилцеллюлозы (КОН). В качестве минерального наполнителя использовалась измельченная до удельной поверхности 2200 – 2500 см²/г цеолитсодержащая порода, при следующем соотношении компонентов масс. %: цемент – 13.64 – 17.29, щебень – 40.84 – 41.16, песок – 32.00 – 32.43, суперпластификатор С-3 – 0.049 – 0.054, КОН – 0.049 – 0.055, минеральный наполнитель – 1.91 – 5.81, вода и остальное.

Основанием для проведения сопоставительного анализа явилось то, что в отличие от других порошкообразных компонентов бетонных смесей, в частности измельченного бетонного лома 2200 – 2500 см²/г ЦСП, как отмечалось ранее, вследствие наличия в её составе активных (аморфных) кремнезема и глинозема, обладает способностью интенсивно связывать образующуюся в процессе твердения портландцемента гидроокись кальция и переводить их в низкоосновные гидросиликаты и гидроалюминаты кальция. Это приводит к ускорению структурообразования в цементной системе, а дополнительно образующиеся в процессе твердения низкоосновные гидросиликаты и гидроалюминаты кальция способствуют, с одной стороны, уплотнению структуры цементного камня и упрочнению её, с другой – формирующаяся смесь, обладая большей пластичностью за счёт наличия (до 30 %) монтмориллонитовой составляющей, позволяет значительно уменьшить дозировку суперпластификатора С-3 при сохранении требуемой подвижности бетонной смеси. Снижение дозировки суперпластификатора С-3 и дополнительное введение в состав КОН, содержащих в своем составе соли электролитов (хлорид натрия, глюконат натрия, карбонат натрия), приведут к существенному ускорению процесса твердения бетона. Кроме того, измельчение цеолитсодержащей породы (твёрдость по шкале Мооса – 3 – 4) до удельной поверхности 2200 – 2500 см²/г – значительно менее энергоёмкий процесс, чем измельчение бетонного лома (среднее значение твёрдости составляющих по шкале Мооса – 5 – 6) до удельной поверхности 2200 –

2500 см²/г. Это даёт основание утверждать о значительном снижении энергетических затрат при приготовлении бетонной смеси по разработанному ее новому составу.

Для экспериментальной проверки нового состава бетонной смеси были проведены сравнительные исследования по двум конкурирующим составам (известному по [10] и разработанному).

В экспериментальных исследованиях были использованы: портландцемент М400 Д0 производства ОАО «Ахангаранцемент» (ГОСТ 10178-85), суперпластификатор С-3 – производства ПО «Полипласт» (Россия) (по ТУ 6-14-625-80 и ТУ 6-05-61-88), кубовые остатки производства На-карбоксиметилцеллюлозы (КОН) Наманганского химзавода (ТУ 6-05-351-7-82), речной кварцевый песок Майского карьера с модулем крупности 1.81 и средней плотностью ~2000 кг/м³ (ГОСТ 26633-2012), щебень фракции 5 – 10 мм Эйвалекского карьера, средней плотностью 1400 кг/м³ (ГОСТ 26633-2012), цеолитсодержащая порода Бельтауского месторождения.

Из полученных бетонных смесей формовали образцы-кубы стандартного размера 15×15×15 см в количестве 6 штук. Образцы хранили в нормальных температурно-влажностных условиях в течение 28 суток, после чего производили испытание на сжатие. Соотношение компонентов бетонных смесей и полученные результаты испытаний образцов приведены в таблице.

Соотношение компонентов бетонных смесей и полученные результаты испытаний проб бетонной смеси и образцов бетона

Вид минерального наполнителя	Степень наполнения цемента, %	Состав бетонной смеси: числитель – кг на 1 м ³ смеси, знаменатель – масс. %							Прочность при сжатии, МПа			
		цемент	наполнитель	песок	щебень	суперпластификатор С-3	КОН	вода	возраст, сутки			
									1	3	7	28
Бетонная смесь на основе измельченного бетонного лома $S_{уд} = 2500$ см ² /г	5	439/18.45	23/0.96	780/32.43	990/41.16	2.63/0.109	-	170/7.07	11.55	25.10	37.65	49.2
	10	415/17.26	46/1.91	770/32.00	978/40.66	2.49/0.104	-	165/6.86	11.94	25.95	38.92	50.9
	15	390/16.22	70/2.91	760/31.60	970/40.33	2.34/0.097	-	170/7.07	10.64	23.15	34.72	46.3
Бетонная смесь с применением измельченной цеолитсодержащей породы $S_{уд} = 2500$ см ² /г	10	416/17.29	46/1.91	780/32.43	990/41.16	1.31/0.054	1.31/0.054	170/7.07	19.88	36.92	51.12	56.8
	20	370/15.49	92/3.85	770/32.24	978/40.95	1.25/0.052	1.25/0.052	175/6.86	21.63	40.17	55.62	61.80
	30	324/13.64	138/5.81	760/32.00	970/40.84	1.17/0.049	1.17/0.049	180/7.07	20.12	37.70	51.75	57.50

Анализ полученных результатов (см. таблицу) показывает, что по предлагаемому составу бетонной смеси во всех 3 примерах имеет место увеличение прочности бетона на сжатие по сравнению с составом бетонной смеси по прототипу на 15.5 – 22.0 %. При этом рост прочности бетона в ранние сроки твердения (1, 3, 7 суток) также превышает показатели в среднем на 15 %. Морозостойкость бетона, полученного по предлагаемому составу, превышает показатели бетона по прототипу в 1.5 раза. Кроме того, снижение энергетических затрат при получении минерального наполнителя также достигает существенных значений, так как измельчение цеолитсодержащих пород до удельной поверхности 2200 – 2500 см²/г в сравнении с прототипом, где предусмотрено измельчение бетонного лома до удельной поверхности 2200 – 2500 см²/г, сокращает продолжительность помола в наиболее распространенных шаровых мельницах как минимум на 1 час.

Таким образом, разработанный состав бетонной смеси позволяет полностью достичь поставленных целей: повышения прочности и морозостойкости КМБ, ускорения процесса его

твердения, снижения энергетических затрат при получении бетонной смеси. В целом приведенные результаты исследований наглядно подтверждают высокую эффективность наполнения цементных бетонов местными цеолитсодержащими породами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Батраков В.Г., Каприелов С.С., Шейнфельд А.Ф. Эффективность применения ультрадисперсных отходов ферросплавного производства // Бетон и железобетон. 1989. № 8. С. 24 – 25.
- [2] Колдаев А.А. Цеолитсодержащие породы Западного Узбекистана и проблемы их использования. Ташкент: Фан, 1989. – 123 с.
- [3] Муминов С.З. Исследования в области термодинамики и термохимии адсорбции на глинистых минералах. Ташкент, 1987. – 121с.
- [4] Адылходжаев А.И., Махаматалиев И.М., Цой В.М. Методологические основы исследования многокомпонентных высококачественных бетонов нового поколения. Ташкент: Fan va Texnologiya, 2018. – 156 с.
- [5] ГОСТ 10180-90. Бетоны. Методы определения прочности. М.: ЦИТП, 1990.
- [6] ГОСТ 12730.4-78. Бетоны. Методы определения показателей пористости. М.: Стандартиформ, 2007.
- [7] Адылходжаев А.И., Махаматалиев И.М., Цой В.М. Планирование полного факторного эксперимента. Агентство по интеллектуальной собственности Республики Узбекистан. Свидетельство об официальной регистрации программы для электронно-вычислительных машин. № DGU 03293 от 01 июля 2015 г.
- [8] Соломатов В.И. Полиструктурная теория композиционных строительных материалов // Новые композиционные материалы в строительстве. Саратов, 1981. С. 5 – 9.
- [9] Соломатов В.И., Селяев В.П. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов. М.: Стройиздат, 1987. – 264 с.
- [10] Бибик М.С., Блещик М.П., Тулупов И.И. Бетонная смесь. Национальный центр интеллектуальной собственности Республики Беларусь. Свидетельство об официальной регистрации изобретения. № BY11727C1 от 30 апреля 2008 г.

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

Дата поступления
22.05.2019

А.И. Ади́лходжаев, И.М. Махаматалиев, В.М. Цой, И.А. Кади́ров. Маҳаллий зеолит таркибли тоғ жинслари билан цемент бетонларни тўлдириш самарадорлиги

Ушбу мақолада модификацияланган зеолит таркибидаги тоғ жинслари (ММБ) ва оғир бетоннинг мустаҳкамлик хусусиятлари ва ғовақлик параметрларига таъсир даражасини ўрганиш бўйича тажрибалар натижалари келтирилган.

A.I. Adylkhodzhaev, I.M. Makhamataliev, V.M. Soy, I.A. Kadyrov. On the efficiency of filling cement concrete by local ceolite-containing breeds

This article presents the results of experiments to study the effect of the degree of filling of the modified zeolite-containing fine-grained rock (MMB) and heavy concrete on its strength characteristics and porosity parameters.

УДК 532.542:532.529

А.М. АРИФЖАНОВ, А.Р. БАБАЕВ, Д. АБДУРАИМОВА, Н.К. ЛАТИПОВ

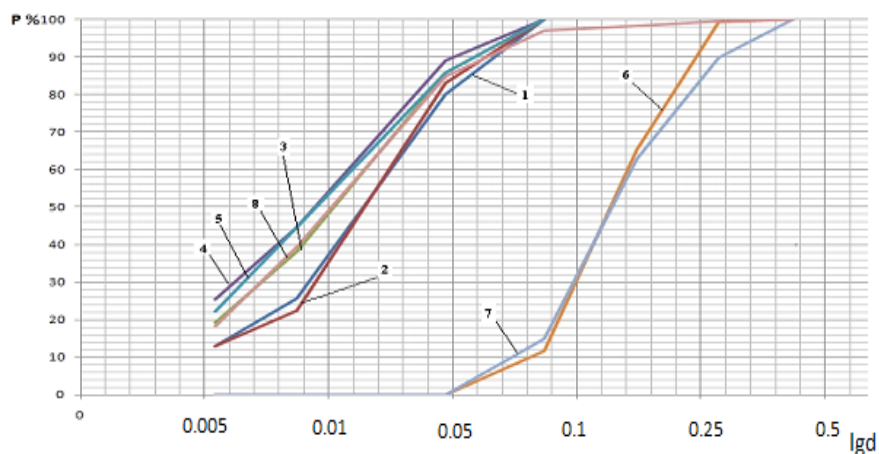
НАПОРЛИ ҚУВУРЛАРДА ДАРЁ ЧЎКИНДИЛАРИНИ ТАҚСИМОТИГА ДОИР ТАДҚИҚОТЛАР

Ўзбекистон Республикасида қишлоқ ва сув хўжалигида истеъмолчиларни суғориш суви билан таъминлаш тизимида 1600 га яқин насос станцияларидан фойдаланилади. Бу йўналишда олиб борилган тадқиқотлар шуни кўрсатмоқдаки, насос станциялари напорли қувурларида сув билан биргаликда жуда катта миқдорда дарё чўкиндилари ҳам узатилади [1 – 6].

Қатор насос станцияларида олиб борилган тадқиқотлардан тўпланган маълумотлар таҳлиладан маълумки, дарё чўкиндиларининг механик ва кимёвий таркиби ўзгарувчан бўлиб, фракцион таркиби 0.01 мм дан 0.25 мм гача ўзгариши мумкин. Қуйидаги (1-расм)да Сирдарё – Сўх ирригацион тизимлар хавза бошқармасига қарашли Сариқўрғон насос станцияси аванкамерасида олинган намуналар таҳлили келтирилган. Насос станцияларининг напорли қувурларида сув билан бирга дарё чўкиндиларини узатилиши, яъни гидротранспорти оқимнинг кинематик ва динамик параметрларига таъсирини баҳолашда дарё чўкиндилари заррчаларининг оқим кўндаланг кесими бўйлаб тақсимоти алоҳида аҳамиятга эга [2 – 4].

Напорли қувурларда дарё чўкиндиларининг гидротранспорт қилишда оқимнинг лойқа (сув + дарё чўкиндилари) узатиш қобилиятини аниқлаш муҳимдир. Гидротранспортнинг асосий вазифаларидан бири бўлиб, бунда икки фазали оқим моҳиятини ифодалашда гравитация кучлари таъсирида напорли қувурлар кесими бўйича ҳосил бўладиган лойқалар концентрациясининг тақсимланишини ҳисобга олиниши муҳим аҳамият касб этади [1 – 6].

Гидротранспорт тизимларини ҳисобини амалга оширишда лойқали оқимлар таркибидаги қаттиқ заррачаларнинг ҳажмий концентрациялари, ҳамда йириклиги билан зичлигининг ўта хилма-хиллигини инобатга олиш лозим бўлади.



1-расм. Сарикўрғон насос станцияси аванкамерасида олинган намуналар таҳлили: 1 – насос станцияси аванкамера 1 – кирғоқ сўрувчи қувири лойқа донаторлик таркиби; 2 – насос станцияси аванкамера 2 – кирғоқ сўрувчи қувири лойқа донаторлик таркиби; 3 – насос станцияси 3 – кирғоқ қувири сўрувчи лойқа донаторлик таркиби; 4 – насос станцияси аванкамера 3 – кирғоқ қувири сўрувчи лойқа донаторлик таркиби; 5 – насос станцияси сувнинг сойга тушиш жойи лойқа донаторлик таркиби; 6 – дарё хавзаси четки қисми лойқа донаторлик таркиби; 7 – дарё хавзаси ўрта қисми лойқа донаторлик таркиби; 8 – насос станцияси қувурдан чиқиш жойи лойқа донаторлик таркиби

Кўриб чиқиладиган оқимлар ўзининг структураси бўйича қувурлардаги бир жинсли суюқликларнинг турбулент оқимларига нисбатан мураккаброқ. Шунинг учун бундай оқимларни ҳисоблаш усуллари ҳам бир жинсли суюқликларнинг босимли оқимлари гидравликасини оддий усулларида анча мураккаб бўлади [6].

Напорли тизимларда муаллақ заррачалар оқимини ҳисоблаш ишлари, биринчи навбатда, оқим кинематикаси билан узвий боғлиқ бўлиб, солиштирма гидравлик қаршиликлар ва гидротранспортда оқимнинг критик тезлиги каби асосий параметрларни аниқлашдан иборат. Шунинг учун, қувурнинг қўндаланг кесимида лойқаларни ўртача концентрацияси ҳамда тезлигини тақсимланиш қонунларини билмасдан туриб, бу параметрларни аниқлашнинг иложи йўқ [2 – 4].

Қувурларда гидроаралашмаларни ҳаракатланиш параметрларини ҳисоблашнинг илмий жиҳатдан асосланган усуллари ишлаб чиқиш учун, муаллақ заррачаларни ташувчи оқимнинг тенгламаларидан ва экспериментал маълумотлардан фойдаланилади.

Олиб борилган тадқиқотларда лойқаликнинг ўртачалаштирилган концентрациялари ҳамда тезликлар майдонларини, солиштирма гидравлик қаршиликлари ва лойқали оқимлар ҳаракатининг критик тезликларини аниқлаш учун гидротранспорт параметрларининг кенг ўзгариш диапазонларида амалда қўллашга яроқли бўлган умумлаштирилган ҳисобий боғланишлар топилган [5 – 7].

Гидроаралашмаларни қувурлар бўйлаб ҳаракатланишида оғирлик кучининг аҳамияти катта. Ортиқча массасининг таъсирида олиб келинадиган қаттиқ жисмлар умумий ҳолларда оқимнинг тагида бир хилда тақсимланмайди ва уларнинг асосий массаси қувур тагида қўчиб юради. Бундай ҳаракат тезлик майдонини ўқ бўйича асимметриясини келтириб чиқаради, бу эса оқимнинг кинематик ўқини унинг юқори концентрацияли пастки қатламларидаги энг катта ўртача тезлигининг ҳолатига тўғри келувчи қувурнинг геометрик ўқига нисбатан юқорига силжишида ифодаланади.

Солиштирма гидравлик қаршиликларга келсак, улар ҳамма вақт босимли муаллақ заррачаларни ташувчи оқимда бир жинсли суюқликнинг тегишли оқимидаги солиштирма гидравлик қаршиликлардан катта бўлади. Қаттиқ жисмлар концентрациясининг нотекис тақсимланиш даражаси ва демак, тезлик майдонининг ўқ бўйича асимметрия даражаси ҳамда солиштирма гидравлик қаршиликларни нисбатан ортиш миқдори гидроаралашманинг ўртача ҳажмий концентрацияси, қаттиқ жисмларнинг ўртача катта-

лиги ва зичлиги, ташувчи суyoқликнинг зичлиги ва динамик ёпишқoқлиги, қувурнинг ўтказиш диаметри ва oқимнинг ўртача тезлигига кўра турлича бўлиши мумкин [1 – 3].

Аралашмаларни горизонтал қувурларда ҳаракатининг ўзига ҳослиги ҳаракатнинг критик режими деб номланган ва қаттиқ жисмлар қувурнинг пастки деворларига чўка бошлайдиган омилнинг мавжудлигидадир. Ушбу режимга мос келадиган oқим $v_{кр}$ кўп сонли параметрларга, шу жумладан, гидроаралашманинг ўртача ҳажмий концентрациясига, қувур диаметрига, қаттиқ материалнинг гранулометриқ таркибига ҳамда физик-механик тавсифларига боғлиқ.

Заррачаларни муаллақ ҳолатда ташувчи oқимнинг кинематик ва динамик параметрларини, уларни белгиловчи катталикларга функционал боғлиқлигини аниқлашда, ҳозирги вақтга асосий эътибор биринчи ўринда турли қаттиқ материалларни гидроташилишини тажриба орқали ўрганишга қаратилган.

В.М. Маккавеев [1] биринчи бўлиб заррачаларнинг мавжудлиги oқим кинематикасини ўзгартирмаслигини таҳмин қилиб, сув oқимида муаллақ заррачалар ҳаракати учун турбулент диффузия тенгламасини ишлаб чиқди ва қуйидаги дифференциал боғланишга эга бўлди:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(A \frac{\partial s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \frac{\partial s}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(A \frac{\partial s}{\partial z} \right) - w \frac{\partial s}{\partial y} \right], \quad (1)$$

бунда s – сувдаги муаллақ заррачалар концентрацияси; A – турбулент диффузия коэффиценти $\varepsilon = A/\rho$ га муносиб турбулент алмашинув коэффиценти; ρ – oқим зичлиги; w – зарраларнинг гидравлик йириклиги.

Стационар oқим учун, қўйидаги бошланғич шартлар асосида: $y=0$, $s=s_0$, oқим чуқурлиги бўйича лoйқалик концентрациясининг тақсимотини қўйидагича ифодаланган:

$$s(y) = s_0 \exp \left\{ -w \int_0^y \frac{dy}{\varepsilon} \right\}. \quad (2)$$

Келтирилган тенгламадан (2) амалда фойдаланиш учун, турбулент диффузия коэффиценти ε аниқланиши талаб этилади.

Турбулент диффузия назариясини ривожланиши бўйича амалга оширилган кейинги ишлар асосан турбулент диффузия коэффиценти аниқлашга қаратилган эди [1 – 4].

Барқарор ва текис турбулент oқим ҳаракати учун Буссинеск (1876) назариясидан келиб чиққан ҳолда В.М.Маккавеев ε учун қуйидаги ифодани таклиф этади:

$$\varepsilon = \frac{ig(h-y)}{\frac{du}{dy}}. \quad (3)$$

Охирги (3) ифодадан кўринадики, ε ни аниқлаш oқим тезлигининг чуқурлик бўйича тақсимотини ифодаловчи қонуниятларга боғлиқ экан. Демак, турли du/dy бўлганда, турли ε қийматини ҳосил этамиз ва натижада чўқиндилар тақсимоти учун, (2) га асосан турли ифодага эга бўламиз.

Чўқиндилар ҳаракатининг диффузион назариясини ривожлантиришга бағишланган излашлар асосан турбулент диффузия коэффиценти миқдорини аниқлашга йўналтирилди.

Шундай қилиб, ўтказилган таҳлиллар асосида таъкидлаш мумкинки, юқорида қайд этилган ишларда фазалар тезликларини, напорли қувурлар орқали гидротранспортлаш жараёнида лoйқаларни чуқурлик бўйича концентрациясининг ҳамда катта-кичиклиги бўйича тақсимланишини ҳисоблаш формулаларидан самарали фойдаланиш имкониятлари чекланганлигини кўрсатмоқда.

Концентрациянинг тақсимланиш қонунига [2 – 5] ва б. ишларда умуман бошқача ёндашилади. К.Ш.Латипов ва А.Арифжановлар [3], oқимнинг гидродинамик кучлари ва газ молекулаларини иссиқлик ҳаракатини вужудга келтирган гравитация майдони кучлари таъсири остида муаллақ қатламда заррачаларнинг бетартиб ҳаракатини келишувчанлигига асосланиб, экспериментал маълумотларни ишлаб чиқиш натижасида концентрацияни тақсимланиши бўйича газларнинг молекуляр-кинетик назариясининг барометрик формуласига ўхшаш қуйидаги ҳисобий формулани таклиф этишди:

$$n = n_0 e^{-A_1 h}, \quad (4)$$

бунда n – маълум; h баландликда зарралар сони; n_0 – нолинчи сатҳда зарралар сони; A_1 – ҳаракатланувчи заррачаларнинг кинетик энергиясига мутаносиб коэффицент.

Архимед ҳамда ўзаро таъсир кучлари таъсири остида дискрет заррачалар концентрациясини оғирлик кучи майдонида оқим чуқурлиги бўйича тақсимланишини кўриб чиқамиз.

Оғирлик кучи майдонида i -фракциянинг ҳажмий концентрацияси қуйидаги кўринишга эга бўлади:

$$s_i = s_{i0} \exp \left[\left[-\frac{3(\rho_r - \rho)g}{\rho_r u_i^2} - \frac{3}{2} \rho C_0 \frac{S_r W_r^2}{m_r u_i^2} \right] (h - y) \right], \quad (5)$$

бунда s_{i0} – зарранинг i -фракциясини $y=0$ даги концентрацияси; ρ_r, ρ – зарра ва суюқликнинг ҳажмий зичликлари; u_i – i -фракциянинг бўйлама тезлиги; S_r – зарра кесимининг майдони; C_0 – қаршилик коэффиценти; W_r – зарранинг нисбий тезлиги.

Айлана кесимли цилиндр кувурлар учун цилиндр координата тизимида ўтиб, қуйидагига эга бўламиз:

$$s_i = s_{i0} \exp \left[\left[-\frac{3(\rho_r - \rho)g}{\rho_r u_i^2} - \frac{3}{2} \rho C_0 \frac{S_r W_r^2}{m_r u_i^2} \right] (R + r \sin \varphi) \right] \quad (6)$$

Диаметри d_0 ва массаси m_{r0} тенг маълум бир фракциядан бошлаб, оғирлик кучи таъсири оқимнинг қаршилик кучига нисбатан анча камайиб кетади. Бунинг натижасида шундай параметрлар доирасида фракция ўлчами концентрациянинг тақсимланишига деярли таъсир қилмайди. Шу сабабли фракциялар ўлчами таъсирини аниқлаш учун энг мақбул (оптимал) диаметр тушунчаси киритилади. Ташувчи суюқлик ва қаттиқ зарралар оқимининг кинетик энергиясини тенглигига асосланган ҳолда, ҳамда заррачаларни сфера шаклда деб фарз қилиб, i -фракцияли лойқалик заррачаси ва суюқлик тезлиги орасида қуйидаги боғланиш олинган [7]:

$$u_i^2 = u^2 \left(\frac{d_0}{d_i} \right)^3 \quad (7)$$

(7) ҳисобга олган ҳолда, ҳажмий концентрация учун қуйидаги формулага эга бўламиз:

$$s_i = s_{i0} \exp \left[\left[-\frac{3(\rho_r - \rho)g}{\rho_r u_i^2} - \frac{3}{2} \rho C_0 \frac{S_r W_r^2}{m_r u_i^2} \right] \left(\frac{d_i}{d_0} \right)^3 (R + r \sin \varphi) \right]. \quad (8)$$

Шундай қилиб, концентрацияни тақсимланишини аниқлаш учун тавсия этилган ифода мавжуд услублардан қуйидагилар билан фарқланади:

Биринчидан молекуляр-кинетик назариядан фойдаланиб келтириб чиқарилган, иккинчидан лойқали оқимни тавсифловчи асосий кўрсаткичлар (d, C_0, ρ_r, ρ ва ҳ.к.) инobatта олинган.

Юқорида келтирилган табиий дала шароитидаги тадқиқотлар таҳлилидан маълумки (1-расм), гидротранспорт жараёнида, яъни сув билан биргаликда лойқа заррачалари ҳаракатланганда заррачаларнинг диаметрини инobatта олиш лозим бўлар экан. Келтирилган тенглама асосида қувур радиуси бўйлаб лойқалик концентрациясини қараб чиқамиз.

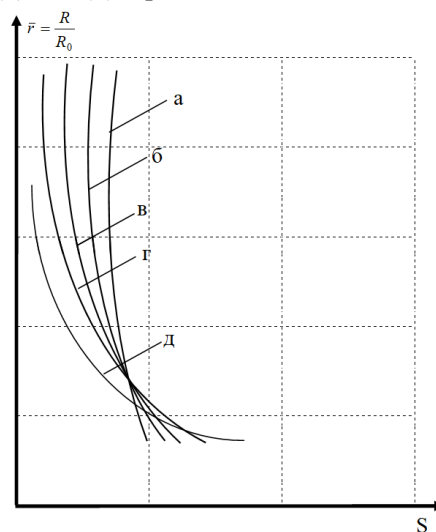
Тезлиги оқимнинг ўртача тезлигига тенг d_0 диаметри заррачани “энг мақбул заррача-оптимал диаметр”, деб атаيمиз. Энг мақбул заррача диаметрини аниқлашда қуйидаги ифодадан фойдаланамиз:

$$d_0 = \sqrt[3]{\frac{18\mu u \frac{d}{dz} \left(\frac{p}{\gamma} \right)}{g(\rho_r - \rho)}}. \quad (9)$$

Лойқали оқимнинг концентрацияси тақсимотини лойқа заррачалар диаметрига боғлиқ равишда, юқорида келтирилган ифодалар асосида (8) ва (9) орқали аниқлаймиз. Ҳисоблашлар натижаси 2-расмда келтирилган.

Олинган натижалар таҳлилидан маълумки, агар $d_i < d_0$, бўлса, лойқалик тақсимотининг чизиғи текис шаклга яқинлашиб боради. Яъни бу юқорида қабул қилинган ёндашувнинг тўғрилигини асослайди.

Лойқа заррачаларининг диаметри ошиб бориши билан лойқалик концентрацияси тақсимотининг эгрилиги ошиб боради. Ҳисоблашлар натижасида яна шу ҳолат кузатилдики, d_i/d_0 нинг ҳар хил нисбатларида лойқалик концентрациясининг тақсимоти нисбатан бир нуқта атрофида кесишмоқда. Бу ҳолат лойқалик концентрациясининг ўртача миқдорига мос келади. Ҳар бир фракция концентрацияси тақсимотини аниқлаб, умумий лойқалик миқдорининг концентрацияси қуйидагича аниқланади:



2-расм. Лойқалик концентрациясининг лойқа заррасининг диаметрига боғлиқ равишда оқим чуқурлиги бўйича тақсимоти: а – $d_i/d_0=1$; б – $d_i/d_0=1.5$; в – $d_i/d_0=1.75$; г – $d_i/d_0=2$; д – $d_i/d_0=2.5$

$$S = \sum_{i=1}^n S_i.$$

Олиб борилган тадқиқотлар натижасидан шуни хулоса қилиш мумкинки, суғориш насос станцияларининг напорли қувурларда сув билан биргаликда лойқа заррачалари ҳам ҳаракатланиб, уларни гидротранспорт параметрларини, ҳисоблашда инобатга олиш лозим. Қувур қўндаланг кесими бўйича лойқалик тақсимотини ифодалаш учун тавсия этилган услубдан фойдаланиб, лойқа заррачаларининг таркибий қисмини инобатга олган ҳолда лойқа концентрациясининг тақсимотини ҳисоблаш мумкин.

АДАБИЁТЛАР

- [1] Маккавеев В.М. О теориях течения турбулентных потоков, содержащих взвешенные наносы // Изв. АН. ОТН. 1952. № 2. С. 262 – 279.
- [2] Арифжанов А.М. Транспортирующая способность потока в открытых руслах // Узбекский журнал «Проблемы механики». 1996. № 4. С. 31 – 34.
- [3] Арифжанов А.М., Илхамов Х.Ш., Латипов Н.К. Исследование распределения взвешенных частиц в потоке жидкости // Узбекский журнал «Проблемы механики». 1996. № 1 – 2. С. 45 – 49.
- [4] Белолипецкий В.М., Генова С.Н. Вычислительный алгоритм для определения динамики взвешенных донных наносов в речном русле // Вычислительные технологии. 2004. Т. 9. № 2. С. 9 – 25.
- [5] Латипов К.Ш., Арифжанов А.М. Вопросы движения взвешенного потока в открытых руслах. Ташкент: Мехнат, 1994. – 110 с.
- [6] Криль С.И. Напорные взвесенесущие потоки. Киев: Наукова думка, 1990. – 138 с.
- [7] Арифжанов А.М., Фатхуллоев А.М., Самиев Л.Н. Ўзандаги жараёнлар ва дарё чўкиндилари. Тошкент: Ноширлик ёғдуси, 2017. – 193 б.

Тошкент темир йўл муҳандислари институти

22.05.2019 й.
қабул қилинган

А.М. Арифжанов, А.Р. Бабаев, Д. Абдураимова, Н.К. Латипов. Исследование распространения речных отложений по напорным трубопроводам

В статье рассмотрен вопрос способности переноса потоком наносов при гидротранспортировании речных отложений по напорным трубопроводам.

A.M. Arifjanov, A.R. Babayev, D. Abduraimova, N.K. Latipov. Investigation of the distribution of river sediments along pressure pipelines

The article considers the question of capacity to transport the flow of sediments in hydrotransportation river sediments by pressure pipeline.

ДИСПЕРСИОННОЕ УРАВНЕНИЕ ВЯЗКОУПРУГИХ КОМПОЗИТОВ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ

В работе исследуется динамическая задача линейной теории вязкоупругости для композиционных материалов периодической структуры. Поставленная задача решается приближенно-аналитическим методом, предложенным Б.Е. Победрей. Рассмотрено распространение гармонических волн в такой среде. Получено дисперсионное уравнение рассматриваемой задачи. Анализ полученных результатов показывает, что данное дисперсионное уравнение описывает явления, которые установлены ранее другими методами [1].

Рассмотрим вязкоупругое композиционное тело объемом V , ограниченное поверхностью Σ , составленное из периодически повторяющихся одинаковых элементов, называемых ячейками периодичности. Тензор функции релаксации $R_{ijkl}(\vec{x}, t)$ и плотность $\rho(\vec{x})$ обладают следующими свойствами:

$$R_{ijkl}(\vec{x} + a_i m_i, t) = R_{ijkl}(\vec{x}, t), \quad \rho(\vec{x} + a_i m_i) = \rho(\vec{x}),$$

где m_i – произвольные целые числа; a_i – постоянные векторы, определяющие период структуры.

Пусть ε – малый геометрический параметр, равный отношению характерного размера ячейки периодичности к характерному размеру рассматриваемого тела. Вводим локальные координаты ξ_i , определяемые как дробная часть выражения $x_i/\varepsilon + m_i$, при этом векторы a_i направляем по осям координат x_i . Тогда тензор функции релаксации и плотность рассматриваемого тела становятся функциями локальных координат.

Предположим, что свойства материала таковы: отсутствует старение, т.е. определяющие соотношения материалов являются инвариантными относительно сдвига по времени. Поэтому ядра релаксации являются ядрами разностного типа [2]. В этом случае связь между напряжениями и деформациями может быть записана в виде интеграла Стилтеса

$$\sigma_{ij} = \int_0^t R_{ijkl}(t - \tau) d\varepsilon_{kl}(\tau) = \hat{R}_{ijkl} \varepsilon_{kl}.$$

Смещенная динамическая задача линейной теории вязкоупругости в перемещениях для рассматриваемого композиционного тела заключается в решении трех дифференциальных уравнений [3]:

$$\hat{R}_{ijklj} u_{k,l} + \hat{R}_{ijkl} u_{k,lj} + X_i = \rho(\vec{x}) \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (1)$$

относительно трех компонентов вектора перемещений $\vec{u}$ при удовлетворении граничным условиям:

$$u_i|_{\Sigma_1} = u_i^0, \quad \hat{R}_{ijkl} u_{k,l} n_j|_{\Sigma_2} = S_i^0 \quad (2)$$

и начальным данным:

$$u_i|_{t=0} = U_i(\vec{x}), \quad \frac{\partial u_i}{\partial t}|_{t=0} = W_i(\vec{x}), \quad (3)$$

где запятая означает производную по координатам x_i , а чертой перед индексом обозначена производная по координатам ξ_i ; X_i – компоненты вектора объемных сил; $\vec{u}^0$ – вектор перемещений, заданный на части Σ_1 поверхности Σ ; $\vec{S}_0$ – вектор усилий, заданный на остальной части Σ_2 поверхности Σ ; $\vec{n}$ – единичный вектор нормали к поверхности Σ .

Решение поставленной динамической задачи линейной теории вязкоупругости ищем в виде асимптотического разложения по малому параметру ε :

$$u_i(\vec{x}, t) = v_i(\vec{x}, t) + \sum_{s=1}^{\infty} \varepsilon^s \sum_q (-1)^q \hat{N}_{ijk_1 \dots k_{s-2q}}^{(s)(q)}(\vec{\xi}, t) v_{j, k_1 \dots k_{s-2q}}(\vec{x}, t), \quad (4)$$

где $\hat{N}_{ijk_1 \dots k_{s-2q}}^{(s)(q)}(\vec{\xi}, t)$ — так называемые локальные ядра релаксации, периодические по быстрым переменным $\vec{\xi}$. Суммирование по q происходит от $q=0$ так, чтобы выполнялось условие $s - 2q \geq 0$ (все величины, имеющие отрицательные индексы, равны нулю). $\hat{N}_{ij}^{(0)(0)}$ представляет собой единичный тензор второго ранга [4].

Подставляя выражение (4) в уравнения движения (1), граничные условия (2), начальные данные (3) и комбинируя величины при одинаковых степенях ε , получим для «среднего» поля перемещений $v_i(\vec{x}, t)$ рекуррентную последовательность динамических задач линейной теории вязкоупругости однородного тела с эффективными ядрами релаксации:

$$\hat{H}_{ijkl} v_{k,l}^{\{p\}} + X_i^{\{p\}} = \rho_0 \frac{\partial^2 v_i^{\{p\}}}{\partial t^2}, \quad (5)$$

$$v_i^{\{p\}}|_{\Sigma_1} = u_i^{\{p\}}, \quad \hat{H}_{ijkl} v_{k,l}^{\{p\}} n_j|_{\Sigma_2} = S_i^{\{p\}}, \quad (6)$$

$$v_i^{\{p\}}|_{t=0} = U_i^{\{p\}}, \quad \frac{\partial v_i^{\{p\}}}{\partial t}|_{t=0} = W_i^{\{p\}}, \quad (7)$$

где $p=0, 1, 2, 3, \dots$; $\hat{H}_{ijkl}$ — тензор эффективных ядер релаксации; ρ_0 — осредненная плотность.

Локальные ядра релаксации $\hat{N}_{ijk_1 \dots k_{s-2q}}^{(s)(q)}$ определяются из следующих рекуррентных последовательности дифференциальных уравнений:

$$\left(\hat{R}_{ijml} \hat{N}_{mnk_1 \dots k_{s+2-2q}}^{(s+2)(q)} \right)_j + \left(\hat{R}_{ijmk_{s+2-2q}} \hat{N}_{mnk_1 \dots k_{s+1-2q}}^{(s+1)(q)} \right)_j + \hat{R}_{ik_{s+2-2q}ml} \hat{N}_{mnk_1 \dots k_{s+1-2q}}^{(s+1)(q)} + \\ + \hat{R}_{ik_{s+2-2q}mk_{s+1-2q}} \hat{N}_{mnk_1 \dots k_{s-2q}}^{(s)(q)} - \rho \hat{N}_{ink_1 \dots k_{s+2-2q}}^{(s)(q-1)} = H_{ink_1 \dots k_{s+2-2q}}^{(s)(q)}, \quad (8)$$

где $s = -1, 0, 1, 2, 3, \dots$; $q = 0, 1, 2, 3, \dots$.

Величины $H_{ink_1 \dots k_{s+2-2q}}^{(s)(q)}$ находятся из следующих условий:

$$H_{ink_1 \dots k_{s+2-2q}}^{(s)(q)} = \left\langle \hat{R}_{ik_{s+2-2q}ml} \hat{N}_{mnk_1 \dots k_{s+1-2q}}^{(s+1)(q)} + \hat{R}_{ik_{s+2-2q}mk_{s+1-2q}} \hat{N}_{mnk_1 \dots k_{s-2q}}^{(s)(q)} - \rho \hat{N}_{ink_1 \dots k_{s+2-2q}}^{(s)(q-1)} \right\rangle,$$

где оператор осреднения для ячейки периодичности с объемом V_{ξ} имеет вид [5]:

$$\langle f(\vec{x}, \vec{\xi}) \rangle = \frac{1}{V_{\xi}} \int_{V_{\xi}} f(\vec{x}, \vec{\xi}) dV_{\xi}.$$

Пусть исследуется распространение гармонических волн в такой среде. Тогда для «среднего» поля перемещений выбираем выражения в виде

$$v_i(\vec{x}, t) = C_i e^{i(\vec{k}\vec{x} + \omega t)}, \quad (9)$$

где C_i — постоянные величины; $\vec{k}$ — волновой вектор, характеризующий направления распространения волны; ω — частота колебаний.

Поставляя (9) в (5) – (7), получим однородную систему алгебраических уравнений относительно постоянных C_i , условие существования нетривиального решения которых дает дисперсии-

онное уравнение рассматриваемой задачи:

$$\det \left\{ \sum_{s=1}^{\infty} \varepsilon^{2(s-1)} \sum_q (-1)^q H_{ijk_1 k_2 \dots k_{2(s-q)}} k_{k_1} k_{k_2} \dots k_{k_{2(s-q)}} \right\} = 0. \quad (10)$$

Известно, что локальные функции ядра релаксации являются непрерывными и периодически продолжаемыми. Это означает, что при переходе через границу ячейки периодичности в направлении внешней нормали скачки локальных функций ядра релаксации обращаются в нуль. Помимо этого, для обеспечения единственного решения уравнения (8) требуется выполнение следующих условий:

$$\left\langle \hat{N}_{ijk_1 k_2 \dots k_{s-2q}}^{(s)(q)}(\vec{\xi}, \omega) \right\rangle = F_{ijk_1 k_2 \dots k_{s-2q}}^{(s)(q)}(\omega).$$

Из способа определения величины $F_{ijk_1 k_2 \dots k_{s-2q}}^{(s)(q)}$ [6] следует, что дисперсионное уравнение (10) не содержит члены, не соответствующие физическим смыслам рассматриваемой задачи.

Теперь рассмотрим слоистый вязкоупругий композит, образованный периодически повторением элементарных ячеек в направлении оси x_3 . Элементарные ячейки состоят из двух анизотропных однородных вязкоупругих слоев с различными ядрами релаксации. Тогда из (10) в нулевом приближении получим

$$\det \{ \hat{H}_{ijkl} k_k k_l - \rho_0 \omega^2 \delta_{ij} \} = 0, \quad (11)$$

где $\hat{H}_{ijkl} \equiv \hat{H}_{ijkl}^{(0)(0)} = \left\langle \hat{R}_{ijkl} + \hat{R}_{ijmn} \hat{N}_{mkl}^{(1)(0)} \right\rangle$, δ_{ij} – единичный тензор второго ранга.

В одномерном случае дисперсионное уравнение (11) полностью описывает результаты, полученные в работе [7]. Таким образом, даже в нулевом приближении в вязкоупругом композите периодической структуры возникает вязкая дисперсия, а гармонические волны затухают.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Победря Б. Е. Механика композиционных материалов. М.: Изд-во МГУ, 1984. – 336 с.
- [2] Ильюшин А. А., Победря Б. Е. Основы математической теории термовязкоупругости. М.: Наука, 1970. – 280 с.
- [3] Победря Б. Е., Георгиевский Д. В. Основы механики сплошной среды. М.: Физматлит, 2006. – 306 с.
- [4] Победря Б. Е. Лекции по тензорному анализу. М.: Изд-во МГУ, 1989. – 263 с.
- [5] Каримов А. М. Некоторые методы решения динамических задач вязкоупругих композитов квазипериодической структуры // Узбекский журнал «Проблемы механики». 2018. № 1. С. 21 – 24.
- [6] Delph T. J., Herrman G. An effective dispersion theory for layered composites // J. Appl. Mech. 1983. № 50. P. 157 – 164.
- [7] Каримов А. М. Дисперсионное уравнение упругого волокнистого композита периодической структуры. Прочность конструкций, сейсмодинамика зданий и сооружений // Материалы Международной научно-технической конференции. 12 – 14 сентября 2016. Ташкент, 2016. С. 276 – 278.

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

Дата поступления
22.05.2019

А.М. Каримов. Даврий тузлилиши ёпишқоқ эластик аралаш муҳитнинг дисперсия тенгламаси
Мақолада даврий тузлилиши ёпишқоқ эластик муҳитда тўлқин тарқалиши масаласининг дисперсия тенгламаси ўрналаштирилиш усули ёрдамида топилган.

A.M. Karimov. Dispersion equation of viscoelastic composites with periodic structure
In this paper dispersion equation of viscoelastic composite materials with periodic structure is given.

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ АНКЕРОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ ПРИ УСТАНОВКЕ В ЗЕМЛЯНОМ ПОЛОТНЕ ИЗ ПЕСЧАНЫХ ГРУНТОВ

Несущая способность анкеров контактной сети железных дорог при установке их на земляном полотне из песчаных грунтов определена, согласно методике, изложенной в ВСН [1]. При этом расчеты свайных фундаментов типа С-1 (6.5 м) и С-2 (9.3 м) выполнены по типовому проекту «Альбом рекомендуемых решений по установке опор контактной сети в особых условиях». Исходные данные для расчета были приняты по данным объекта «Электрификация железнодорожной линии Бухара – Ургенч – Хива» при сооружении опор и анкеров контактной сети на земляном полотне из песчаных грунтов.

Закрепление анкеров в грунте считается обеспеченным, если величина расчетного усилия T^d (рис.1) удовлетворяет условию

$$T^d \leq T_f, \quad (1)$$

где T_f – значение расчетной несущей способности анкера по грунту.

Значение T_f несущей способности анкера по грунту принимают равным меньшей из величин:

$$T_f = \frac{N_{fa}}{\sin \alpha}, \quad (2)$$

$$T_f = \frac{M_{fa}}{H_a \cos \alpha}, \quad (3)$$

где N_{fa} – расчетная несущая способность анкера по грунту на действие выдергивающего усилия; M_{fa} – расчетная несущая способность анкера по грунту на действие момента, определяемая по формулам расчета одиночных призматических фундаментов, при этом подставляют значение N^d ; α – угол наклона усилия T^d к горизонтالي; N_a – плечо силы T^d относительно расчетной поверхности грунта (см. рис. 1).

Значение M_f расчетной несущей способности анкера по грунту на действие момента вычисляют по формуле [1, 2]

$$M_f = M^{01} \gamma_{cf} \gamma_{co} \gamma_{cv} \gamma_{cc} \gamma_{cr} \gamma_{cl}, \quad (4)$$

где M^{01} – значение расчетной несущей способности условного фундамента по грунту на действие горизонтальной нагрузки или изгибающего момента, приведенное к уровню условного обреза фундамента; γ_{cf} – коэффициент условий работы, учитывающий влияние формы поперечного сечения призматического фундамента; γ_{co} – коэффициент условий работы, учитывающий влияние очертания поверхности грунта в месте расположения фундамента; γ_{cv} – коэффициент условий работы, учитывающий влияние вибрации (колебаний) грунта около фундамента от проходящих поездов; γ_{cc} – коэффициент условий работы, учитывающий влияние повышенного уплотнения грунта, имеющего место при забивке фундамента; γ_{cr} – коэффициент условий работы, учитывающий влияние верхнего строения пути; γ_{cl} – коэффициент условий работы, учитывающий долю постоянной нагрузки в суммарной.

Значение N_{fa} расчетной несущей способности анкера по грунту на действие выдергивающего усилия определяют по формуле

$$N_{fa} = k_g \gamma_{cv} p_a d_a \tau_g + 0.9 G_a, \quad (5)$$

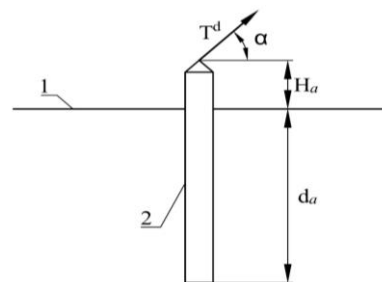


Рис. 1. Схема вертикального анкера:
1 – расчетная поверхность грунта; 2 – анкер

где k_g – коэффициент однородности, принимаемый равным 0.5; γ_{cv} – коэффициент условий работы; p_a – периметр поперечного сечения анкера; при анкере таврового, двутаврового или трехлучевого сечений периметр определяют по контурам, показанным на рис. 2 полужирными линиями; τ_g – предельное значение удельного сопротивления трения грунта по боковой поверхности анкера, принимаемое при закапываемом анкере 10 кН/м², а при свайном анкере в зависимости от глубины свай в грунте по графику, приведенному в ВСН [1]; G_a – вес анкера.

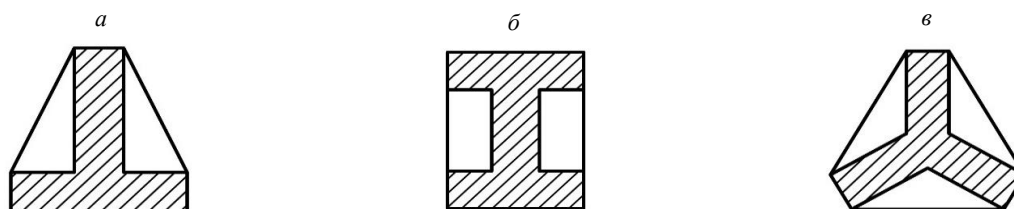


Рис. 2. Расчетный периметр фундаментов: а – таврового; б – двутаврового; в – трехлучевого сечения

При расчете несущей способности анкеров контактной сети железных дорог на земляном полотне из песчаных грунтов по методике, изложенной в ВСН [1] для объекта «Электрификация железнодорожной линии Бухара – Ургенч – Хива», были использованы следующие исходные данные:

1. Конструкция и размеры анкеров, принятые в соответствии с данными табл. 1.

Таблица 1

Конструкция и размеры анкеров

Тип анкера	Размеры, м			Вес анкера, кг
	L	b_f	a_f	
Трехлучевой	4	0.67	0.59	1460
Трехлучевой	4.5	0.67	0.59	1590
Трехлучевой	5	0.67	0.59	1720
Свайные	6.5	0.35	0.35	2030
Свайные	8	0.35	0.35	2500

2. Усилия натяжения от несущего троса типа ПБСМ-95 15 кН.
3. Усилия натяжения от контактного провода типа БРФ-120 20 кН.
4. Плечо силы T_d относительно расчетной поверхности грунта, $H_a=0.5$ м.
5. Угол наклона усилия T_d к горизонтали, $\alpha=45^\circ$.
6. Коэффициент, характеризующий долю расчетной постоянной нагрузки в суммарной, $\xi=1$.
7. Характеристики грунтов в соответствии с проектными данными объекта «Электрификация железнодорожной линии Бухара – Ургенч – Хива».

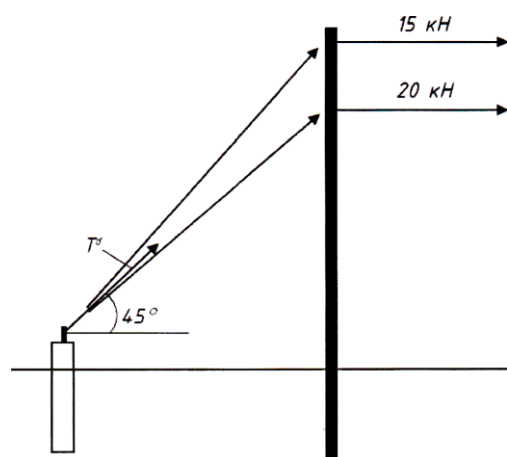


Рис. 3. Схема для расчета усилия T_d от натяжения проводов

Расчет усилия T_d от натяжения проводов. Расчетное усилие от натяжения проводов определено по схеме, приведенной на рис. 3:

$$T^d = (15 + 20) / \cos 45^\circ = 49.497 \text{ кН.}$$

С учетом коэффициента надежности по ШНК [3] $\gamma_k=1.4$:

$$T^d = 49.497 \cdot 1.4 = 69.296 \text{ кН.}$$

Результаты расчета несущей способности анкера на земляном полотне из песчаных грунтов на действие выдергивающего усилия и момента сведены в табл. 2.

Результаты расчета несущей способности анкера

Конструкции анкера	Несущая способность анкера по грунту на действие выдергивающего усилия		Несущая способность анкера по грунту на действие момента	
	N_{fa} , кН	T_f , кН	M_{fa} , кН*м	T_f , кН
Трехлучевые фундаменты ТС-60-4.0	47.914	67.761	9.379	26.528
Трехлучевые фундаменты ТС-60-4.5	53.927	76.264	12.394	35.054
Трехлучевые фундаменты ТС-60-5.0	59.939	84.766	15.833	44.781
Свайные фундаменты типа С-6.5 (35×35)	75.567	106.869	27.334	77.311
Свайные фундаменты типа С-8.0 (35×35)	98.681	139.555	43.235	122.285

Выводы по результатам выполненных расчетов:

Анализ и сравнение результатов выполненных расчетов по несущей способности анкера на земляном полотне из песчаных грунтов на действие выдергивающего усилия и на действие момента показали следующее:

- во всех конструкциях анкеров меньшая величина значения T_f несущей способности анкера по грунту получается на действие момента;
- все разновидности трехлучевых анкеров (в том числе с длиной 5 м) не обеспечивают несущую способность;
- условие $T_d \leq T_f$ удовлетворяется, когда применяются свайные анкера с длиной 6.5 м и более, при этом несущая способность анкера по грунту при длине 6.5 м составляет 77.311 кН, т.е. 69.296 кН < 77.311 кН.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ВСН 447-Н. Ведомственные технические указания по проектированию контактной сети высокоскоростных железных дорог. Ташкент: ГАЖК «УТИ», 2010.
- [2] Фрайфельд А.В., Брод Г.Н. Проектирование контактной сети. М.: Транспорт, 1991.
- [3] ШНК 2.02.03-13 Свайные фундаменты. Госкомархитектстрой РУз. Ташкент, 2013.

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

Дата поступления
22.05.2019

К.С. Лесов, А.Х. Мавланов. Темир йўллар контакт тармоғи анкерларини қўли грунтли ер полотносида ўрнатишдаги қўтариш қобилияти

Ушбу мақолада темир йўллар контакт тармоғи анкерларини қўли грунтли ер полотносида ўрнатишдаги қўтариш қобилияти «Бухоро – Ургенч – Хива темир йўл линиясини электрлаштириш» объектининг лойиҳа маълумотлари асосида аниқланган.

K.S. Lesov, A.X. Mavlanov. Bearing capacity of anchors of the contact network of railways when installing them on roadbed from sandy grounds

In this article, the load bearing capacity of anchors of the contact network of railways when installing their roadbed of sandy grounds is determined in accordance with the design data of the object "Electrification of the Bukhara – Urgench – Khiva railway line".

УДК 534.835

Р.Х. ПИРМАТОВ, А.В. ЗАХАРОВ, В.С. ЧИКМАТУЗЯНЦ

ГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ ОДНОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ

Одним из условий комфорта жилища является обеспечение благоприятного акустического режима в помещениях, который в значительной степени достигается путем правильного выбора ограждающих конструкций на стадии проектирования [1 – 4].

В настоящее время наиболее выгодным и конструктивно целесообразным в многоэтажных зданиях является применение однослойных ограждающих и несущих конструкций из плотных материалов. Имеющийся в [2, 4] графический способ построения частотной характеристики изоля-

ции воздушного звука разработан для ограждений из существующих материалов на основе статистической обработки большого числа экспериментальных данных.

На основе многолетних исследований в Московском государственном строительном университете (НИУ МГСУ) разработан метод расчета изоляции воздушного звука однослойными ограждающими конструкциями в нормируемом диапазоне частот [1, 3]. По методике расчета разработан графический способ определения изоляции воздушного звука, применяющийся для построения октавных спектров изоляции однослойными ограждениями, выполненными из бетона, железобетона, кирпича, керамических блоков и тому подобных плотных материалов с поверхностной плотностью от 50 до 1000 кг/м². Этот способ предназначен для оценки звукоизолирующей способности при проектировании новых ограждающих конструкций, а также для сравнения с результатами натурных испытаний и нормативной частотной характеристикой. Сопряжения ограждения с примыкающими конструкциями должны быть плотными без упругих вставок и шарниров. Расчетный диапазон находится выше третьей собственной частоты изгибных колебаний рассматриваемого ограждения.



Рис. 1. Частотная характеристика изоляции воздушного звука однослойным ограждением

ся (рис. 2, а). Ордината R_C определяется в зависимости от поверхностной плотности m (кг/м²) и граничной частоты волнового совпадения f_c , ограждающей конструкции (рис. 2, б). Скорость продольных волн (м/с) определяется по известной формуле

$$C_{np} = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu^2)}}, \quad (1)$$

где E , ρ – соответственно модуль упругости (Н/м²) и плотность материала (кг/м³) ограждения; ν – коэффициент Пуассона.

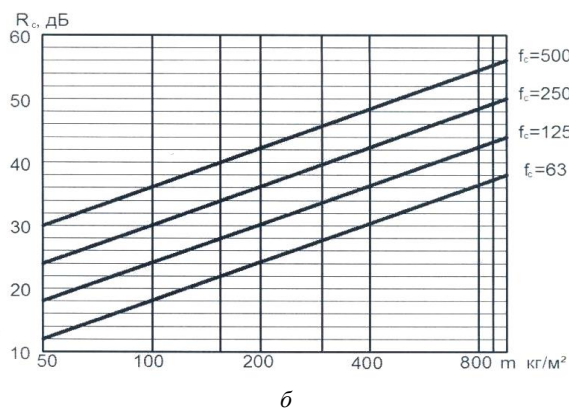
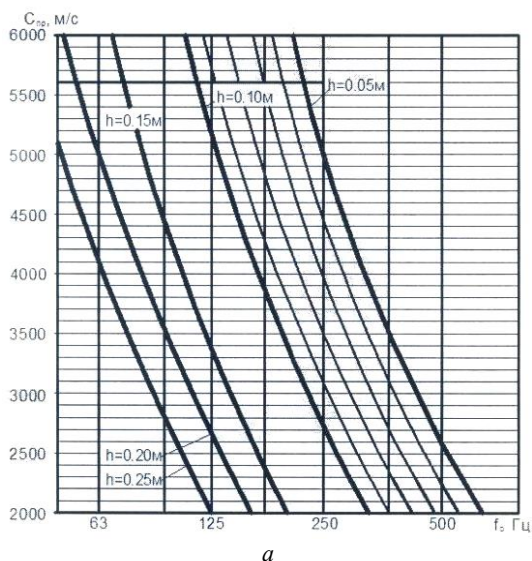


Рис. 2. График для определения координат точки C: а – координаты f_c ; б – координаты R_C

В качестве примера на рис. 3 приведены частотные характеристики изоляции воздушного звука перегородки из силикатных блоков размерами 498×250×498 мм, плотностью 1800 кг/м³, измеренные в лаборатории Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (НИИСФ РААСН), предназначенные для межквартирных перегородок и наружных стен, а также стены из блоков ячеистого бетона размером 600×300×200 мм, марки Д600 толщиной с учетом штукатурного слоя из цементно-песчаного раствора 340 мм.

Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 27296-2012 «Здания и сооружения. Методы измерения звукоизоляции ограждающих конструкций».

Построим частотную характеристику изоляции воздушного звука предложенным способом. По графикам рис. 4 находим координаты точки C . В зависимости от скорости продольных волн, рассчитанных по формуле (1), $C_{np}=3550$ м/с и толщины ограждений $h=25$ см (f_C равно 63 Гц), R_C в зависимости от поверхностной плотности $m=\rho h=450$ кг/м² и граничной частоты волнового совпадения f_C равно 32 дБ. Далее из точки C влево проведем отрезок BC на одну октаву с наклоном 4 дБ, а вправо – отрезок CD с наклоном 6 дБ/октава до точки D с ординатой $R_d=60$ дБ и горизонтальный участок DE . Полученная частотная характеристика показана на этом же рис. 4. Как видно, расчетная частотная характеристика хорошо совпадает с натурными измерениями.

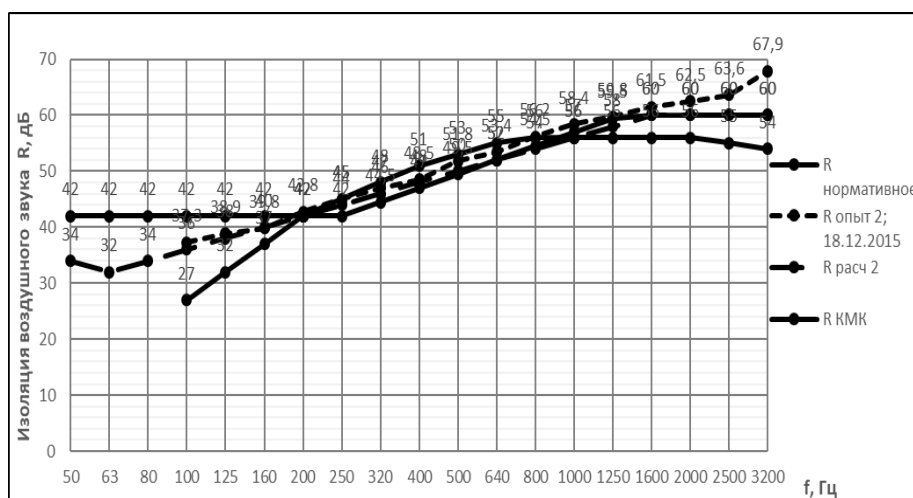


Рис. 3. Частотные характеристики изоляции воздушного звука перегородки из силикатных блоков размерами 498×250×498 мм, плотностью 1800 кг/м³

Поэтому для оценки звукоизолирующей способности однослойных ограждающих конструкций на стадии проектирования можно пользоваться предложенным графическим способом.

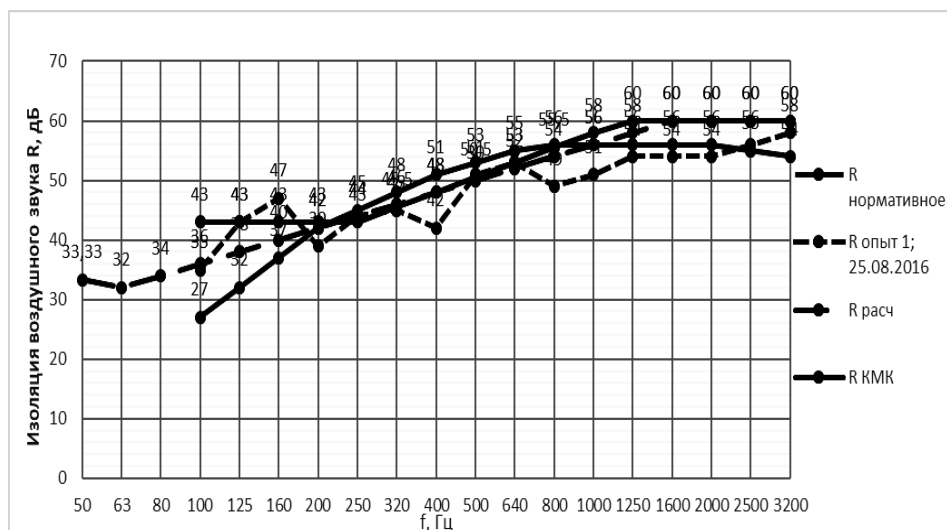


Рис. 4. Частотные характеристики изоляции воздушного звука перегородки из ячеистого бетона размерами 600×300×200мм, плотностью 1800 кг/м³

Многочисленные расчеты и сравнения с натуральными измерениями показали достоверность этого способа.

Сравнение расчетных теоретических частотных характеристик с нормативными позволяет проектировщику выбрать ограждение зданий с заранее назначенными характеристиками звукоизоляции. Это дает значительную экономию для оценки звукоизолирующей способности ограждающих конструкций без проведения затрат на лабораторные испытания.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Захаров А.В. Дискретные модели прохождения волн при расчетах звукоизоляции в зданиях // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 11. С. 50 – 54.
- [2] СП 23-103-2003. Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий. Госстрой России. М., 2004. – 34 с.
- [3] Пирматов Р.Х., Захаров А.В. О зависимости прохождения звука от угла падения на границу сред или массивный слой // Узбекский журнал «Проблемы механики». 2018. №1. С. 50 – 55.
- [4] КМК 2.01.08-96. Защита от шума. Ташкент, 1996.

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

Дата поступления
22.05.2019

Р.Х. Пирматов, А.В. Захаров, В.С. Чикматузянц. Бир қаватли тўсиқ конструкцияларни товуш изоляциясини график усулида ҳисоблаш

Бир қаватли массив тўсиқ конструкцияларни товуш изоляциялаш қобилиятини ҳисоблаш усули асосида тўсиқ конструкцияларни товуш ҳимоялаш қобилиятини частотали характеристикасини тузишини график усули ишлаб чиқилган.

R.X. Pirmatov, A.V. Zakharov, V.S. Chikmatuzyants. Graphical method of calculating the sound insulation of singlelayer enclosing structures

Based on the proposed calculation method for the sound insulation of single layer massive enclosing structures, it has been developed the graphical method for constructing the frequency response of sound insulation of enclosing structures.

**РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕЙ СИСТЕМЫ
«ГРУНТ – СООРУЖЕНИЕ» НА ДЕЙСТВИЕ ВНЕШНИХ СИЛ С УЧЕТОМ
НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЙСТВИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ И ГЛУБИНЫ ЗАЛОЖЕНИЯ**

В работах [1 – 6] рассмотрены различные способы расчета объемного напряженно-деформированного состояния взаимодействующей системы «грунт – сооружение» на воздействие бегущей сейсмической волны, распространяющейся произвольно относительно оси сооружения.

В статье рассматривается методика численного расчета напряженного состояния взаимодействующей системы «грунт – сооружение», описанной следующим образом:

$$L_i[U^i] = \tilde{\Phi}_i(r, \phi, t), \quad (1)$$

где $L_i = (\lambda + 2\mu)^i \left\{ \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \right\} + \mu^i \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + (\lambda + \mu)^i \frac{\partial^2}{\partial r^2}$; $\tilde{\Phi}_i(r, \phi, t)$ – закон распространения сейсмической волны ($i=I, II$), распространяющейся в направлении, перпендикулярном к образующей цилиндрического трубопровода.

Итак, имеем область грунта

$$\Omega_2^I = [0 \leq r \leq H; \quad 0 \leq \phi \leq 2\pi]$$

и трубопровода

$$\Omega_2^I = [r_1 \leq r \leq r_2; \quad 0 \leq \phi \leq 2\pi].$$

Сформулируем математическую постановку расчета плоскодеформированного состояния системы «трубопровод – грунт».

В областях $\Omega_2^i \times \Omega^T$ ($i=I, II$) следует найти вектор-функцию $\vec{v}^i$ с компонентами u^i, v^i , принимающими при $0 < t < t_H$ заданные значения

$$\vec{v}^I = \{\tilde{\Phi}_1, \tilde{\Phi}_2\}, \quad \vec{v}^{II} = 0, \quad (2)$$

удовлетворяющие уравнениям движения

$$L_2 \vec{v}^I = \rho^I \frac{\partial^2 \vec{v}^I}{\partial t^2}, \quad L_2 \vec{v}^{II} = \rho^{II} \frac{\partial^2 \vec{v}^{II}}{\partial t^2}. \quad (3)$$

С начальными условиями

$$\begin{aligned} \vec{v}^I \Big|_{t=0} = \frac{\partial \vec{v}^I}{\partial t} \Big|_{t=0} &= 0 \quad \text{при } z > 0, \\ \vec{v}^I(\Phi_1, \Phi_2)_{z=0}; \frac{\partial \vec{v}^I}{\partial t} &= \left(\frac{\partial \Phi_1}{\partial t}, \frac{\partial \Phi_2}{\partial t} \right)_{z=0}, \\ \vec{v}^{II} \Big|_{t=0} = \frac{\partial \vec{v}^{II}}{\partial t} \Big|_{t=0} &= 0, \end{aligned} \quad (4)$$

краевыми условиями при $r=r_1$

$$\begin{aligned} \sigma_r^{II} &= P(\varphi, t) + \alpha t \cdot (3\lambda^{II} + 2\mu^{II}) \Gamma, \quad \text{при } r = H, \\ \sigma_r \varphi &= 0, \\ \vec{v}^I &= (\Phi_1, \Phi_2), \\ \vec{v}^I &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

и контактными условиями при $r=r_2$

$$\begin{aligned}\bar{v}^I \bar{v}^II; \sigma_{tr}^II; \sigma_{r\varphi}^II &= \sigma_{r\varphi}^II, \\ U^I &= U^II; \sigma_r^I = \sigma_r^II, \\ \sigma_{r\varphi}^I &= K_{r\varphi} (v^I - v^II), \\ \sigma_{r\varphi}^II &= -K_{r\varphi} (v^I - v^II).\end{aligned}\quad (6)$$

Задача (1) – (6) решается численно с применением метода конечных разностей (МКР). Для решения задачи (1) – (6) воспользуемся сеткой Ω_t , которая представляет временную область, а также сетками $\{\Omega^I, \Omega^{II}\}$, которые представляют области грунта и сооружения соответственно.

В качестве материала тоннеля взята железобетонная конструкция с физико-механическими характеристиками: $\rho^{II}=0.25 \text{ т} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$, $\lambda^4=4.2 \cdot 10^5 \text{ т}/\text{м}^2$, $\mu^{II}=9.05 \cdot 10^5 \text{ т}/\text{м}^2$, $\alpha=0$, $R_1=1.8 \text{ м}$, $R_2=2.8 \text{ м}$.

В качестве материала грунта взяты: лёсс с физико-механическими характеристиками: $\rho^I=0.18 \text{ т} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$, $\lambda^I=3610 \text{ т}/\text{м}^2$, $\mu^I=5416 \text{ т}/\text{м}^2$, $\alpha_v=40 \text{ с}^{-1}$, $\alpha_x=40 \text{ с}^{-1}$.

Тяжелый плотный суглинок: $\rho^I=1.97 \text{ т} \cdot \text{с}^2/\text{м}^4$, $\lambda^I=8220 \text{ т}/\text{м}^2$, $\mu^I=12290 \text{ т}/\text{м}^2$, $\alpha_v=40 \text{ с}^{-1}$, $\alpha_x=40 \text{ с}^{-1}$.

Действующая сила представлена в виде $U_0 = -A \sin \omega t$.

При $t \geq x/C_p$ $W_0 = B \sin \omega t$ с частотой колебания $\omega = 40\pi$.

Расчет произведен для следующих значений сеточных шагов, удовлетворяющих условию устойчивости, в частности

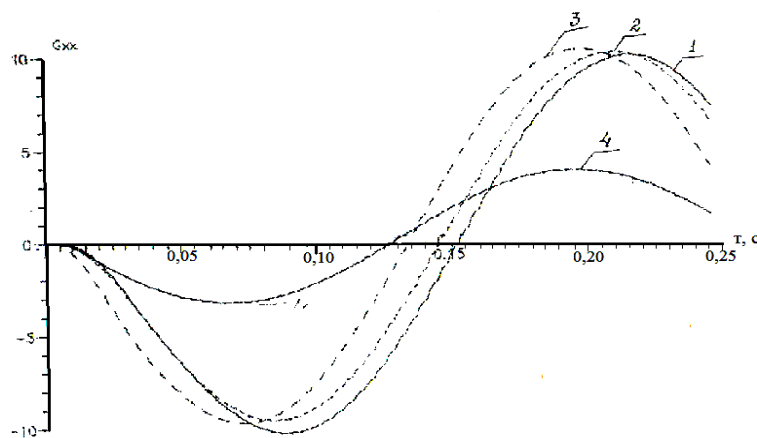
$$\tau = \frac{L h_{11} h_{22}}{2.1(L h_2 - H h_{11})}, \quad h_{11} = \frac{R_2 - R_1}{(N_1 - 1)H}, \quad h_{12} = \frac{H - R_2}{(N_2 - N_1)H}, \quad h_2 = \frac{1}{N_n},$$

где L – длина участка; H – расстояние от поверхности сооружения до поверхности почвы; N_1 – количество узлов в области сооружения по координате; N_2 – общее количество узлов по координате в областях сооружения и грунта; R_1 – внутренний радиус сооружения; R_2 – внешний радиус сооружения.

По мере реализации составленной программы расчета напряженно-деформированного состояния взаимодействующих системы «сооружение – грунт» получены численные результаты, которые приведены в виде графиков (рисунок).

В статье исследовалось влияние таких факторов, как глубина заложения тоннеля, физико-механические свойства грунта и направления воздействия сейсмических сил на напряженно-деформированное состояние тоннеля. Результаты численного расчета приведены на рисунке.

Направление сейсмической волны относительно сооружения оказывает существенное влияние на значения радиальных смещений тоннеля. В том случае, когда сейсмическая волна направлена перпендикулярно оси сооружения, значения радиальных смещений выше, чем в случае, когда сейсмическая волна направлена вдоль оси сооружения.



Изменение продольных напряжений точки ($j=2$) контактной линии трубопровода с грунтом: 1 – $H=6 \text{ м}$; $\lambda^I=3610 \text{ т}/\text{м}^2$; $\mu^I=5416 \text{ т}/\text{м}^2$; $\varphi=0^\circ$; 2 – $H=10 \text{ м}$; $\lambda^I=3610 \text{ т}/\text{м}^2$; $\mu^I=5416 \text{ т}/\text{м}^2$; $\varphi=0^\circ$; 3 – $H=6 \text{ м}$; $\lambda^I=8222 \text{ т}/\text{м}^2$; $\mu^I=5416 \text{ т}/\text{м}^2$; $\varphi=0^\circ$; 4 – $H=6 \text{ м}$; $\lambda^I=3610 \text{ т}/\text{м}^2$; $\mu^I=5416 \text{ т}/\text{м}^2$; $\varphi=90^\circ$

Глубина заложения и изменение физико-механических свойств грунта имеют незначительное влияние на значение осевых напряжений тоннеля. Кривые 1, 2, 3 (см. рисунок) показывают, что с увеличением жесткости грунта приблизительно в два раза период колебаний тоннеля уменьшается на 0.01 с , а тоннеля увеличивается на 0.04 с . Кривая 4 (см. рисунок) показывает, что изменение направления волны на 90° приводит к уменьшению значений продольных напряжений в 4 раза.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1. С увеличением глубины заложения и жесткости грунта значения предельных смещений тоннеля увеличиваются.

2. Направление сейсмической волны относительно сооружения оказывает существенное влияние на значения радиальных смещений тоннеля.

3. Глубина заложения и изменение физико-механических свойств грунта имеют незначительное влияние на значение осевых напряжений тоннеля.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Рашидов Т. Динамическая теория сейсмостойкости сложных систем подземных сооружений. Ташкент, 1973. – 285 с.
- [2] Рашидов Т.Р., Хожметов Г.Х., Мардонов Б. Колебания сооружений, взаимодействующих с грунтом. Ташкент: Фан, 1975. – 174 с.
- [3] Маткаримов А.Х. Взаимодействие отделки гидротехнического тоннеля с окружающей средой при землетрясении // Материалы V Всесоюзной конференции по динамике оснований, фундаментов и подземных сооружений. Ташкент: Фан, 1981. С. 115 – 117.
- [4] Рашидов Т.Р., Хожметов Г.Х., Омеляненко В.А., Каюмов А. Автоматизированный метод расчета задач сейсмодинамики подземных сооружений // Изв. АН УзССР. Серия техн. наук. 1983. № 3. С. 110 – 115.
- [5] Маткаримов А., Рахманов У. Колебания вязкоупругого составного гидротехнического тоннеля с вязкоупругим взаимодействием // Материалы V Всесоюзной конференции по динамике оснований, фундаментов и подземных сооружений. Ташкент, 1981. С. 89 – 92.
- [6] Рахманов У. Алгоритм численного расчета осесимметричного напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов при сейсмических воздействиях // Проблемы механики. 1999. № 2 – 3. С. 29 – 32.

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

Дата поступления
22.05.2019

У. Рахманов. Ўзаро таъсир этувчи “грунт-иншоот” тизимини жойлаштириш чуқурлиги ва сейсмик тўлқиннинг йўналишини ҳисобга олиб таъсир кучлар таъсиридаги кучланганлик ҳолатини ҳисоблаш

Мақолада ўзаро таъсир этувчи “грунт-иншоот” тизимининг кучланганлик ҳолатини турли йўналишдаги сейсмик кучлар таъсирида иншоотнинг жойлаштириш чуқурлигини ҳисобга олган ҳолда ҳисоблаш услубияти қўриб чиқилган. Ҳисоблаш натижалари график қўринишида келтирилган.

U. Rahmanov. The calculation of the stress state of the interacting ground-structure system on the action of external forces, taking into account the direction of the seismic wave action and the depth

The article discusses the method of numerical calculation of the stress state of the interacting soil-structure system on the action of external forces, taking into account the direction of the seismic wave action and the depth of deposition. The obtained calculation results are presented in the form of graphs.

УДК 656.212. 6.073.21

Я.О. РУЗМЕТОВ

О ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ ГРУЗА И ПОДКЛАДОК ПРИ МАНЕВРОВЫХ СОУДАРЕНИЯХ ВАГОНОВ

В настоящее время по действующему техническому условию размещения и крепления грузов [1] не выполняется расчет деформированного состояния груза и подкладок, видимо, считая их как абсолютно жесткими. Вместе с тем, выполняется упрощенный расчет на смятие подкладок без учета вертикальных составляющих усилий предварительных натяжений гибких элементов крепления. Особо оговорим, что деформированное состояние подкладок непосредственно влияет на долговечность настила из деревянных досок.

До сих пор расчеты по определению деформированного состояния груза и подкладок являются мало исследованной, не изученной и упущенной из виду исследователями прикладной задачей.

В связи с этим выполнение расчета по определению деформированного состояния груза и подкладок является актуальной прикладной задачей, полностью соответствующей перечню акту-

альных проблем научно-технического развития железнодорожного транспорта и имеющей важное прикладное значение для транспортной науки. Такой подход к определению деформированного состояния груза и подкладок, несомненно, вносит существенный вклад в развитие основ теории размещения и крепления грузов на открытом подвижном составе.

Цель статьи – разработка метода (последовательности) расчета по определению деформированного состояния груза и подкладок.

Методы решения. Прикладная задача по расчету деформированного состояния груза и подкладок на вагоне решена с применением одного из современных программных продуктов.

Схема размещения и крепления груза на платформе приведена в работе [2].

Параметры груза из железобетона: модуль упругости – $E=32.5 \cdot 10^6$ кН/м²; коэффициент Пуассона и плотность – $\nu=0.2$ и $\gamma=2.5$ т/м³. Параметры подкладок из дерева (дуб): модуль упругости – $E=1.1 \cdot 10^7$ кН/м²; коэффициент Пуассона и плотность – $\nu=0.1$ и $\gamma=0.69$ т/м³.

Расчет по определению деформированного состояния груза и подкладок при маневровых соударениях вагонов выполнен в той же последовательности, что и в [2, 3]. Отличием является то, что в данной работе дополнительно на экран дисплея выведены деформированные виды и эпюры нормальных напряжений груза и подкладок.

Результаты решения и их анализ. Построение геометрии системы «груз – крепление – вагон», деление поверхностей на сетки конечных элементов и другие вышеописанные действия выполнены в файле t02b13.gfm (геометрия).

Для примера приводим отдельные случаи расчета приведенной выше последовательности.

Построение геометрии системы «груз – крепление – вагон», деление поверхностей на сетки конечных элементов, закрепление растяжек и подкладок, задание усилий начальных натяжений гибких элементов крепления и подготовка к расчету деформированного состояния груза и подкладок при маневровых соударениях вагонов выполнены аналогично в работе [2].

Задание нагрузок при маневровых соударениях вагонов. На практике при маневровых соударениях вагонов возникают ускорения, значения которых превышают $1g$ и доходят до $2g$ [3 – 7]. В данном случае значение ускорения принимали в пределах от $1.2g$ до $2g$.

Вывод на экран дисплея деформированного вида груза. Деформированный вид груза по продольной и вертикальной оси при ускорении маневрового соударения вагонов, равном $1.2g$, соответственно показан на рис. 1, а, б.

Анализ деформированного вида системы «груз – крепление – подкладка» показывает, что между подкладками происходит прогиб груза из-за того, что подкладки размещены по его длине неравномерно.

Кроме того, убеждаемся, что от действия продольных сил инерции, в основном, деформируются те места поверхности груза, которые расположены вблизи точек закрепления гибких элементов крепления с монтажными петлями. Это указывает на то, что монтажные петли по длине груза также размещены неравномерно. Значения перемещений по продольной и вертикальной осям достигают 0.02 мм. Кроме того, выявлено, что деформируются не только поверхности груза со стороны монтажных петель, но и нижние поверхности, расположенные между подкладками.

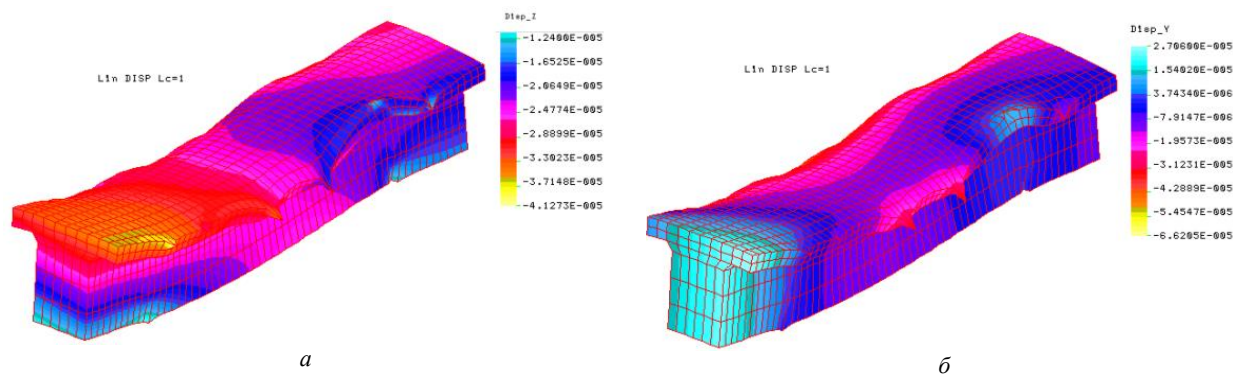


Рис. 1. Деформированный вид груза по продольной (а) и вертикальной (б) осям

Вывод на экран дисплея эпюр нормальных напряжений, возникающих на поверхности груза. Эпюры нормальных напряжений на поверхности груза по Мизесу (что равносильно четвертой теории прочности [8]) показаны на рис. 2.

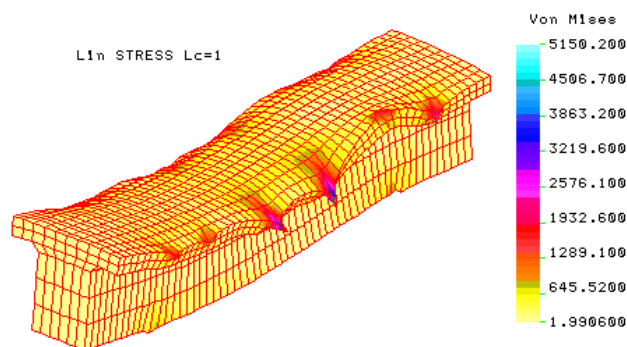


Рис. 2. Эпюры нормальных напряжений в гибких элементах крепления по Мизесу

Анализ эпюр нормальных напряжений на поверхности груза по Мизесу показывает, что максимальные значения этих напряжений возникают вблизи монтажных петель, расположенных в середине длин груза. При принятых исходных данных значения нормальных напряжений по Мизесу незначительны – всего 5150 кПа.

Вывод на экран дисплея деформированного вида подкладки по вертикальной оси. Деформированный вид подкладки по вертикальной оси при значениях ускорения 1.5g показан на рис. 3, а (общий вид) и б (вид сбоку).

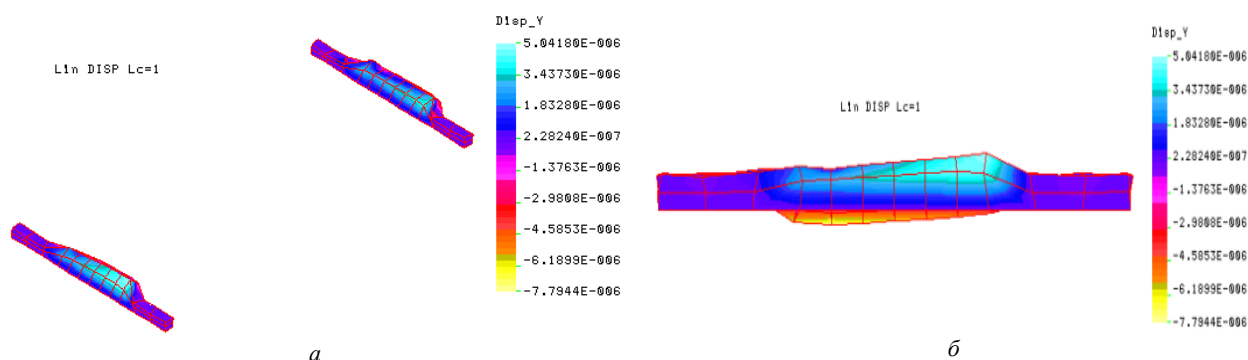


Рис. 3. Деформированный вид подкладки по вертикальной оси: а – общий вид; б – вид сбоку

Анализ результатов расчетов по определению деформированного вида подкладки показывает, что происходит смятие его поверхности, которые расположены не только под грузами, но и у краев подкладки, непосредственно контактирующих с грузами. Такое деформирование подкладки, в свою очередь, приводит и к смятию настила из деревянных досок. При этом происходит сильное смятие поверхностей подкладок, непосредственно соприкасающихся с настилом из деревянных досок.

Вывод на экран дисплея эпюр нормальных напряжений, возникающих на поверхностях подкладок. Эпюры нормальных напряжений на поверхностях подкладок по вертикали при значениях ускорения 1.5g показаны на рис. 4, а (общий вид) и 4, б (вид сбоку). Распределение напряжений смятия в подкладке вдоль волокон показано на рис. 5, а, а поперек волокон – на рис. 5, б.

Анализ распределения напряжений смятия в подкладке по вертикальной оси показал, что наибольшее напряжение на нем доходит до 3125 кПа (см. рис. 4, б), что находится в пределах допустимого ($[\sigma_{см}] = 2500 - 3500$ кПа [8]). При этом происходит сильное смятие поверхностей подкладок, непосредственно соприкасающихся с настилом из деревянных досок.

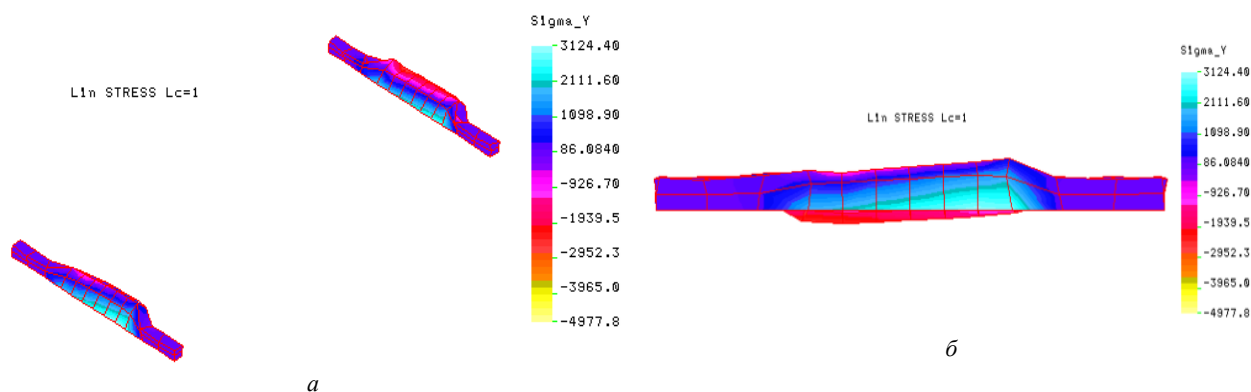


Рис.4. Напряжения смятия на поверхностях подкладок: *а* – общий вид; *б* – вид сбоку

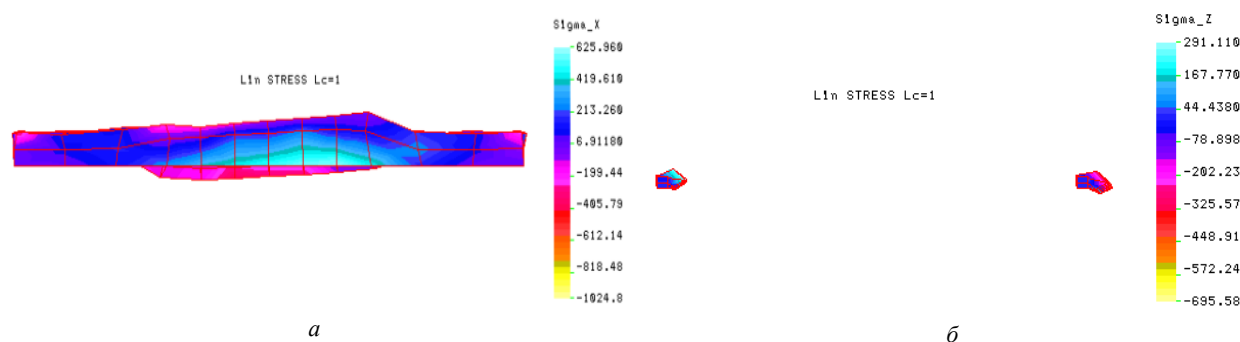


Рис. 5. Распределение напряжений смятия в подкладке вдоль (*а*) и поперек (*б*) волокон

Анализ распределения напряжений смятия в подкладке вдоль волокон (см. рис. 5, *а*), показал, что наибольшее напряжение на нем достигает 626 кПа, а анализ распределения напряжений смятия в подкладке поперек волокон выявил, что в материале подкладки возникают напряжения смятия, значения которых находятся в пределах 325 кПа, что почти в 8 – 11 раз меньше допустимого ($[\sigma_{см}] = 2500 - 3500$ кПа [8]). Причиной возникновения таких напряжений в подкладке является увеличение усилий в гибких элементах крепления и их вертикальных составляющих от действия продольных сил инерции. Вместе с тем, как показывают результаты вычислительных экспериментов (см. рис. 5, *б*), происходит смятие поверхностей подкладок в сторону действия продольных сил инерции.

Таким образом, в результате выполненных вычислительных экспериментов получены ранее неизвестные в теории размещения и крепления грузов данные, позволяющие рационально расположить подкладки по длине груза. Кроме того, еще на этапе проектирования груза можно точно определить место расположения в нем монтажных петель в соответствии с размерами увязочных устройств вагона с тем, чтобы не происходила деформация поверхностей груза. По данным этих вычислительных экспериментов также заранее можно оценить несущую способность подкладок и при необходимости внести коррективы в принятые их геометрические размеры.

Выводы и перспективы развития прикладной задачи. Результаты вычислительных экспериментов по определению деформированного состояния груза выявлены ранее неизвестные в теории размещения и крепления грузов явления о деформировании не только поверхности груза со стороны монтажных петель, но и нижних его поверхностей, расположенных между подкладками. Кроме того, данные этих экспериментов дают возможность рационально расположить подкладки по длине груза, оценить их несущую способность и при необходимости внести коррективы в принятые их геометрические размеры. Данный подход в перспективе может быть применен для определения деформированного и нагруженного состояния груза и подкладок при движении поезда по кривым участкам пути от действия поперечных сил инерции и ветровых нагрузок как по боковым, так и по лобовым сторонам груза.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Технические условия размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах. М.: Юртранс, 2003. – 544 с.
- [2] Приложение 14 к СМГС «Правила размещения и крепления грузов в вагонах и контейнерах». М.: Планета, 2008. – 191 с.
- [3] Туранов Х.Т., Псеровская Е.Д., Туранова Г.А. Метод расчета крепления грузов // Железнодорожный транспорт. 2001. № 1. С. 56 – 57.
- [4] Вершинский С.В., Данилов В.Н., Хусидов В.Д. Динамика вагона. М.: Транспорт, 1991. – 360 с.
- [5] Зылев В.Б. Вычислительные методы в нелинейной механике конструкций. М.: НИЦ «Инженер», 1999. – 145 с.
- [6] Туранов Х.Т. Теоретическая механика в задачах грузовых перевозок. Новосибирск: Наука, 2009. – 376 с.
- [7] Туранов Х.Т. Теоретическая механика в специальных задачах грузовых перевозок. Учебное пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта. Новосибирск: Наука; Екатеринбург: Изд-во УрГУПС. 2012. – 447 с.
- [8] Беляев Н.М. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1976. – 608 с.

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

Дата поступления
22.05.2019

Я.О. Рузметов. Вагонларнинг тўқнашув вақтида юк ва қопламанинг деформацияланган ҳолати тўғрисида
Мақолада юк ва қопламаларнинг деформацияланган ҳолатини аниқлаш учун ҳисоблаш усули (кетма-кетлиги) ишлаб чиқилди. Вагондаги юк ва қопламаларнинг деформацияланган ҳолатини ҳисоблашнинг амалий вазифаси замонавий дастурий таъминот маҳсулотларидан бири ёрдамида ҳал этилган.

Ya.O. Ruzmetov. On the deformed condition of the cargo and linings during wagon collisions
The article developed a method (sequence) of calculation to determine the deformed state of the cargo and linings. The applied task of calculating the deformed state of the cargo and linings on the car is solved using one of the modern software products.

УДК 629.42.07

Ш.С. ФАЙЗИБАЕВ, М.Ш. ВАЛИЕВ, Н.А. САМБОРСКАЯ

УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТРЕЩИН НА ПОВЕРХНОСТИ ГРЕБНЕЙ БАНДАЖЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР

Ранее полученные данные показывают возможность превышения пределов прочности материала бандажей колесных пар при росте температур T_m свыше 300°C . Через поверхность гребней бандажей подводится около 40 % тепловой мощности N_T . Это объясняется тем, что периметр поверхности гребня бандажа в радиальном сечении, проходящем через ось вращения колесной пары $n_l = \pi r_l + 30 = \pi \cdot 15 + 30 = 77$ мм, сопоставим с шириной поверхности катания $n_k = 140 - 30 = 110$ мм, к которым подводится тепловая мощность N_T при торможении колесных пар подвижного состава. Введём допущение о разделении мощности N_T на две составляющие N_l и N_k , подводимые к поверхности гребня и катания бандажа по рельсам, и пропорциональные отношениям

$$N_l = N_T \frac{n_l}{n_l + n_k} = \frac{77 N_T}{77 + 110} \approx 0.41 N_T. \quad (1)$$

Поэтому $N_k = 0.59 N_T$.

Введём допущение в форме модели гребня бандажа в виде кольца толщиной $z_l = 25$ мм, шириной $v_l = 30$ мм и длиной $\ell_l = 2\pi R_l$ при $R_l = R_1 + z_l$.

Для примера принимаем $R_1 = 515$ мм, $R_l = 540$ мм. Определим вес материала кольца гребня бандажа:

$$G_l = 2\pi R_l v_l z_l \gamma_l \approx 2\pi \cdot 0.54 \cdot 0.03 \cdot 0.025 \cdot 7860 = 20 \text{ кг.}$$

Используем модель теплопередачи мощности N_l от тормозной коробки через поверхность $F_l = 2\pi R_l v_l$ гребня бандажа к такой же поверхности основного материала бандажа. Используем функцию прироста температуры $T_l(t, z)$, где $t = 0 - t_T$ – продолжительность цикла торможения колеса; z – расстояние от поверхности радиуса R_l до слоя внутри материала модели гребня бандажа; диапазон изменения $z = 0 \div z_l$. Для такой модели используем уравнение теплопроводности в виде

$$C_l F_l \gamma_l \frac{\partial T_l}{\partial t} - K_l F_l \frac{\partial^2 T_l}{\partial z^2} = \frac{N_l}{2\pi R_l}, \quad (2)$$

которое приводим к виду

$$\frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial t} - \frac{K_{\Gamma}}{C_{\Gamma}\gamma_{\Gamma}} \frac{\partial^2 T_{\Gamma}}{\partial z^2} = \frac{N_{\Gamma}}{G_{\Gamma}C_{\Gamma}}. \quad (3)$$

Для решения последнего уравнения используем функцию

$$T_{\Gamma}(t, z) = T_{\Gamma}(t)T_{\Gamma}(z) = T_{\Gamma}(t) \left(1 - \frac{z^2}{z_{\Gamma}^2}\right), \quad (4)$$

которая в слое $z=0$ соответствует приросту максимальной температуры $T_{\Gamma}(t)$ внутри модели, а в слое $z=z_{\Gamma}$ на поверхности радиуса $R_1 - T_{\Gamma}(z)=0$.

Используем $\frac{\partial^2 T_{\Gamma}(t, z)}{\partial z^2} = -\frac{2T_{\Gamma}(t)}{z_{\Gamma}^2}$ для уравнения (3) и получим

$$\frac{\partial T_{\Gamma}(t)}{\partial t} + \psi_{\Gamma} T_{\Gamma}(t) = \frac{N_{\Gamma}}{G_{\Gamma}C_{\Gamma}}, \quad (5)$$

где $\psi_{\Gamma} = \frac{2K_{\Gamma}}{C_{\Gamma}\gamma_{\Gamma}z_{\Gamma}^2}$.

Частное решение этого уравнения для начальных условий $T_{\Gamma}(0)=0$ при $t=0$, полученное методом операционного исчисления, имеет вид

$$T_{\Gamma}(t) = \frac{N_{\Gamma}}{G_{\Gamma}C_{\Gamma}\psi_{\Gamma}} (1 - e^{-\psi_{\Gamma}t}) = \frac{N_{\Gamma}\gamma_{\Gamma}z_{\Gamma}^2}{2G_{\Gamma}K_{\Gamma}} (1 - e^{-\psi_{\Gamma}t}). \quad (6)$$

Выполним пример расчета этой температуры для условий начальной скорости торможения $V=100$ км/ч при $K=8.5$ тс, когда $N_T=50.64$ ккал/с, $N_I=0.41$, $N_T=20.8$ ккал/с, $t_T=40$ с, $C_I=0.114$ ккал/кг⁰с и $K_I=40.7$ ккал/м³·ч⁰с при T_c до 200⁰С, $G_c=20$ кг, $\gamma_I=7860$ кг/м³, $z_1=0.025$ м. При этих данных получим

$$\psi_{\Gamma} = \frac{2 \cdot 40.7}{0.114 \cdot 7860 \cdot 0.025^2} = 145.4 \text{ 1/ч.}$$

$$\psi_{\Gamma} t_T = 145.4 \frac{40}{3600} = 1.616, \quad e^{-\psi_{\Gamma} t_T} = 0.199,$$

$$T_{\Gamma}(t_T) = \frac{20.8 \cdot 3600 \cdot 7860 \cdot 0.025^2}{2 \cdot 20 \cdot 40.7} (1 - 0.199) = 181^0 \text{ С.}$$

В интервале времени между очередными циклами торможений интенсивность снижения температуры только для материала модели гребня бандажа будет характеризоваться функцией $T_{\Gamma}e^{-\psi_{\Gamma}t_0}$ и через интервал времени $t_0=60$ с до следующего цикла торможения составит $T_{\Gamma}e^{-\psi_{\Gamma}t_0} = T_{\Gamma}e^{-2.42} \approx 0.09T_{\Gamma}$.

С учетом температуры окружающего воздуха в условиях АЖ “Ўзбекистон темир йуллари” и расчетов принимаем среднее значение $T_I=200^0$ С.

Для оценки температурных напряжений в материале гребней бандажей от $T_I(t, z)$ используем модель упругого стержня длиной $\ell_I=2\pi R_{\Gamma}$ и сечением $F_U=\pi z_{\Gamma}^2$, нагружаемого по длине $\ell=0 \div \ell_I$ с интенсивностью температурных деформаций

$$\frac{\alpha T_{\Gamma} F_U E}{\ell_{\Gamma}} \left(1 - \frac{z^2}{z_{\Gamma}^2}\right),$$

идентичной с функцией температуры нагревания слоев модели. Для такой модели используем функцию упругого стержня слоев модели $U(z, \ell)$ при условии стационарных функций температуры, не зависящих от времени процесса. Для такой модели используем приближенное уравнение

$$\frac{\partial^2 U(z, \ell)}{\partial \ell^2} = \frac{\alpha T_\Gamma}{\ell_\Gamma} \left(1 - \frac{z^2}{z_\Gamma^2} \right), \quad (7)$$

частное решение которого получим в виде

$$U(\ell, z) = U(\ell) \left(1 - \frac{z^2}{z_\Gamma^2} \right). \quad (8)$$

В этом случае из (7)

$$\frac{d^2 U(\ell)}{d\ell^2} = \frac{\alpha T_\Gamma}{\ell_\Gamma},$$

это уравнение интегрируем дважды:

$$\frac{dU(\ell)}{d\ell} = \frac{\alpha T_\Gamma}{\ell_\Gamma} \ell + \dot{U}_0, U(\ell) = \frac{\alpha T_\Gamma}{2\ell_\Gamma} \ell^2 + \dot{U}_0 \ell + U_0.$$

Для определения $\dot{U}_0$ и U_0 используем краевые условия, учитывающие кольцевую форму модели гребня бандажа

$$\frac{dU(0)}{d\ell} = \dot{U}_0 = -\frac{dU(\ell_\Gamma)}{d\ell} = -\frac{\alpha T_\Gamma}{\ell_\Gamma} \ell_\Gamma - \dot{U}_0,$$

$$\text{а} \quad \dot{U}_0 = -\frac{\alpha T_\Gamma}{2} \dots \quad (9)$$

$$U(0) = U_0 = U(\ell_\Gamma) = \frac{\alpha T_\Gamma}{2\ell_\Gamma} \ell_\Gamma^2 - \frac{\alpha T_\Gamma}{2} \ell_\Gamma + \dot{U}_0,$$

откуда $U_0 = 0$. Теперь уточняем решение уравнения

$$U(\ell) = \frac{\alpha T_\Gamma}{2} \left(\frac{\ell^2}{\ell_\Gamma} - \ell \right) \dots \quad (10)$$

Производная

$$\frac{dU(\ell)}{d\ell} = \alpha T_\Gamma \left(\frac{\ell}{\ell_\Gamma} - 0.5 \right)$$

и функция напряжений в материале модели гребня бандажа

$$\sigma_\Gamma(\ell, z) = \alpha T_\Gamma E \left(\frac{\ell}{\ell_\Gamma} - 0.5 \right) \left(1 - \frac{z}{z_\Gamma} \right). \quad (11)$$

Полученное решение показывает диапазон колебаний напряжений сжатия – растяжения в пределах

$$\pm \sigma_r(\ell) = \pm \frac{\alpha T_\Gamma E}{2} \left(1 - \frac{z}{z_\Gamma} \right)$$

при максимальных значениях таких напряжений в поверхностном слое гребня бандажа на окружности радиуса

$$R_r - \sigma_{zm} = \pm \frac{\lambda T_\Gamma E}{2}. \quad (12)$$

Если принять значения $T_\Gamma = 200^\circ \text{C}$, $\lambda = 1.235 \cdot 10^{-5} \text{ 1/град}$ и $E = 2.1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, то $\sigma_{ГМ} = \pm \frac{1.235 \cdot 2 \cdot 2.1}{2} 10^8 = \pm 259 \text{ МПа}$.

Полученное напряжение должно суммироваться с напряжениями, которые достигаются от нагревания основного материала бандажа. Такое положение обусловлено тем, что напряжение $\sigma_{ГМ}$ является следствием превышения температуры на T_Γ у слоев модели гребня бандажа $z=0$ и $z=z_\Gamma$.

Проанализируем уточненные данные о пределах прочности материала бандажа, представленные в виде графиков (рисунок) на основании данных [1 – 6] для сталей, близких к Ст.60, и сталей типа Ст.3, Ст.15л. На основании этих результатов можно принимать значения пределов прочности:

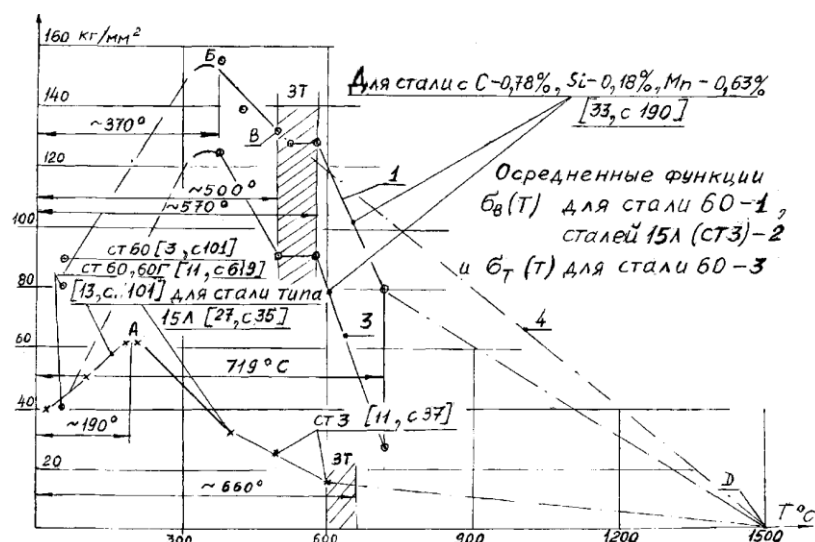
– для незакаленных сталей Ст.60 в диапазоне температур их нагреваний до 500⁰С

$$\sigma_{\sigma}=80\div 90 \text{ кг/мм}^2, \sigma_T=40 \text{ кг/мм}^2;$$

– для закаленных и упрочненных контактными давлениями и температурными циклами торможений бандажей колесных пар локомотивов в диапазоне температур до 500⁰С значения σ_{σ} могут повышаться до 150 кг/мм²; при температуре нагревания материала Ст.60 до $\approx 370^{\circ}\text{C}$ (точка В по рисунку) у этих сталей видна тенденция к увеличению предела текучести до 125 кг/мм²;

– у малоуглеродистых сталей типа Ст.3, Ст.15л наблюдается подобная тенденция увеличения предела прочности δ_{σ} с 40 до 60 кг/мм при температуре нагревания около 190⁰С (точка А, рисунок);

– при нагревании в зоне температур (500 – 570)⁰ С для материала Ст.60 характерна зона пластического течения 3Т (заштрихована на рисунке). Видимо, случаи поворота бандажей относительно колесных пар, наблюдаемые в условиях эксплуатации, вызываются нагреваниями их материала свыше 500⁰С. Для сталей типа Ст.3 – Ст.15 л подобная зона пластического течения наблюдается при температурах свыше 600⁰С.



Данные о пределах прочности материала бандажа

На основании рисунка для расчетов напряжений в глубинных слоях бандажей, например, на выносливость (усталостную прочность), в п.6.4 рекомендуется использовать $\sigma_{\sigma}\approx 90 \text{ кг/мм}^2$ при $\sigma_T\approx 40 \text{ кг/мм}^2$ и $\sigma_{\perp}\approx 40 \text{ кг/мм}^2$. У рельсовой стали, согласно [1, 2], длительный предел контактной выносливости при действии только нормальной нагрузки близок к 900 МПа. Для расчета поверхностных слоев бандажей, перекатывающихся по рельсам, на воздействие температурных напряжений рекомендуется использовать значение $\sigma_{\sigma}\approx 150 \text{ кг/мм}^2$ при $\sigma_T\approx 120 \text{ кг/мм}^2$.

При совместном учете данных напряжений $\sigma_{ГМ}$ в материале гребней бандажей при их нагревании до 300⁰С могут достигаться напряжения $\sigma_{\sigma} + \sigma_{\perp} + \sigma_{ГМ} \approx 1540\div 1620 \text{ МПа}$, превышающие предел прочности σ_{σ} . При явлениях соударений гребней бандажей (нагретых до температуры $\approx 300^{\circ}\text{C}$) с остриями стрелочных переводов создаются условия для образования групп трещин на поверхностях этих гребней.

Проведем расчетный анализ явления соударения поверхности гребня бандажа с плоской поверхностью острия стрелочного перевода. Модель этого явления представим в следующем виде.

Считаем, что гребень бандажа вблизи цилиндрической поверхности радиуса $R_{Г}$ и в плоскости, проходящей через ось вращения колесной пары, имеет радиус поверхности контакта $r_{Г}$. Со-

ударяющаяся с гребнем поверхности рельса (стрелочного перевода) плоская. Для такой модели, согласно [3], максимальные контактные напряжения можно определить по формуле

$$\sigma_{\kappa\epsilon} = 0.245 n_p \sqrt[3]{P_y E^2 \left(\frac{R_\epsilon + r_\Gamma}{R_\Gamma \times r_\Gamma} \right)^2}, \quad (13)$$

где P_y – усилие удара; n_p – коэффициент, зависящий от отношения r_ϵ ; R_ϵ определяется по таблице [1].

Для последующих расчётов принимаем силу P_y удара от статической нагрузки колеса на рельс $P_y=10.75$ тс до 4 тс [1, 3], $R_\epsilon=515$ мм (соответствует средней толщине бандажа $z_k=55$ мм) и изменяющиеся радиусы кривизны поверхности гребня r_Γ от 14.5 мм [5. С. 102] до ∞ (плоские поверхности на вершине гребня). Результаты расчётов $\sigma_{\kappa\epsilon}$ сведены в таблицу. Сюда же сведены максимальные напряжения растяжения $\sigma_{и\epsilon}=\psi\sigma_{\kappa\epsilon}$ в поверхностных слоях гребней бандажей, которые возникают при соударениях с деталями стрелочных переводов.

Расчётные параметры контактного нагружения поверхностей гребней бандажей тепловозов типа ТЭ10М при ударных взаимодействиях с деталями стрелочных переводов

Показатель	$P_y \times 10^{-3}$, кг	Радиус r_Γ [мм] при $R_\epsilon=545$ мм						
		10	14.5	23.5	34	50	1000	16029
r_Γ, R_Γ		0.0183	0.026	0.0431	0.0624	0.0917	0.545	0.034
n_p		0.576	0.615	0.676	0.724	0.777	0.9805	0.6467
$\sigma_{\kappa\epsilon}$, МПа	10.75	5071	4412	3422	2956	2451	793	416
	8.0	4594	3997	3100	2678	2221	718	377
	6.0	4173	3631	2816	2433	2017	653	342
	4.0	3647	3172	2460	2125	1762	570	299
$\sigma_{и\epsilon}$, МПа	10.75	1521	1324	1027	887	735	238	125
	8.0	1378	1199	930	603	666	215	113
	6.0	1252	1089	845	730	605	196	103
	4.0	1094	952	738	638	529	171	89.7

На основании данных таблицы можно заключить, что при ударных взаимодействиях с деталями рельсов на кривых участках пути и стрелочных переводах на криволинейных поверхностях контакта гребней бандажей с радиусами кривизны $r_\Gamma < 50$ мм достигаются контактные напряжения, превышающие предел прочности ($\sigma_\epsilon \approx 900$ МПа), а при $r_\Gamma < 23.5$ мм создаются условия для разрушения напряжениями растяжения поверхностных слоев материала гребней бандажей. Поэтому для условий эксплуатации локомотивов можно считать возможными аварийные разрушения гребней бандажей, проявляющиеся в виде групп поверхностных трещин.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь. М.: Транспорт, 1987. Раздел 1.5. С. 217 – 336.
- [2] Бирюков И.В. Механическая часть тягового подвижного состава. М.: Транспорт, 1992. – 440 с.
- [3] Конструкция и динамика тепловозов / Под ред. Иванова В.И. М.: Транспорт, 1976. – 431 с.
- [4] Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Киев: Наукова думка, 1975. – 704 с.
- [5] Справочник по электроподвижному составу, тепловозам и дизель-поездам / Под ред. Тищенко А.Н. М.: Транспорт, 1976. Т.1. – 431 с.
- [6] Решетов Д.Н. Детали машин. М.: Машиностроение, 1974. – 655 с.

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

Дата поступления
22.05.2019

Ш.С. Файзибаев, М.Ш. Валиев, Н.А. Самборская. Ғилдирак жуфтликлари бандажларининг гребени юзасида ёриқлар пайдо бўлиш шартлари

Мақолада йўлнинг эгри қисмларида рельсларнинг деталлари ва стрелка йўтказгичларининг юзасида зарб ўзари таъсирини баҳолаш учун моделлар ва аналитик боғлиқликлар тақриф этилади ва ғилдирак юзасида юзага келадиган кучланиш билан йўқ қилиш учун шароит яратилади.

УДК 531: 629.78

Н.А. КОРШУНОВА, М.И. РУЗМАТОВ

НОВЫЙ ВАРИАНТ ИЗМЕНЕНИЯ ОРБИТЫ АСТЕРОИДА

В связи с существованием астероидной опасности необходимо уметь управлять орбитами потенциально опасных астероидов. Предложим один из вариантов подхода к решению проблемы изменения параметров орбиты астероида, отличного от рассмотренного в работе [1].

Предположим, что известны результаты наблюдений с Земли за положением точки (астероид) для двух моментов времени t_1 и t_2 . Используя итерационный метод Гаусса определения орбит [2], можно найти параметры и положение орбиты астероида в гелиоцентрической системе координат:

$$a_A = \frac{\mu \tau^2}{2Y\sqrt{r_1 r_2} \cos \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} \sin \frac{E_2 - E_1}{2}},$$

$$p_A = \frac{1}{\mu \tau^2} Y^2 r_1^2 r_2^2 \sin^2(\varphi_2 - \varphi_1),$$

$$p_A = a_A(1 - e_A^2), \quad r_1 = \frac{p_A}{1 + e_A \cos \varphi_1}, \quad r_p = \frac{p_A}{1 + e_A}.$$

Здесь a_A , p_A , e_A – большая полуось, параметр и эксцентриситет орбиты астероида; r_p , r_1 – гелиоцентрические радиусы-векторы перигелия и положения астероида в момент первого измерения t_1 ; φ_1 и φ_2 (E_1 и E_2) – истинные (эксцентрисические) аномалии астероида для моментов времени t_1 и t_2 ; Y – параметр уравнения Гаусса [2]; μ – гравитационный параметр центра притяжения (Солнца).

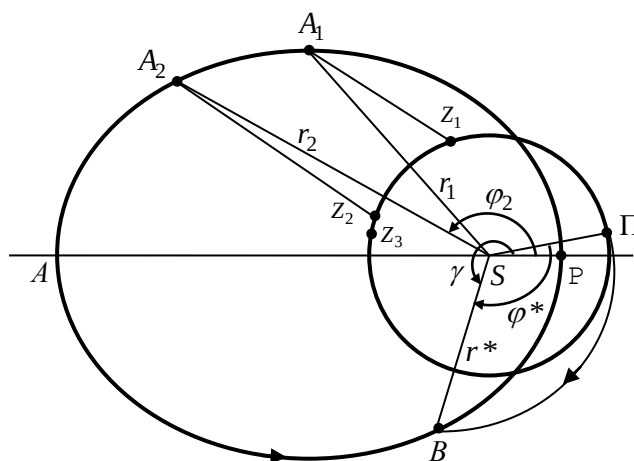


Рис. 1. Столкновение КА и астероида

Зададим положение точки столкновения космического аппарата (КА) с астероидом – B (рис. 1). Здесь AP – линия апсид астероида; γ – истинная аномалия точки B на орбите астероида; S – центр притяжения; r^* – гелиоцентрическое расстояние точки столкновения; A_1 , A_2 (Z_1 , Z_2) – по-

положение астероида (Земли) для моментов времени t_1, t_2 . Время движения астероида из положения A_2 в точку столкновения B [3]

$$t_{A_2B} = \frac{a_A^{3/2}}{\sqrt{\mu}} (E_B - E_2 - e_A (\sin E_B - \sin E_2)), \quad (1)$$

где эксцентрисические аномалии точек A_2 и B на орбите астероида определяются формулами [3]

$$E_B = 2 \arctg \left(\sqrt{\frac{1-e_A}{1+e_A}} \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2} \right), \quad E_{A_2} = 2 \arctg \left(\sqrt{\frac{1-e_A}{1+e_A}} \operatorname{tg} \frac{\varphi_2}{2} \right).$$

За это время t_{A_2B} Земля пройдёт некоторое расстояние $Z_2\Pi$ по своей орбите, запустит KA из некоторой точки Π земной орбиты навстречу астероиду, и KA пройдёт по своей эллиптической орбите из перигея Π до точки столкновения B . Таким образом, длительность всего маневра:

$$t_{A_2B} = t_Z + t_{KA}, \quad (2)$$

где t_Z – время движения Земли из Z_2 до перигея Π ; t_{KA} – время движения KA до точки столкновения B с астероидом.

Задавая эксцентриситет e орбиты KA и используя формулы [3]

$$a = \frac{r_0}{1+e}; \quad p = a(1-e^2); \quad \cos \varphi^* = \frac{p-r^*}{er^*}, \quad (3)$$

найдем большую полуось a , параметр p орбиты KA и угол φ^* – истинную аномалию точки столкновения B на орбите KA (см. рис. 1). Время t_{KA} , за которое KA пройдёт из своего перигея Π до точки столкновения B , определим из уравнения Кеплера

$$t_{KA} = \frac{a^{3/2}}{\sqrt{\mu}} (E_B^* - e \sin E_B^*). \quad (4)$$

Здесь E_B^* – эксцентрисическая аномалия точки B на орбите KA , которая находится по формуле [3]

$$\cos E_B^* = \frac{a-r^*}{ae}.$$

Столкновение произойдет при выполнении условия (2). При других результатах наблюдений за астероидом следует менять параметры орбиты KA , менять положение его перигея Π и его начальную скорость.

В качестве иллюстрации рассмотрим предлагаемый вариант решения задачи о столкновении KA с астероидом при конкретных числовых данных. Предположим, что результаты наблюдений за астероидом следующие (см. рис. 1). Земля (Z) движется в центральном ньютоновском поле притяжения Солнца (S) по известной круговой орбите радиуса $r_0=1\text{a.e.}=150 \cdot 10^6$ км; $Z_1A_1=0.852\text{a.e.}$; $Z_2A_2=0.818\text{a.e.}$; $\tau=t_2-t_1=4501400$; $c=52.134$ дня. Тогда гелиоцентрические расстояния точек A_1 и A_2 : $r_1=1.575\text{a.e.}$, $r_2=1.816\text{a.e.}$; $\varphi_2-\varphi_1=20^\circ$. Воспользовавшись методом Гаусса определения орбит [2] и известными формулами [3], найдем для астероида: $a_A=1.5\text{a.e.}$, $p_A=1.26\text{a.e.}$, $e_A=0.4$, $r_p=0.9\text{a.e.}$, $r_A=2.1\text{a.e.}$, $\cos \varphi_1=-1/2$; $\varphi_1=120^\circ$, $\varphi_2=140^\circ$. Таким образом, траектория астероида известна (см. рис. 1). Пусть истинная аномалия точки столкновения B на орбите астероида $\gamma=4.4$ рад= $252^\circ 6'$, тогда $r^*=1.437\text{a.e.}=215.5 \cdot 10^6$ км. Для определения времени движения астероида из положения A_2 в точку столкновения найдем следующие величины: $E_B=4.816$; $\sin E_B=-0.994$; $E_2=2.126$; $\sin E_2=0.8499$; $\mu=132712 \cdot 10^6$ км³/с². Таким образом, согласно (1), $t_{A_2B} \approx 367.5$ дней.

Пусть эксцентриситет орбиты KA $e=0.27$. Тогда, используя (3), получим для KA : $a=1.37\text{a.e.}$, $p=1.27\text{a.e.}$, $\varphi^*=115.5^\circ$. Время, за которое KA пройдёт из своего перигея Π до точки столкновения B , найдем из (4): $E_B^*=1.753$; $\sin E_B^*=0.9835$; $t_{KA} \approx 139.2$ дней.

Угловое расстояние от положения Земли Z_2 до перицентра орбиты KA равно 225.17° . Это расстояние Земля пройдёт за 228.3 дня. Условие столкновения (2) выполняется.

Положение Земли Z_3 в момент столкновения определим из условия, что время её движения из Π до Z_3 равно времени t_{KA} движения KA . Таким образом, истинная аномалия точки Z_3 на орбите астероида $\approx 145^\circ$.

Выясним, как изменятся параметры орбиты астероида после столкновения. Столкновение KA и астероида считается мгновенным, абсолютно неупругим ударом двух точек. В результате удара происходит мгновенное изменение траектории астероида, вектор его скорости за время удара изменится на конечную величину. Изменение параметров орбиты астероида в результате столкновения его с KA будет зависеть в первую очередь от соотношения масс KA и астероида. Обозначим через $m_1 \vec{v}_1$ ($m_2 \vec{v}_2$) массу и скорость KA (астероида) в точке столкновения B до удара; $\vec{u}$ – скорость астероида в точке B после удара. Имеем

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 = (m_1 + m_2) \vec{u}, \quad (5)$$

$$v_1 = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{r^*} - \frac{1}{a} \right)}, \quad v_2 = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{r^*} - \frac{1}{a_A} \right)}, \quad r^* = a_A (1 - e_A \cos E_B), \quad r^* = \frac{r_0(1+e)}{1+e \cos \varphi^*}.$$

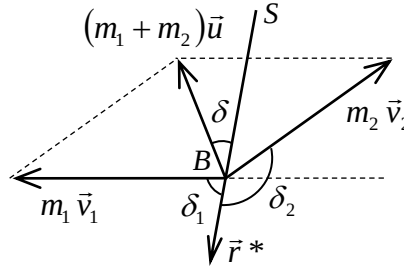


Рис. 2. Соотношение скоростей KA и астероида до и после удара

Используя закон площадей, получим

$$\sin \delta_1 = \frac{\sqrt{\mu p}}{r^* v_1}, \quad \sin \delta_2 = \frac{\sqrt{\mu p_A}}{r^* v_2}, \quad \sin \delta = \frac{\sqrt{\mu \tilde{p}_A}}{r^* u}.$$

Здесь $\delta_1, \delta_2, \pi - \delta$ – углы между скоростями $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{u}$ и радиусом-вектором точки B (рис. 2); $\tilde{p}_A$ – параметр изменённой орбиты астероида.

Величину и направление скорости астероида после удара можно найти из следующего соотношения:

$$\frac{m_1 v_1}{\sin(\delta_2 - \delta)} = \frac{m_2 v_2}{\sin(\delta_1 + \delta)} = \frac{(m_1 + m_2) u}{|\sin(\delta_1 + \delta_2)|}. \quad (6)$$

Тогда элементы орбиты астероида определяются из следующих формул:

$$\tilde{p}_A = \frac{(r^*)^2}{\mu} u^2 \sin^2 \delta; \quad \tilde{a}_A = \frac{\mu r^*}{2\mu - r^* u^2}; \quad \tilde{e}_A = \sqrt{1 - \frac{\tilde{p}_A}{\tilde{a}_A}}; \quad \tilde{r}_p = \tilde{a}_A (1 - \tilde{e}_A).$$

Для рассматриваемого числового примера имеем: $v_1 = 24.2$ км/с, $v_2 = 25.3$ км/с, $\delta_1 = 74^\circ 35'$, $\delta_2 = 113^\circ 28'$. Из (6) получим

$$\frac{\sin(\delta_1 + \delta)}{\sin(\delta_2 - \delta)} = k \frac{v_2}{v_1} = 1.0468k, \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{N \sin \delta_2 - \sin \delta_1}{\cos \delta_1 + N \cos \delta_2}, \quad (7)$$

где $k = \frac{m_2}{m_1}$, $N = 1.0468k$.

Спроектируем (5) на радиус-вектор $\vec{r}^*$:

$$v_1 \cos \delta_1 + k v_2 \cos \delta_2 = -(k+1) u \cos \delta. \quad (8)$$

Направление скорости астероида после удара зависит от соотношения масс k . Рассмотрим случай $\delta=0$. Новой траекторией астероида будет прямая линия, проходящая через центр притяжения, т.е. астероид упадет на Солнце. В этом случае $k=1.004$. Найдём положение Земли в момент пересечения падающим астероидом земной орбиты. Из (8) определим скорость астероида в точке B после столкновения: $u=1.84 \text{ км/с}$. Время движения астероида до земной орбиты можно найти из соотношения

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 = \frac{2\mu}{r_0} - \frac{2\mu}{r^*} + u^2,$$

интегрируя которое, получим $t_A \approx 67$ дней. Земля будет находиться от точки пересечения астероидом земной орбиты на угловом расстоянии $\approx 41^\circ$. При других соотношениях масс K_A и астероида результаты изменятся.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Коршунова Н.А., Рузматов М.И. Оптимизация маневра столкновения космического аппарата с астероидом // Узбекский журнал «Проблемы механики». 2018. № 2. С. 3 –7.
- [2] Эскобал П. Методы определения орбит. М.: Мир, 1970.
- [3] Охотимский Д.Е., Сихарулидзе Ю.Г. Основы механики космического полета. М.: Наука, 1990.

Национальный университет Узбекистана
им. Мирзо Улугбека

Дата поступления
06.05.2019

Н.А. Коришунова, М.И. Рузматов. Астероид орбитасини ўзгартириш учун янги вариант

Астероид орбитасининг параметрларини космик аппарат билан тўқнашув орқали ўзгартириш масаласини ҳал қилиш учун ёндашувнинг бир усули таклиф этилади.

N.A. Korshunova, M.I. Ruzmatov. New option to change the asteroid orbit

One of the variants of the approach to solving the problem of changing the parameters of the asteroid orbit by its collision with a spacecraft is proposed.

УДК 539.3

Ф. АДИЛОВ, Ш. МАХМУДОВА, Д. САГДУЛЛАЕВА, Р.А. АБИРОВ

НЕКОТОРЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО СЛОЖНОЙ РАЗГРУЗКЕ

При выводе основных положений классических теорий процесс разгрузки описывается линейно, как правило, законом Гука. Именно этот факт дал возможность в дальнейшем всем исследователям разделять полную деформацию на сумму упругой и остаточной частей.

При разгрузке и повторном пластическом простом нагружении возникает так называемая петля гистерезиса. Площадь ее мала и по сему сей факт, как правило, не учитывается в расчетах при циклических нагружениях или знакопеременном нагружении.

При сложном нагружении понимание разгрузки некоторым образом отличается, чем при простом. Согласно гипотезе предельных поверхностей, полагалось, что уменьшение значения $f(\sigma)$ (пространство напряжений) или $\Phi(\varepsilon)$ (пространство деформаций) ведет к разгрузке. Как правило, это связывалось со значением интенсивностей напряжений или деформаций. В теории упругопластических процессов принят критерий разгрузки [1], связанный с уменьшением работы $dA_f = \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon} = \sigma ds \cos \vartheta_1$ (ϑ_1 – угол сближения) или уменьшением дополнительной работы $dB_f = d\bar{\sigma} \bar{\varepsilon} = d\Sigma \varepsilon \cos \vartheta_1^*$ (ϑ_1^* – угол запаздывания). При этом данное положение не связано с кон-

цепцией предельных поверхностей. Не отвергая концепцию существования предельных поверхностей, теория упругопластических процессов все же остается гибкой к ее определению.

Схематично процесс сложной разгрузки выглядит, как показано на рис. 1, где обозначены упрочняющиеся поверхности текучести (начальная и актуальная) в форме Мизеса.

При разгрузке одним из основных моментов остается ни сколько форма поверхности текучести, а ее предел при знакопеременном нагружении (вторичный предел текучести), что характеризует, в общем, динамику начальной поверхности нагружения. На рис. 2 показан реализованный процесс сложной разгрузки на угол излома 156° (пространство деформаций). Сначала образец закручивался до значения $\Theta \approx 57.4 \cdot 10^4$, а затем растягивался с одновременным скручиванием.

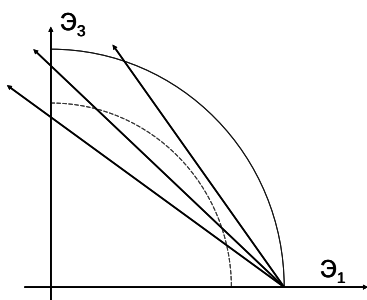


Рис. 1. Сложная разгрузка

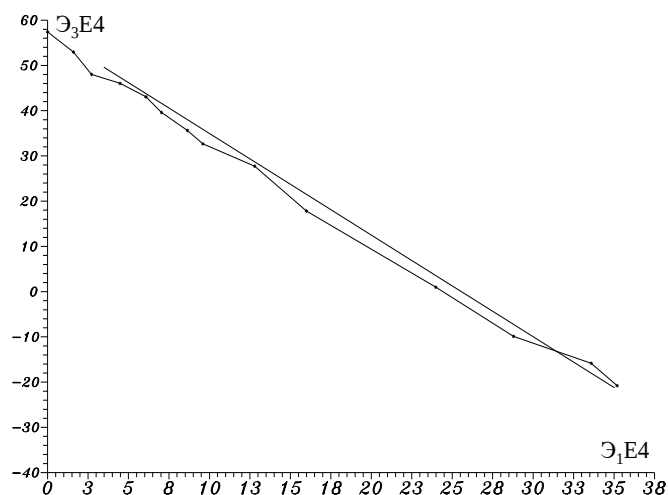


Рис. 2. Реализованный процесс деформирования (сталь-3 при $\theta=156^\circ$)

На графиках (рис. 3, 4) показаны диаграммы нагружения и прослеживания процесса. Процесс частичной разгрузки от точки I до точки L (вторичный предел текучести) характеризуется в общем линейным характером. Этот процесс характеризуется пассивным процессом деформирования и разгрузки ($dA_f < 0$, $dB_f < 0$), описание которого возможно линейным законом Гука. Процесс LU (см. рис. 3, 4) характеризуется не свойственным при простом нагружении характером (т. U – вторичный предел деформирования). При простом нагружении критерии для работ dA_f и dB следуют один из другого. При сложном нагружении из $dA_f > 0$ не следует $dB_f > 0$. Это прослеживается на участке LU . Данный процесс характеризуется активным процессом деформирования и пассивным процессом нагружения. Согласно Хаару и Карману [1], этот процесс именуется неполным упругим.

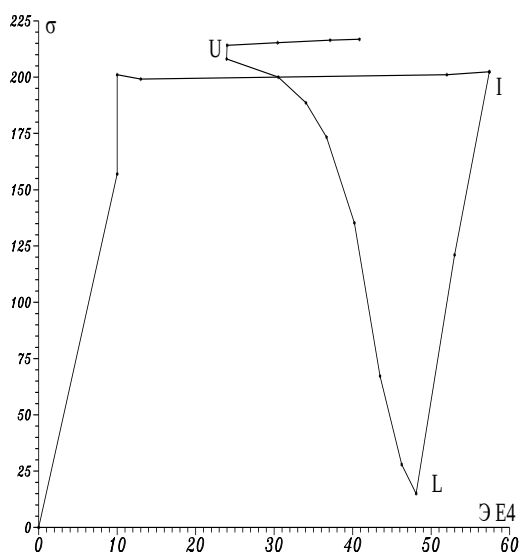


Рис. 3. Диаграмма нагружения

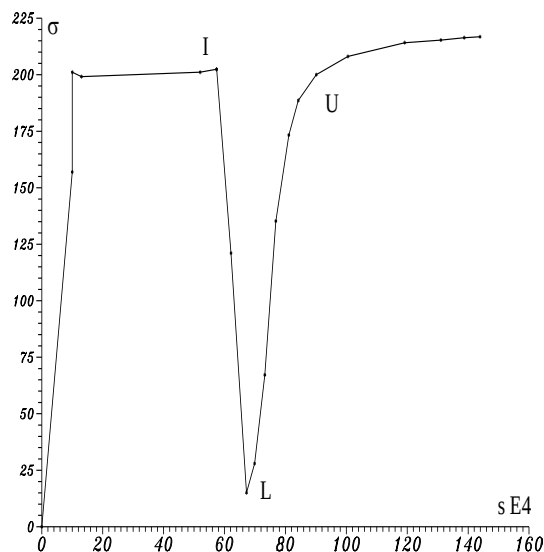


Рис. 4. Прослеживание процесса деформирования

На локальных диаграммах (рис. 5) можно проследить процесс пассивного и активного деформирования и нагружения. Эти диаграммы существенно разнятся от диаграмм простой разгрузки.

Описание процесса сложной разгрузки на основе классического подхода пытаются определить многие годы. Один из выбранных путей – гипотеза о начальной поверхности нагружения и ее динамике в процессе нагружения. Работы по эволюции поверхности нагружения (деформирования) при сложной разгрузке затруднительны ввиду отсутствия достаточного набора экспериментальных данных.

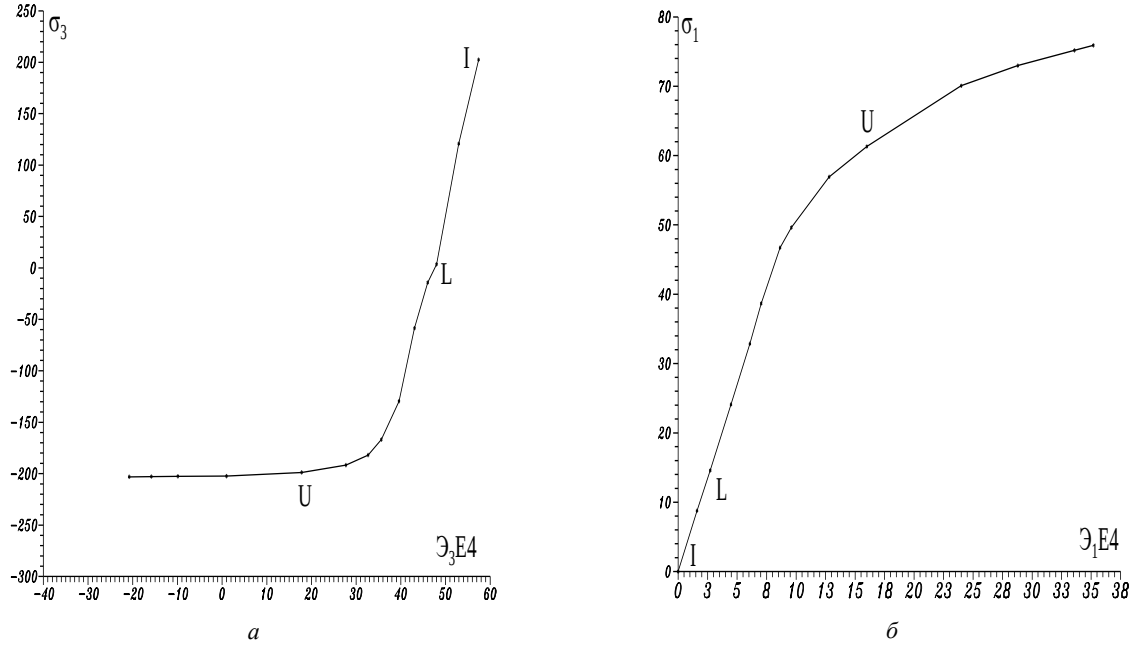


Рис. 5. Локальные диаграммы нагружения (сталь-3 при $\theta=156^\circ$): а – в пространстве $\sigma_1 - \epsilon_3$; б – в пространстве $\sigma_1 - \epsilon_1$

Попытка описания закона сложной нагрузки предпринята в работе В.Г. Зубчанинова [2] на классе многосвязных траекторий. Однако в нем опущен учет векторных свойств материала в виде следа запаздывания.

Представляет также интерес теория пластического деформирования В.С. Бондаря [3], которая является модификацией теории трансляционного упрочнения Кадашевича – Новожилова [4]. Основные положения модификации В.С.Бондаря состоят в том, что поверхность нагружения принимается в виде

$$f = \frac{1}{2}(\bar{\sigma}^0 \bar{\sigma}^0 - C_p^2) = 0 \quad \sigma^0 = C_p(s^p) \quad \bar{\sigma}^0 = \bar{\sigma} - \bar{a},$$

где $\bar{\sigma}^0$ – вектор активных напряжений; $\bar{a}$ – вектор добавочных микронапряжений; $C_p(s^p)$ – функция изотропного упрочнения от длины дуги пластического деформирования. Отсюда имеем

$$d\bar{\sigma} = 2Gd\bar{\epsilon} - (2G - P)\frac{\bar{\sigma}d\bar{\epsilon}}{k\sigma^2}(\bar{\sigma} - \bar{a}), \quad k = 1 - \frac{\bar{\sigma} - \bar{a}}{\sigma^2}, \quad \bar{a} = 2g\bar{\epsilon}^p,$$

а для определения микронапряжений используется эвристическое дифференциальное соотношение

$$d\bar{a} = g^p d\bar{\epsilon}^p + ds^p(g_a^p \bar{a} + g_s \bar{\epsilon}^p).$$

При изотропном упрочнении будем иметь: $k=1$, $\bar{a}=0$, $\bar{\sigma}^0 = \bar{\sigma}$.

Эта теория в отличие от модели Кадашевича – Новожилова способна учитывать при знакопеременном нагружении как эффект Баушингера, так и принцип Мазинга. Но эта теория не дает ответа на вопрос учета свойств запаздывания векторных и скалярных свойств материала. Хотя следует отметить, с определенной точностью процессы, где нырок напряжений не активно прояв-

ляется, и при правильном выборе материальных констант (их в этой теории 7) возможно точное описание процессов циклического нагружения (с разгрузкой).

Тем не менее, вопрос учета процессов со сложной разгрузкой остается открытым. Экспериментальные данные в этом направлении не многочисленны. Но путь для решения данной проблемы лежит в плоскости теории упругопластических процессов А.А. Ильюшина.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зубчанинов В. Г. Механика процессов пластических сред. М.: Физматлит, 2010. – 352 с.
- [2] Зубчанинов В. Г. Закон сложной разгрузки материалов в теории пластичности // Проблемы прочности и пластичности. Вып. 70. 2008. С. 7 – 17.
- [3] Бондарь В. С. Неупругость. Варианты теории. М.: Физматлит, 2004. – 144 с.
- [4] Кадашев Ю. И., Помяткин С. П. Статистическая теория пластичности, учитывающая влияние параметра Лоде // МТТ. 1990. № 3. С. 91 – 95.

Институт механики и сейсмостойкости сооружений
им. М.Т. Уразбаева АН РУз

Дата поступления
27.05.2019

Ф. Адиллов, Ш. Махмудова, Д. Сагдуллаева, Р.А. Абилов. Мураккаб юксизланиш бўйича ўтказилган тажриба маълумотлари

Мақолада мураккаб юксизланиш бўйича ўтказилган тажрибалар ҳақидаги маълумотлар келтирилган ва материалларнинг юксизланиш жараёнидаги характерли хусусиятлари ёритилган. Бу жараёнларни тавсифловчи тенгламаларни тузиш ва уларни ечиш мураккаблиги кўрсатилган.

F. Adilov, Sh. Mahmudova, D. Sagdullaeva, R.A. Abirov. Some experimental data on complex unloading

The experimental data on complex unloading and highlights the characteristic properties of materials during this loading process are presented in this issue. The difficulties in the description of these processes and their solutions are shown here.

УДК 539.3

А. БЕГМАТОВ, Н.Т. МАМАТОВА

ЗАДАЧА О ВНЕЗАПНОМ НАГРУЖЕНИИ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩЕГО С ОКРУЖАЮЩЕЙ ВНЕШНЕЙ СРЕДОЙ

Рассмотрим полубесконечный цилиндрический стержень, расположенный внутри некоторой сплошной среды. Пусть к концу $x=0$ этого стержня внезапно приложено постоянное давление $\sigma_0 > \sigma_s$, т.е.

$$\sigma(0, t) = -\sigma_0, \quad t > 0, \quad (1)$$

где σ_s – предел упругости материала стержня.

Одновременно с этим внешняя окружающая среда приходит в движение с постоянной скоростью v_{cp} . Примем, что при $t > 0$ имеет место трение, описываемое по закону Кулона – Амонтона [1, 2], а поведение стержня описывается, согласно модели Прандтля (рис. 1) – модели линейно упрочняющегося материала [3, 4].

Как известно [3, 4], в случае отсутствия трения напряженно-деформированное состояние стержня при $t > 0$ изображается, согласно рис. 2. Так, в области *I* – перед фронтом упругой волны стержень находится в невозмущенном состоянии, в области *II* – расположенной между характеристиками $x = at$ и $x = a_1 t$ ($a = \sqrt{E/\rho}$, $a_1 = \sqrt{E_1/\rho}$) – соответственно скорости упругой и пластической волн в стержне, E и E_1 – модули упругости упругой и пластической зон деформаций) напряженно-деформированное состояние характеризуется постоянными параметрами: $\sigma = -\sigma_s$, $\varepsilon = \varepsilon_s$, $u_t = a\varepsilon_s$. В области *III* имеет место постоянное напряжение $\sigma = -\sigma_0$.

Цель статьи – исследование влияния трения по закону трения Кулона на напряженно-деформированное состояние стержня в областях *I*, *II* и *III*.

При этом будем полагать, что в областях *II* и *III* сила трения определяется формулой

$$F_{mp} = -k \frac{\tau}{\rho}, \quad \tau = \frac{fL}{S} P,$$

где $k = \text{sign}(u_t - v_{cp})$ – величина, совпадающая со знаком скорости движения сечений стержня относительно окружающей среды; u – перемещение сечений стержня; ρ – плотность стержня; τ – касательное напряжение на поверхности контакта стержня со средой; P – контактное давление; f – коэффициент трения; L – периметр стержня; S – площадь поперечного сечения стержня.

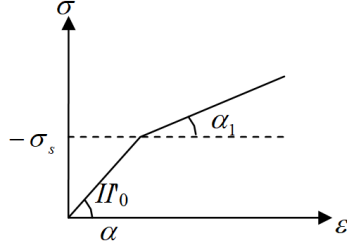


Рис. 1. Модель Прандтля

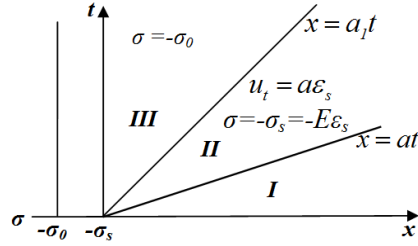


Рис. 2. Напряженно-деформированное состояние при отсутствии трения

При этом напряженно-деформированное состояние стержня в областях *II* и *III* соответственно описывается уравнениями

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{k\tau}{\rho} \quad \text{и} \quad \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a_1^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{k\tau}{\rho}. \quad (2)$$

Далее примем, что коэффициент трения f в области *I* может отличаться от коэффициента трения в областях *II* и *III*. В этой связи силу трения $F_{mp}^{(I)}$ в области *I* представим в виде

$$F_{mp}^{(I)} = -k_0 k \frac{\tau}{\rho} = k_0 F_{mp}, \quad (3)$$

где k_0 – конечное неотрицательное число, определяемое далее.

При этом в области *I* приходим к следующей задаче Коши:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - k_0 \cdot k \frac{\tau}{\rho}, \quad x > at, \quad t > 0, \quad (4)$$

$$u(x, 0) = 0, \quad u_t(x, 0) = 0. \quad (5)$$

Очевидно, что здесь $k=-1$ и решение задачи (4), (5) в области *I* имеет вид

$$u = k_0 \frac{\tau}{\rho} \frac{t^2}{2}. \quad (6)$$

В зависимости от свойств материала стержня и скорости внешней среды v_{cp} возможны неравенства

$$\frac{\sigma_s a}{E v_{cp}} \geq 1, \quad \frac{\sigma_s a}{E v_{cp}} < 1.$$

Рассмотрим задачу в области *II* (см. рис. 2) при условии $\frac{\sigma_s a}{E v_{cp}} > 1$.

Постановка задачи. Найти решение уравнений (2) в области *II*, удовлетворяющее начальным условиям

$$u(x, 0) = 0, \quad u_t(x, 0) = 0, \quad (7)$$

условию (1) и динамическому условию непрерывности:

на границе раздела зон пластической и упругой деформаций $x=a_1t$:

$$(\sigma + \rho a_1 u_t)|_{x=a_1t-0} = (\sigma + \rho a_1 u_t)|_{x=a_1t+0}, \quad (8)$$

на фронте упругой волны $x=at$:

$$(\sigma + \rho a u_t)|_{x=at-0} = (\sigma + \rho a u_t)|_{x=at+0}, \quad (9)$$

$u_{одн}$ – решение при $\tau=0$, т.е. однородного уравнения (2), удовлетворяющее условиям (1), (8), имеет вид

$$u_{одн} = \frac{\sigma_s}{E}(at - x).$$

Частное решение u_n неоднородного первого уравнения (2) в области II находим с помощью преобразования Лапласа

$$u_n = \frac{\tau}{\rho a^2} \frac{1}{2(1-\mu^2)} (x - a_1 t)^2, \quad \mu = \frac{a_1}{a}.$$

Сумма решений $u_{одн}$ и u_n удовлетворяет всем условиям задачи за исключением условия (9).

В связи с этим решение задачи в области II представим в виде $u = u_{одн} + u_n + \frac{\tau}{\rho a^2} f(x, t)$:

$$u = \frac{\sigma_s}{E}(at - x) + \frac{\tau}{\rho a^2} \left[\frac{(x - a_1 t)^2}{2(1-\mu^2)} + f(x, t) \right],$$

где $f(x, t)$ – функция, удовлетворяющая однородному уравнению и тривиальным условиям при $x=0$ и $t=0$. Нетрудно видеть, что в случае $k_0=0$ функция $f(x, t)=Axt$ удовлетворяет условию (9), если

$$A = -\frac{a}{2} \frac{1-\mu}{1+\mu}.$$

В общем случае положим

$$f(x, t) = Axt + A_1 \frac{(x + at)^2}{2}.$$

При этом, удовлетворяя динамическому условию (9), находим $A_1 = \frac{k_0}{4}$.

Таким образом, решение задачи (1), (2), (8) и (9) в области II имеет вид

$$u(x, t) = \frac{\sigma_s}{E}(at - x) + \frac{\tau}{\rho a^2} \left[\frac{(x - a_1 t)^2}{2(1-\mu^2)} - \frac{a}{2} \frac{1-\mu}{1+\mu} xt + \frac{k_0}{8} (x + at)^2 \right]. \quad (10)$$

Отсюда имеем

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} = -\frac{\tau}{2\rho a} \left[\frac{1+\mu^2}{1-\mu^2} - \frac{k_0}{2} \right] < 0, \text{ если } k_0 < 2 \frac{1+\mu^2}{1-\mu^2}. \quad (11)$$

Будем полагать, что последнее неравенство выполняется. Тогда скорость сечений стержня u_t является убывающей функцией и, следовательно, её минимальное значение достигается на фронте упругой волны $x=at$. При этом

$$u_t|_{x=at-0} = \frac{\sigma_s a}{E} - \frac{\tau}{2\rho} (1 - k_0)t. \quad (12)$$

Отсюда следует, что возможны два случая:

1. $u_t|_{x=at-0}$ убывает с ростом t , если $0 \leq k_0 < 1$, и возможны предельные равенства

$$u_t \rightarrow v_{cp}, \quad x \rightarrow at_0, \quad t \rightarrow t_0 = \frac{2\rho}{\tau} \left(\frac{\sigma_s a}{E} - v_{cp} \right). \quad (13)$$

2. $u_t|_{x=at-0} \geq \frac{\sigma_s a}{E} > v_{cp}$, если $1 \leq k_0 \leq 2 \frac{1+\mu^2}{1-\mu^2}$. В этом случае, как следует из (12), скорость сечений стержня будет больше скорости v_{cp} внешней среды ($k=+1$) и (13) не осуществляется, в то время как с передней стороны фронта волны

$$u_t|_{x=at+0} = v_{cp} \text{ при } t = t^* = \frac{v_{cp}}{k_0} \frac{\rho}{\tau}. \quad (14)$$

Рассмотрим случай 1 ($0 \leq k_0 < 1$). Нетрудно видеть, что

$$\text{а) } t_0 < t^*, \text{ если } 1 < \frac{\sigma_s a}{E v_{cp}} < \frac{1+k_0}{2k_0}; \quad \text{б) } t_0 > t^*, \text{ если } \frac{\sigma_s a}{E v_{cp}} > \frac{1+k_0}{2k_0}. \quad (15)$$

При этом (10) является решением первого уравнения (2) как в случае 1, а ($0 < t \leq t_0$), так и в случае 1, б ($0 < t \leq t^*$).

Напряжение в области II, как следует из (10), имеет вид

$$\sigma = -\sigma_s + \tau \left[\frac{(x - a_1 t)}{1 - \mu^2} - \frac{a}{2} \frac{1 - \mu}{1 + \mu} t + \frac{k_0}{4} (x + at) \right]. \quad (16)$$

Очевидно, что $\partial \sigma / \partial x > 0$ в области II и

$$\sigma|_{x=a_1 t+0} = -\sigma_s + \frac{\tau}{2a} \left[\frac{k_0}{2} (1 + \mu) - \frac{1 - \mu}{1 + \mu} \right].$$

Отсюда следует, что в области II имеет место упругая деформация как в случае 1, а, так и в случае 1, б, если имеет место неравенство

$$\frac{2(1 - \mu)}{(1 + \mu)^2} < k_0. \quad (17)$$

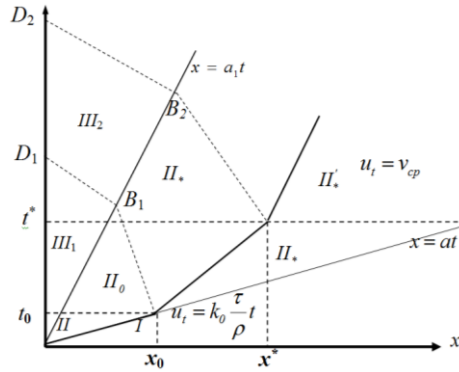


Рис. 3. Схематическое изображение областей с различными законами трения для случая $t^* > t_0$

Будем полагать, что условие (17) выполняется, и рассмотрим случай 1, а ($t_0 < t \leq t^*$). Будем также полагать, что при $t_0 < t \leq t^*$ область II делится на две подобласти II_0 и II'_0 (рис. 3), причем подлежащая определению граница раздела этих областей $\Gamma_0 = II_0 \cap II'_0$ определяется уравнением

$$\Gamma_0: x - x_0 = a_0(t - t_0), (x_0 = at_0, a_0 = \alpha_0 a).$$

Решение первого уравнения (2) в области II_0 , при $t_0 < t \leq t^*$, удовлетворяющее на границе Γ_0 условию

$$\left. \frac{\partial u}{\partial t} \right|_{\Gamma_0} = v_{cp} \quad (18)$$

и условию динамической непрерывности

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t} + a \frac{\partial u}{\partial x} \right) \Big|_{\Gamma_0} = k_0 \frac{\tau}{\rho} t, \quad (19)$$

будем искать в виде

$$u(x, t) = \frac{\sigma_s}{E} (at - x) + \frac{\tau}{\rho a^2} \left[\frac{(x - a_1 t)^2}{2(1 - \mu^2)} - \frac{a}{2} \frac{1 - \mu}{1 + \mu} xt + \frac{k_0}{8} (x + at)^2 + \frac{1}{2} A_2 (x - x_0 + a(t - t_0))^2 \right]. \quad (20)$$

Если в условии (19) воспользоваться тождеством

$$(u_t + au_x) \Big|_{\Gamma_0} = (u_t + au_x) \Big|_{x=x_0, t=t_0} + \left[(u_t + au_x) \Big|_{\Gamma_0} - (u_t + au_x) \Big|_{x=x_0, t=t_0} \right],$$

где $(u_t + au_x) \Big|_{x=x_0, t=t_0} = k_0 \frac{\tau}{\rho} t_0$,

то оно примет вид

$$\left[2(1 + \alpha_0)(A_1 + A_2) + (1 - \mu) \frac{\alpha_0 - \mu}{1 - \mu^2} - \frac{1 - \mu}{2(1 + \mu)} (1 + \alpha_0) \right] (t - t_0) = k_0 \frac{\tau}{\rho} (t - t_0). \quad (21)$$

Аналогично условие (18) примет вид

$$\mu \frac{\alpha_0 - \mu}{1 - \mu^2} + \frac{\alpha_0}{2} \frac{1 - \mu}{1 + \mu} = (1 + \alpha_0)(A_1 + A_2). \quad (22)$$

Из этих равенств находим

$$\alpha_0 = \frac{1 - 4\mu + 3\mu^2 + 2k_0}{3 + \mu^2}. \quad (23)$$

Как следует из (14) и (19), $\partial u / \partial t$ непрерывна в точке $x = x^*$, $t = t^*$, так как

$$\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{\Gamma_0} = v_{cp}, \quad \frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{\Gamma_0} \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow t^*.$$

Вследствие этого при $t > t^*$ область Π делится на две подобласти Π_* и Π'_* (см. рис. 3) с границей раздела $\Gamma_* = \Pi_* \cap \Pi'_*$:

$$\Gamma_*: x - x^* = a_*(t - t^*), \quad (a_* = \alpha^* a). \quad (24)$$

Если обозначить решение в области Π_* для $t > t^*$ через u^* , то аналогично (20), (22) и (23) находим

$$u^* = u + \frac{\tau}{2\rho a^2} A_3 (x - x_0 + a(t - t_0))^2, \quad (25)$$

$$A_3 = \frac{1}{1 + \alpha^*} \left[\frac{1 - \mu}{2(1 + \mu)} - \frac{\alpha^* - \mu}{1 - \mu^2} \right] - (A_1 + A_2), \quad \alpha^* = \frac{1 + 3\mu^2}{3 + \mu^2},$$

где u для $t > t^*$ вычисляется по формуле (20). При этом (25) имеет место практически при любых $t > t^*$, поскольку для обычных встречающихся значений μ [3] пересечение прямой (24) и характеристики $x = at$ не имеет места.

Рассмотрим случай 1, б для $t^* < t \leq t_0$. Решение уравнения (21) в области Π_* (рис. 4) схоже с (20) и имеет вид

$$u^* = u + \frac{1}{2} A_2 [x - x^* + a(t - t^*)]^2 \frac{\tau}{\rho a^2}, \quad A_2 = -\frac{k_0}{4}, \quad (26)$$

где A_2 найдено из динамического условия непрерывности на фронте волны $x = at$. При этом, как это

следует из (12) и (26), скорость $u_t|_{x=at-0}$ имеет вид

$$u_t^*|_{x=at-0} = \frac{\sigma_s a}{E} - \frac{\tau}{2\rho} (1-k_0)t - \frac{k_0}{4} (2at - (x^* + at)) \frac{\tau}{\rho a}$$

и достигает скорости внешней среды v_{cp} при $t=t_0$:

$$t_0 = \frac{2\rho}{\tau} \left[\frac{\sigma_s a}{E} - v_{cp} \right] + k_0 t^*. \quad (27)$$

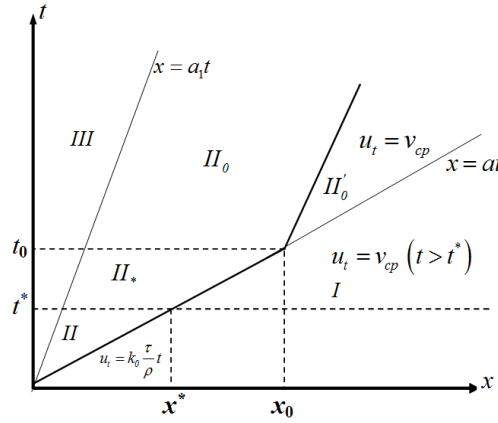


Рис. 4. Схематическое изображение областей с различными законами трения для случая $t^* < t_0$

В результате скорость будет непрерывной в точке (x_0, t_0) и при $t > t_0$ область II^* делится на две части: II_0 и II'_0 (см. рис. 4) с границей раздела $\Gamma_0 = II_0 \cap II'_0$: $x - x_0 = a_0(t - t_0)$.

Решения в этих областях имеют вид

$$u_0 = u^* + \frac{1}{2} A_3 [x - x_0 + a(t - t_0)]^2 \text{ в области } II_0; \quad (28)$$

$$\frac{\partial u_0}{\partial t} = v_{cp} \text{ в области } II'_0.$$

Из условий непрерывности скоростей и напряжения на Γ_0

$$\left. \frac{\partial u_0}{\partial t} \right|_{\Gamma_0} = v_{cp}, \quad \left. \frac{\partial u_0}{\partial x} \right|_{\Gamma_0} = 0$$

находятся неизвестные параметры A_3 и α_0 :

$$A_3 = \frac{1}{1 + \alpha_0} \left[\frac{1 - \mu}{2(1 + \mu)} - \frac{\alpha_0 - \mu}{1 - \mu^2} \right], \quad \alpha_0 = \frac{1 - \mu^2}{3 + \mu^2}. \quad (29)$$

Теперь рассмотрим случай 2 $\left(1 \leq k_0 < 2 \frac{1 + \mu^2}{1 - \mu^2} \right)$.

При $0 < t \leq t^*$ решение уравнения (21), удовлетворяющее динамическому условию (9) на фронте упругой волны, имеет вид (10). Согласно (14), при $t \rightarrow t^* - 0$ скорость с передней стороны фронта волны становится равной скорости внешней среды v_{cp} . При этом изменится правая часть (9) и вследствие этого первое уравнение (2) рассматривается в области II^* (см. рис. 4) с учетом того, что между характеристиками $x=at$ и $x=a_1t$ все ещё $u_t > v_{cp}$. Из вышеуказанного следует, что эта задача совпадает с аналогичной задачей в случае 1б. Аналогичное совпадение имеет место и при $t > t_0$, где t_0 определяется по формуле (27). Таким образом, решение в II^* при $t > t^*$ определяется формулой (26), а в областях II_0 и II'_0 — формулами (28) и (29).

Перейдем к нахождению решения в области пластической деформации.

Постановка задачи. Требуется найти решение уравнения

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a_1^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\tau}{\rho}, \quad 0 < x < a_1 t, \quad t > 0, \quad (30)$$

удовлетворяющее условиям

$$\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x=0} = -\frac{\sigma_0}{E_1} \quad (31)$$

$$(\rho a_1 u_t + \rho a_1^2 u_x)|_{x=a_1 t-0} = (\rho a_1 u_t + \rho a_1^2 u_x)|_{x=a_1 t+0}. \quad (32)$$

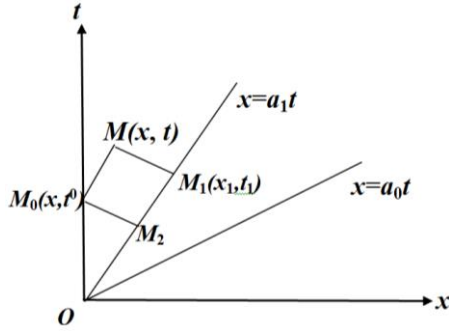


Рис. 5. Схема использования метода характеристик в пластической зоне

Решение в области III, образованной осью t и фронтом пластической волны $x=a_1 t$, будем искать методом характеристик (рис. 5).

Выберем произвольную точку $M(x, t)$ в этой области. Проведем через неё положительную характеристику, которая пересечется с осью t в точке $M_0(0, t^0)$, и отрицательную характеристику до пересечения с $x=a_1 t$ в точке $M_1(x_1, t_1)$.

Условия на этих характеристиках имеют вид

$$dv = \pm \frac{1}{\rho a_1} d\sigma - \frac{\tau}{\rho} dt. \quad (33)$$

Также имеем динамическое условие совместности, вытекающее из закона сохранения импульса

$$[\sigma] = -\rho a_1 [v]. \quad (34)$$

Вдоль положительной характеристики $M_0 M$, согласно (34), имеем

$$v(M) - v(M_0) = \frac{\sigma(M) - \sigma(M_0)}{\rho a_1} - \frac{\tau}{\rho} (t - t_0), \quad (35)$$

а вдоль отрицательной характеристики $M M_1$

$$v(M) - v(M_1) = -\frac{\sigma(M) - \sigma(M_1)}{\rho a_1} - \frac{\tau}{\rho} (t - t_1). \quad (36)$$

В точке M , приравнявая (35) и (36), находим

$$\sigma(M) = \frac{1}{2} [\sigma(M_0) + \sigma(M_1) + \rho a_1 (t_1 - t^0) + \rho a_1 (v(M_1) - v(M_0))], \quad (37)$$

где $\sigma(M_1)$, $v(M_1)$, $v(M_0)$, t^0 , t_1 – требующие определения неизвестные.

Вдоль характеристики OM_1 , используя условие (33), получим

$$v(M_1) = v(0) + \frac{\sigma(M_1) - \sigma(0)}{\rho a_1} - \frac{\tau}{\rho} t_1, \quad (38)$$

где $\sigma(0) = -\sigma_0$, $v(0)$ – соответственно заданная нагрузка и скорость на торце стержня; $\sigma(M_1) = \sigma(M_1 - 0)$, $v(M_1) = v(M_1 - 0)$ – предельные значения σ и v в точке M_1 по левую сторону от фронта $x=a_1 t$.

Из (38) можно выразить

$$\sigma(M_1) = -\sigma_0 + \rho a_1 v(M_1) + \rho a_1 t_1 - \rho a_1 v(0). \quad (39)$$

Из условия разрыва (34) в точке M_1 следует, что

$$\sigma(M_1 + 0) - \sigma(M_1 - 0) = -\rho a_1 [v(M_1 + 0) - v(M_1 - 0)], \quad (40)$$

где $v(M_1+0)=u_t|_{M_1}$, $\sigma(M_1+0)=\sigma|_{M_1}$ – соответственно скорость и напряжение в точке M_1 со стороны области II . Отсюда

$$\sigma(M_1)=\sigma(M_1-0)=\sigma(M_1+0)+\rho a_1[u_t|_{M_1}-v(M_1)]. \quad (41)$$

Суммируя выражения (39) и (41), получим

$$\sigma(M_1)=\frac{\sigma(M_1+0)-\sigma_0}{2}-\frac{\rho a_1}{2}(v(0)-u_t|_{M_1})+\frac{\tau}{2}t_1, \quad (42)$$

где неизвестными являются t_1 и $v(0)$.

Учитывая, что в (41) при стремлении точки $M_1 \rightarrow 0$ к точке $O(0,0)$ имеют место предельные равенства

$$\sigma(M_1-0) \rightarrow -\sigma_0, \quad v(M_1-0) \rightarrow v(0,0)=v(0), \quad \sigma(M_1+0) \rightarrow \sigma(0,0)=-\sigma_s \quad (43)$$

из (40) находим

$$v(0)=\frac{\sigma_0-\sigma_s}{\rho a_1}+u_t|_0. \quad (44)$$

Подставив (44) в (42), а (44), (42) – в (38), получим выражения напряжения и скорости в точке M_1 :

$$\sigma(M_1)=-\sigma_0+\frac{\sigma(M_1+0)+\sigma_s}{2}+\frac{\rho a_1}{2}(u_t|_{M_1}-u_t|_0)+\frac{\tau}{2}t_1, \quad (45)$$

$$v(M_1)=\frac{\sigma(M_1+0)+\sigma_s}{2\rho a_1}+\frac{\sigma_0}{2\rho a_1}+\frac{1}{2}(u_t|_{M_1}+u_t|_0)-\frac{\tau}{2\rho}t_1, \quad (46)$$

где неизвестной является t_1 .

Теперь перейдем к определению скорости $v(M_0)$ в точке M_0 . Проведем через точку M_0 характеристику отрицательного наклона до пересечения с фронтом $x=a_1t$ в точке M_2 . Из условия (33) и (34) на M_0M_2 и учитывая, что $\sigma(M_0)=-\sigma_0$, находим

$$v(M_0)=\frac{\sigma_0}{\rho a_1}+\frac{\sigma(M_0+0)}{\rho a_1}+u_t|_{M_2}-\frac{\tau}{\rho}(t^0-t_2). \quad (47)$$

Для определения t^0 , t_1 , t_2 воспользуемся уравнениями характеристик для M_0M , M_0M_2 , MM_1 , из которых соответственно находятся

$$t^0=t-\frac{x}{a_1}, \quad t_2=\frac{t^0}{2}, \quad t_1=\frac{1}{2}\left(\frac{x}{a_1}+t\right). \quad (48)$$

Подставив (45), (46), (47) и (48) в уравнение (36) и (37), получим следующее окончательное выражение, определяющее напряжение и скорости частиц в произвольной точке M области III :

$$\sigma(M)=-\sigma_0+\left[\frac{\sigma(M_1+0)-\sigma(M_2+0)}{2}+\frac{\rho a_1}{2}(u_t|_{M_1}-u_t|_{M_2})+\frac{\tau}{2}x\right], \quad (49)$$

$$v(M)=\frac{\sigma_0}{\rho a_1}+\frac{\sigma(M_1+0)+\sigma(M_2+0)}{2\rho a_1}+\frac{1}{2}(u_t|_{M_1}+u_t|_{M_2})-\frac{\tau}{2\rho}t. \quad (50)$$

Однако следует учесть, что область III (см. рис. 3) между осью t и характеристикой $x=a_1t$ делится на подобласти III_1 , III_2 и т.д., границей раздела которых являются отрицательные характеристики, выходящие из точек B_1 , B_2 и т.д. Точки B_1 и B_2 – точки пересечения характеристики $x=a_1t$ с отрицательными характеристиками, выходящими соответственно из точек (x_0, t_0) и (x^*, t^*) . При этом, если $M \in III_1 (M \in III_2)$, то вычисления по формулам (33) и (34) следует производить с использованием решения в области $II_0 (II^*)$. Аналогично осуществляются вычисления и в случаях, изображенных на рис. 4.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Никитин Л. В. Статика и динамика твердых тел с внешним трением. М.: Московский лицей, 1998. – 272 с.
- [2] Юнин Е. К. Загадки и парадоксы сухого трения. М.: Либроком, 2008. – 121 с.
- [3] Новацкий В. К. Волновые задачи теории пластичности. М.: Мир, 1978. – 308 с.
- [4] Рахматулин Х. А., Демьянов Ю. А. Прочность при интенсивных кратковременных нагрузках. М.: Физматгиз, 1961. – 398 с.

Национальный университет Узбекистана
им. Мирзо Улугбека

Дата поступления
06.05.2019

А. Бегматов, Н.Т. Маматова. Ташиқи муҳит билан ўзаро таъсирда бўлган эластик-пластик стерженнинг зарбавий таъсири масаласи

Бирор муҳитда жойлашган ярим чексиз стерженнинг эластик-пластик юкланиши масаласи қаралган. Ишқаланиш коэффициенти турли бўлган соҳаларда стерженнинг кучланганлик-деформацияланганлик ҳолатига Кулон қонуни бўйича ишқаланишининг таъсири ўрганилган. Прандтл схемасига бўйсунувчи стерженни эластик-пластик юкланишида тўлқин тенгламалари ечимининг аналитик ифодалари олинган. Стержен ва муҳит зарралари тезликлари орасидаги ўзаро таъсирнинг турли ҳоллари кўрилган. Ишқаланиш ва тезлашиш соҳаларини ажратувчи чегараларни аниқловчи функцияларнинг ифодалари топилган.

A. Begmatov, N.T. Mamatova. The problem of sudden loading of elastic-plastic rod interacting with the medium

The problem of sudden elastic-plastic loading of a semi-bounded rod in a medium moving at a constant speed is studied. The influence of friction according to Coulomb's law on the stress-strain state of the rod in areas with different friction coefficients is investigated. Analytical solutions of wave equations are obtained considering that the material of the rod is subject to the Prandtl scheme. Consider the different cases of the particle velocity of the rod, and the environment. The expressions of the functions defining the interface between the friction and acceleration areas are obtained.

УДК 532.517.4

З.М. МАЛИКОВ, Ф.Х. НАЗАРОВ, Д.П. НАВРУЗОВ

ЧИСЛЕННЫЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЯ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ $k - \varepsilon$

Многофазные турбулентные закрученные потоки широко используются для интенсификации процессов теплообмена в различных промышленных аппаратах. Примерами таких аппаратов могут служить химические реакторы, камеры сгорания, пылеуловители, сепараторы и т.д.

В статье исследован двухфазный турбулентный поток в центробежном сепараторе. На практике объемная плотность пыли в сепараторах не превосходит 10 г/м^3 , что намного меньше плотности воздуха. Данное обстоятельство существенно облегчает исследование многофазного потока, так как можно пренебречь влиянием пыли на динамику газового потока. Поэтому в данном случае исследование многофазного потока условно предопределяется двумя задачами: 1) исследование закрученного турбулентного потока; 2) исследование кинематики твердых частиц (жидких капель). Следовательно, первоначально находятся параметры газовой фазы, затем на основе полученных параметров газа решается задача движения пылевых частиц.

Известно, что закрученные потоки характеризуются сильной искривленностью линий тока, возникновением рециркуляционных зон, расположение и размеры которых в значительной мере зависят от интенсивности крутки и конфигурации границ. Кроме того, такие потоки являются турбулентными. Поэтому для их исследования требуется привлечение эффективных моделей турбулентности. В последнее время появились достаточно эффективные модели турбулентности [1 – 2]. В дальнейшем эти методы модифицированы и для турбулентных потоков с небольшой закруткой [3 – 4]. Однако проверка этих моделей для сильно закрученных потоков показала, что их точность недостаточна [5] и они для вращающихся потоков не имеют преимущества по сравнению с другими. Поэтому в статье для численного исследования потока в пылеуловителе используется хорошо проверенная на практике модификация модели $k - \varepsilon$ для закрученных потоков [6]. Почти все предыдущие модификации модели $k - \varepsilon$ были связаны с изменением выражений для эмпирических констант c_2 или(и) c_μ . В этой же статье сделана попытка модифицировать член в ε -уравнении, свя-

занный с генерацией так, чтобы эмпирически учесть дополнительные корреляции, возникающие в закрученном течении. Для этого вводится коэффициент

$$c_1 = 1.44 - Ri.$$

Здесь Ri – число Ричардсона $Ri = G_\varphi / (G_{zr} + G_\varphi)$ (G_φ – генерация за счет тангенциальной составляющей скорости v_φ ; G_{zr} – генерация за счет составляющих u , v). Генерация G_φ определена как

$$G_\varphi = \mu_s \left[\left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\varphi}{r} \right) \right)^2 + \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\varphi^2}{r} \right) \right].$$

Уравнения в цилиндрической системе координат с осью z вдоль оси канала и радиальной координатой r имеют следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \rho v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + \rho v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{\partial P}{\partial z} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_s \frac{\partial v_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_s \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_s \frac{\partial v_z}{\partial z} \right), \\ \rho v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \rho v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} - \frac{\rho v_\varphi^2}{r} + \frac{\partial P}{\partial r} &= \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \mu_s \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - 2 \mu_s \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_s \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_s \frac{\partial v_z}{\partial r} \right), \\ \rho v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \rho v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{\rho v_\varphi v_r}{r} &= \frac{\partial r^2 \mu_s \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r} \right)}{r^2 \partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_s \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} \right), \\ \rho v_r \frac{\partial k}{\partial r} + \rho v_z \frac{\partial k}{\partial z} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_s}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_s}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + G - \rho \varepsilon, \\ \rho v_r \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} + \rho v_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} &= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_s}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_s}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + c_1 f_1 \frac{\varepsilon}{k} G - c_2 f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}. \end{aligned} \right. \quad (1)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$c_1 = 1.44 - Ri, \quad \mu_s = \mu + \mu_t, \quad G = G_{zr} + G_\varphi$$

$$Ri = G_\varphi / (G_{zr} + G_\varphi), \quad \mu_t = c_\mu f_\mu \rho k^2 / \varepsilon,$$

$$G_\varphi = \mu_s \left[\left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\varphi}{r} \right) \right)^2 + \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial z} \right)^2 - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\varphi^2}{r} \right) \right],$$

$$G_{zr} = 2 \mu_s \left[\left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^2 \right],$$

$$f_\mu = (1 - \exp(-A_\mu R_R))^2 (1 + A_t / R_t),$$

$$f_1 = 1 + (A_t / f_\mu)^3, \quad f_2 = 1 - \exp(-R_t^2),$$

$$R_t = \rho k^2 / \mu \varepsilon, \quad R_R = \rho k^{1/2} (R - r) / \mu,$$

$$r = R: \quad \mu_t = \frac{\partial k}{\partial r} = 0, \quad \varepsilon_w = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 k}{\partial r^2} \right)_w.$$

Эмпирические константы модели $k - \varepsilon$ принимают стандартные значения: $c_\mu = 0.09$, $c_2 = 1.92$, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $A_\mu = 0.0165$, $A_t = 20.5$, $A_1 = 0.05$.

Что касается моделирования кинематики для расчета движения частиц в турбулентном двухфазном потоке, отсутствует единое представление о правильном подходе к данной проблеме [7]. Модель, основанная на концепции «траекторных частиц», считается некорректной из-за отсутствия учета влияния рейнольдсовых напряжений на частицу. С другой стороны, неоспоримы преимущества лагранжева подхода, более близкого к реальным процессам и позволяющего

получить необходимую информацию о траекториях частиц, времени нахождения частиц в аппарате, минимальном размере улавливаемых частиц [8 – 10]. По этой причине в настоящей статье для моделирования эффективности центробежного сепаратора используется лагранжев подход:

$$\begin{cases} \frac{dv_{pr}}{dt} = \frac{v_{p\varphi}^2}{r} + k(v_r - v_{pr}), \\ \frac{dv_{p\varphi}}{dt} = -\frac{v_{p\varphi}v_{pr}}{r} + k(v_\varphi - v_{p\varphi}). \end{cases} \quad (2)$$

В данной системе уравнений левая часть субстанциональная производная, а параметры с индексом p относятся к скоростям пылевых частиц. Воздействие газа на частицы пыли определяется параметром Стокса:

$$k = \frac{18\mu}{\rho^0 \delta^2}.$$

В данном выражении ρ^0 – плотность материала частиц пыли; δ – “эффективный» диаметр частиц.

Для численной реализации системы (1) проведена частичная параболизация, т.е. в правых частях пренебрегаются члены с производными по z . Вводится функция тока ψ , для которой удовлетворяются условия неразрывности:

$$v_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \varphi}, \quad v_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}. \quad (3)$$

Вводится также завихренность ζ

$$\zeta = \frac{\partial v_z}{\partial r} - \frac{\partial v_r}{\partial z}. \quad (4)$$

Далее из первых двух уравнений системы (1) исключим давление и, подставляя выражения (3) в (4), получим систему относительно новых переменных

$$\begin{cases} \rho v_z \frac{\partial \zeta}{\partial r} + \rho v_z \frac{\partial \zeta}{\partial z} - \frac{\rho v_r \zeta}{r} + 2\rho v_\varphi \frac{\partial v_\varphi}{r \partial z} = \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \mu_s \zeta) \right), \\ \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) = \zeta, \\ \rho v_r \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} + \rho v_z \frac{\partial v_\varphi}{\partial z} + \frac{\rho v_\varphi v_r}{r} = \frac{\partial r^2 \mu_s \left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r} \right)}{r^2 \partial r}, \\ \rho v_r \frac{\partial k}{\partial r} + \rho v_z \frac{\partial k}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_s}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + G - \rho \varepsilon, \\ \rho v_r \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} + \rho v_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\mu_s}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + c_1 f_1 \frac{\varepsilon}{k} G - c_2 f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{cases} \quad (5)$$

$$v_z = \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad v_r = -\frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial z},$$

$$c_1 = 1.44 - Ri, \quad \mu_s = \mu + \mu_t, \quad G = G_{zr} + G_\varphi,$$

$$Ri = G_\varphi / (G_{zr} + G_\varphi), \quad \mu_t = c_\mu f_\mu \rho k^2 / \varepsilon,$$

$$G_\varphi = \mu_s \left[\left(r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\varphi}{r} \right) \right)^2 - \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v_\varphi^2}{r} \right) \right], \quad G_{zr} = 2\mu_s \left[\left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v_r}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} \right)^2 \right],$$

$$f_\mu = (1 - \exp(-A_\mu R_R))^2 (1 + A_t / R_t), \quad f_1 = 1 + (A_1 / f_\mu)^3, \quad f_2 = 1 - \exp(-R_t^2),$$

$$R_t = \rho k^2 / \mu \varepsilon, \quad R_R = \rho k^{1/2} (R - r) / \mu,$$

$$r = R: \quad \mu_t = \frac{\partial k}{\partial r} = 0, \quad \varepsilon_w = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 k}{\partial r^2} \right)_w.$$

Таким образом, получена модель турбулентного потока – система уравнений (5).

На рис. 1 показана принципиальная схема лабораторного центробежного сепаратора. Как видно, сепаратор содержит цилиндрическую и конусную части.

Принцип работы данного устройства заключается в том, что в конце отводящей трубы 3 – 3 всасыванием воздуха создается зона разрежения. В результате этого во вход сепаратора поступает пылевоздушный поток, который проходит через тангенциальный завихритель, где поток закручивается. Закрученный поток после завихрителя поступает в коаксиальное пространство 1 – 1 в сечении $\xi=0$.

В данной области частицы пыли за счет центробежной силы смещаются к стенке внешнего цилиндра. В сечении $\xi=0.2$ начинается конусная часть пылеуловителя, где крупные частицы пыли по внутренней стенке конуса направляются вниз по инерции и в сечении $\xi=1$

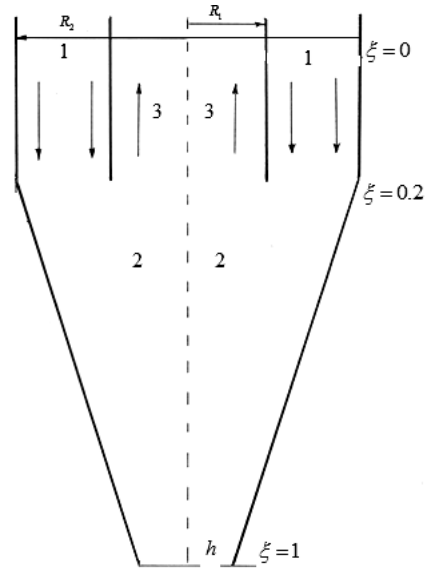


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторного сепаратора

попадают в герметичный бункер. А воздух направляется в отводящую трубу, т.е. в зону 3 – 3. Вместе с ним туда направляются и мелкие фракции порошка. Таким образом, установка позволяет разделить порошок на две фракции. Для экспериментального исследования характеристик сепаратора во вход в оборудование подавался порошок пыли, который увлекался воздухом внутрь устройства. В лабораторном стенде воздух после отводящей трубы поступал в рукавный фильтр, где улавливались мелкие фракции, не осевшие в центробежном сепараторе.

Для численной реализации системы (5) проведено преобразование координат

$$\xi = \frac{z}{L}, \quad \eta = \frac{r}{f(z)},$$

$$f(z) = R \quad \text{при } z < 0,$$

$$f(z) = R - \frac{R-h}{L} z \quad \text{при } 0 < z < L.$$

Для обеспечения устойчивости при численном решении системы (5) использовалась разностная схема против потока, а диффузионные члены аппроксимировались центральной разностью. Уравнение Пуассона для функции тока также аппроксимировалось центральной разностью и для его разрешения использовался метод итерации верхней релаксации. Что касается численной реализации уравнений движения частиц (2), использовался метод Эйлера с пересчетом. Поэтому данная система уравнений интегрировалась с точностью второго порядка. Параметры лабораторной установки сепаратора имели значения: $R_1=12$ см, $R_2=20$ см, $h=8$ см, $L=300$ см. Опыт проводился при следующих значениях параметров потока на входе в коаксиальный канал:

$V_{Oz}=4.1$ м/с, $V_{Or}=0$, а окружная скорость находилась из соотношения $rV_{O\varphi}=1.8$ м²/с. Безразмерный коэффициент взаимодействия между газом и сферической твердой частицей был равен

$$k = \frac{18\mu R_1}{\rho^0 \delta^2 V_z} = 2260.$$

На рис. 2 – 4 иллюстрируются профили скоростей воздуха в сечении $\zeta=0.5$. На этих рисунках все скорости безразмерные. Для этого скорости соотнесены к начальной аксиальной скорости V_{Oz} .

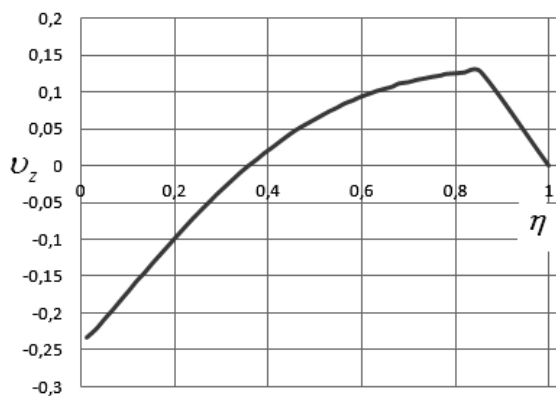


Рис. 2. Профиль безразмерной аксиальной скорости потока воздуха в сечении $\zeta=0.5$

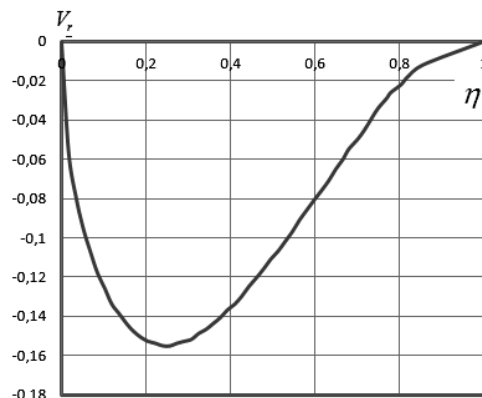


Рис. 3. Профиль безразмерной радиальной скорости потока воздуха в сечении $\zeta=0.5$

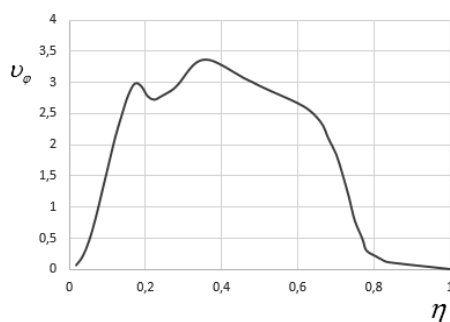


Рис. 4. Профиль безразмерной тангенциальной скорости потока воздуха в сечении $\zeta=0.5$

На рис. 5 показаны траектории пылевых частиц диаметрами $\delta=7$ мкм, $\delta=10$ мкм и $\delta=13$ мкм.

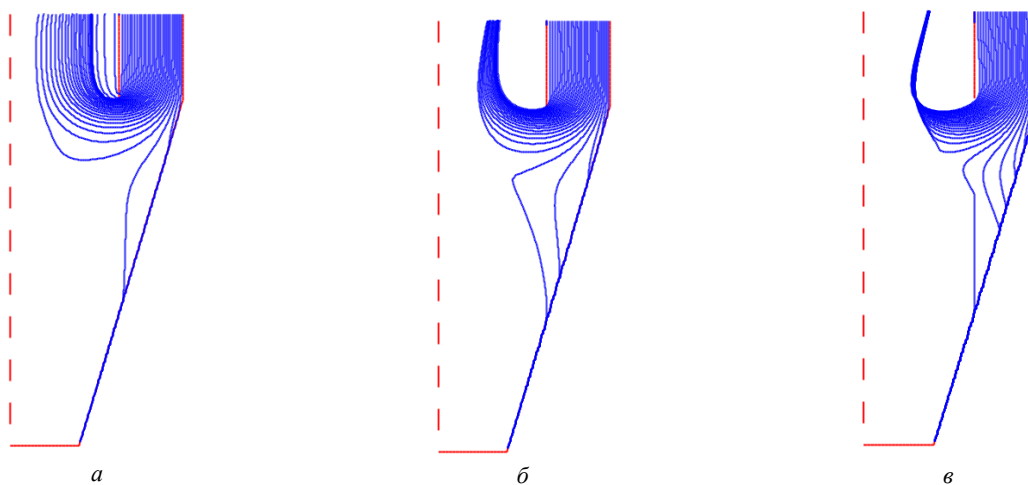


Рис. 5. Траектории частиц порошка в сепараторе: а – для частиц с диаметром $\delta=7$ мкм; б – для частиц с диаметром $\delta=10$ мкм; в – для частиц с диаметром $\delta=13$ мкм

Как установлено, примерно 10 % частиц диаметром $\delta=7$ мкм осаждаются в сепараторе, т.е. попадают в бункер.

Большой интерес представляет расчет эффективности сепаратора. Для этого во вход подавалась пыль, дисперсный анализ которой приведен на рис. 6.

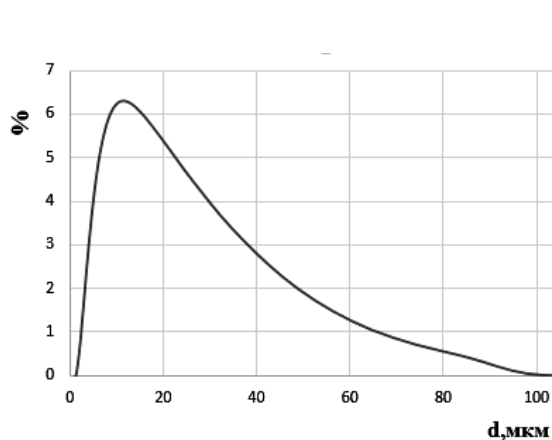


Рис. 6. Дисперсный анализ порошка, подаваемого в сепаратор

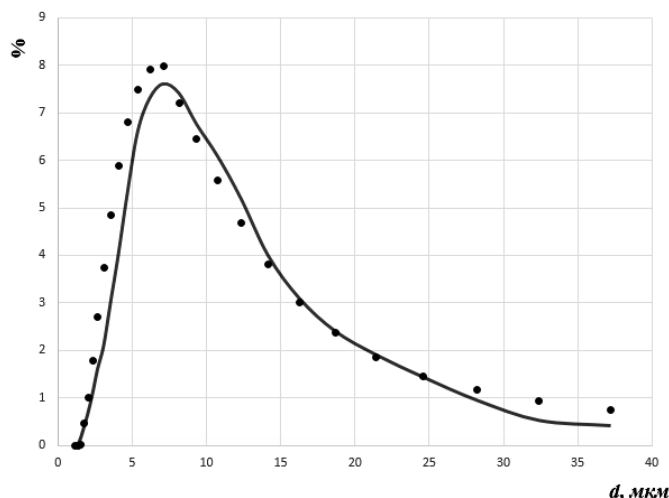


Рис. 7. Дисперсный анализ порошка из рукавного фильтра

Дисперсный анализ порошка проведен лазерным анализатором фирмы “Malvern”. Для сопоставления результатов численного расчета с опытными данными проведен дисперсный анализ пыли из рукавного фильтра, т.е. не уловленной пыли центробежным пылеуловителем. На рис. 7 представлен дисперсный состав пыли из рукавного фильтра по анализатору (точки) и по численному расчету вышеописанной модели (сплошная линия). Как установлено, совпадение расчетных результатов с данными анализатора удовлетворительное.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Spalart P.R., Allmaras S.R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows // 30th Aerospace Sciences meeting and exhibit. January 6-9. 1992. P. 1 – 23.
- [2] Spalart P.R., Shur, M.L. On the sensitization of turbulence models to rotational and curvature // Aerospace Science and Technology. Vol. 1. 1997. No. 5. P. 297 – 302.
- [3] Smirnov P., Menter F. Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart-Shur correction term // Proc. of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea and Air, GT 2008. Germany. Berlin. June 9 – 13. 2008. P. 297 – 302.
- [4] Sentyabov A.V., Gavrilov A.A., Dekterev A.A. Investigation of turbulence models for computation of swirling flows // Thermophysics and aeromechanics. Vol. 18:1. 2011. P. 73 – 85.
- [5] Новомлинский В.В., Стронгин М.П. Численное исследование закрученных одно- и двухфазных турбулентных потоков в цилиндрическом канале // Прикладная механика и техническая физика, 1988. №2. С. 51–58.
- [6] Василевский М.В., Зыков Е.Г. Расчет эффективности очистки газа в инерционных аппаратах. Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 86 с.
- [7] Шиляев М.И., Шиляев А.М. Моделирование процесса пылеулавливания в прямоточном циклоне. 1. Аэродинамика и коэффициент диффузии частиц в циклонной камере // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10. № 2. С. 157 – 170.
- [8] Шиляев М.И., Шиляев А.М. Моделирование процесса пылеулавливания в прямоточном циклоне. 2. Расчет фракционного коэффициента проскока // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10. № 3. С. 427 – 437.
- [9] Баранов Д.А., Кутепов А.М., Лагуткин М.Г. Расчет сепарационных процессов в гидроциклонах // Теоретические основы химической технологии. 1996. Т. 30. № 2. С. 117 – 122.
- [10] Ахмеев Т.Г., Порфирьева Р.Т., Гайсин Л.Г. Химическая технология неорганических веществ. Кн. 1. М.: Высшая школа, 2002. – 688 с.

З.М. Маликов, Ф.Х. Назаров, Д.П. Наврузов. Марказдан қочма чанг тутгич масалаларини $k-\varepsilon$ модели орқали сонли ечиши

Ушбу мақолада марказдан қочма чанг тутгичларни $k-\varepsilon$ модели орқали сонли ечиши усули ўрганилган. Сонли ечишда оқимга қарши ва итерация усуллари қўлланилган. Чанг заррачаларининг ҳаракатини ўрганиш учун Лагранж ёндашувидан фойдаланилган. Сонли усулда олинган натижалар тажрибада олинган натижалар билан таққосланган.

Z.M. Malikov, F.H. Nazarov, D.P. Navruzov. Numerical solutions of the model-based centrifugal dust collector

This article carries out a numerical study of the centrifugal dust collector-based model. For the numerical study used method against the flow and iteration. To study the motion of particles of the solid phase, the Lagrange approach was used. Numerical results were compared with experimental data.

УДК 539.3

К.Д. САЛЯМОВА, Х.Х. ТУРДИКУЛОВ

СТАТИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЫСОКОЙ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ С УЧЕТОМ ДАННЫХ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Проектирование высоких грунтовых плотин (Пскемская высотой 200 м), их строительство (Рогунская высотой 336 м) и эксплуатация (Нурекская высотой 300 м, Туполангская высотой 180 м, Чарвакская высотой 168 м, Гиссаракская высотой 138 м) создают повышенную опасность для нижних бьефов гидроузлов. При проектировании и строительстве такого рода плотин также требуется внимание к длительным процессам, происходящим в их теле и влияющим на качество строительства, что предусмотрено также нормами [1]. Всё это говорит о необходимости выполнения требований безопасности грунтовых плотин.

Натурные наблюдения за грунтовыми плотинами проводятся для анализа работоспособности сооружений. Сопоставлением расчётов – фильтрации, порового давления в материале ядра, осадки, смещения с натурными наблюдениями по этим параметрам в плотине оценивается качество возведения плотины.

Сопоставление результатов натурных наблюдений и проведенных расчетов позволяет усовершенствовать расчетную методику, вносить в нее изменения, а также составлять прогнозные модели для анализа поведения гидротехнического сооружения во времени.

Натурным наблюдениям за фильтрацией, поровым давлением, осадками и смещением плотины с ядром (высокими) в период строительства грунтовых плотин посвящены публикации исследователей бывшего Союза, в которых содержатся натурные данные об осадках в плотинах и поровом давлении. Среди них можно отметить работы Л.Н. Рассказова, Н.А. Анискина [2], М.Н. Леднева [3], В.П. Никитина [4].

Цель статьи – сопоставление результатов численного расчета напряженного состояния грунтовой плотины с ядром при основных нагрузках (силы гравитации, гидростатического давления) с данными натурных наблюдений по поровому давлению.

Рассматривается плоско-деформируемая модель (поперечное сечение) грунтовой плотины, находящейся на упругом основании. Сооружение изучается при статическом (собственный вес, гидростатическое давление воды) нагружении. Учитывается неоднородный состав грунта тела плотины (наличие ядра).

Для расчета такой модели используется численный метод конечных элементов, основанный на вариационном принципе возможных перемещений [5, 6].

В отсутствии гидростатики поверхность боковых откосов и гребень плотины свободны от нагрузок, тогда статические граничные условия на этих поверхностях представляются в виде

$$\sigma_{ij}n_j = 0,$$

где n – вектор нормали к поверхности.

Учет же гидростатики на поверхности верхового откоса плотины, находящейся в однородной несжимаемой жидкости водохранилища, сводится к заданию на поверхности откоса давления, линейно возрастающего с глубиной

$$p = \rho g z,$$

где z – глубина, отсчитываемая от свободной поверхности воды; g – ускорение свободного паде-

ния; ρ – плотность грунта.

Граничные условия на нижней границе основания – жесткие, что выражается в отсутствии здесь горизонтальных и вертикальных возможных перемещений:

$$y=0: \quad \delta u|_{y=0}=0, \quad \delta v|_{y=0}=0.$$

Для получения разрешающей системы уравнений в ходе конечно-элементной дискретизации элементы объединяются в узловых точках, перемещения которых являются решением вариационного уравнения, реализующим экстремум (минимум) функционала работы. Полученная при этом разрешающая система уравнений имеет вид

$$[K]\{u\}=[M]\{g\}+\{P\},$$

где $[K]$, $[M]$ – матрицы жесткости и массы всей модели, формирующиеся из матриц отдельных элементов; $\{u\}$ – искомый вектор узловых перемещений; g – ускорение свободного падения ($g=9.8\text{ м/с}^2$); вектор $\{P\}$ – вектор нагрузки, вызванной гидростатическим давлением на верховой откос.

В соответствии с разработанной методикой и алгоритмами решения задач численным методом по полученным в ходе решения системы перемещениям $\{u\}$ узловых точек модели определяются с использованием аппроксимирующих функций перемещения внутри каждого элемента, а затем деформации в элементах – при помощи уравнений Коши [4, 5].

В ходе решения системы линейных алгебраических уравнений методом Гаусса определяется вектор узловых перемещений $\{u\}$, затем по ним деформации и, наконец, компоненты напряжений в элементах модели плотины и основания.

При расчетах принимались следующие размеры Чарвакской грунтовой плотины (створ 6): высота – 131 м; коэффициенты заложения откосов – 2.2, ядра – 0.2. Физико-механические параметры грунта призм $E=60\text{ МПа}$, объемный вес $\gamma_{\text{сух}}=1950\text{ кг/м}^3$, $\gamma_{\text{нас}}=2230\text{ кг/м}^3$; коэффициент Пуассона $\mu=0.3$. Параметры грунта ядра: $E=30\text{ МПа}$, объемный вес $\gamma_{\text{сух}}=1760\text{ кг/м}^3$, $\gamma_{\text{нас}}=2110\text{ кг/м}^3$, коэффициент Пуассона $\mu=0.3$, коэффициенты наклона – 0.2.

Полученные горизонтальные и вертикальные перемещения плотины указывают, что сооружение под собственным весом сплющивается (гребень опускается, откосы выпучиваются), о чем свидетельствуют значительные вертикальные перемещения гребня и различные знаки горизонтальных перемещений левой и правой частей сооружения. Причем, в основном, такая деформация (горизонтальное растяжение) наблюдается в верхней трети сооружения, что может привести здесь к потере прочности.

Высокие каменно-земляные плотины строятся с суглинистым ядром, содержащим поры в глинистом грунте, поэтому следует учитывать поровое давление, возникающее при наполнении водохранилища и эксплуатации гидросооружения. Поровое давление рассчитывается различными методами, а также с учетом и без учета консолидации грунта. При расчете был рассмотрен створ 6 плотины, в связи с тем, что там во время строительства установлены КИА – грунтодинамометры (ГД), пьезодинамометры (ПД) (рис. 1).

Расчет плотины, являющейся частью гидротехнического узла, необходимо производить с учетом влияния гидростатического давления на верховой откос. Давление P действует по нормали к поверхности верхового откоса, определяется функцией, линейно-

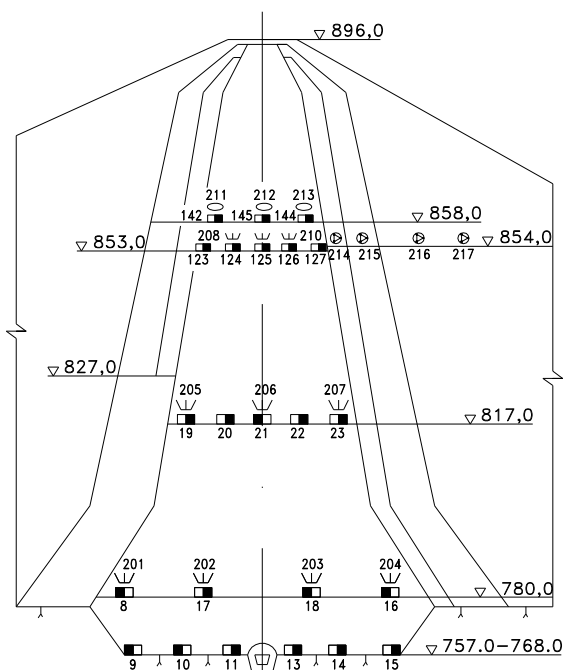


Рис. 1. Уровни расположения грунтовых динамометров и пьезодинамометров в ядре плотины: ■ – пьезодинамометр; ▽ – розетка грунтового динамометра; ⊗ – ДКН (динамометр каменной наброски); ○ – ЭДНГ (эластичный грунтовой динамометр напряжений)

изменяющейся с глубиной h , и представлено формулой $P=\gamma h$, где γ – удельный вес воды.

Расчетные компоненты напряженного состояния – нормальные горизонтальные, вертикальные напряжения в теле плотины, находящейся под собственным весом и гидростатики при наполнении 125 м, показаны на рис. 2 и 4, а на рис. 3 и 5 показания грунтового динамометра (ГД), пьезодинамометра (ПД – поровое давление) от времени эксплуатации.

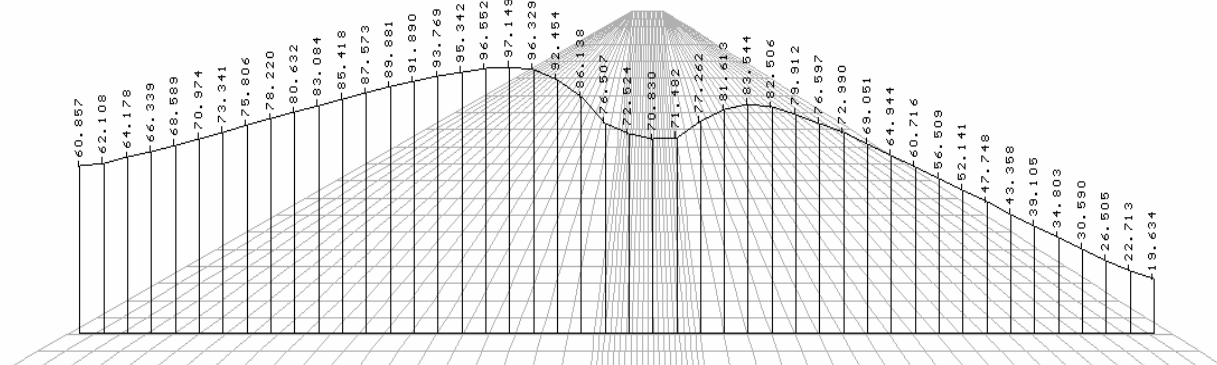


Рис. 2. Расчетные эпюры горизонтальных напряжений σ_x (т/м²) на отметке уровня воды 780.0

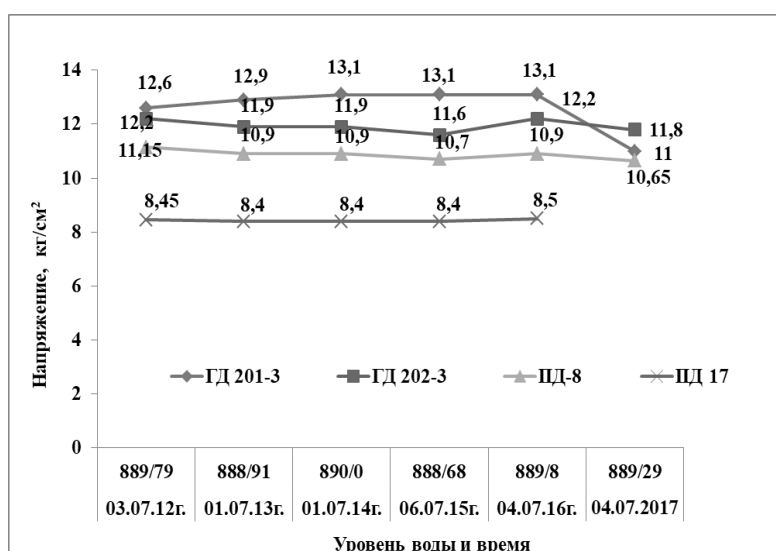


Рис. 3. Показания КИА -горизонтальных напряжений σ_x (т/м²) на отметке уровня воды 780.0 в зависимости от срока эксплуатации

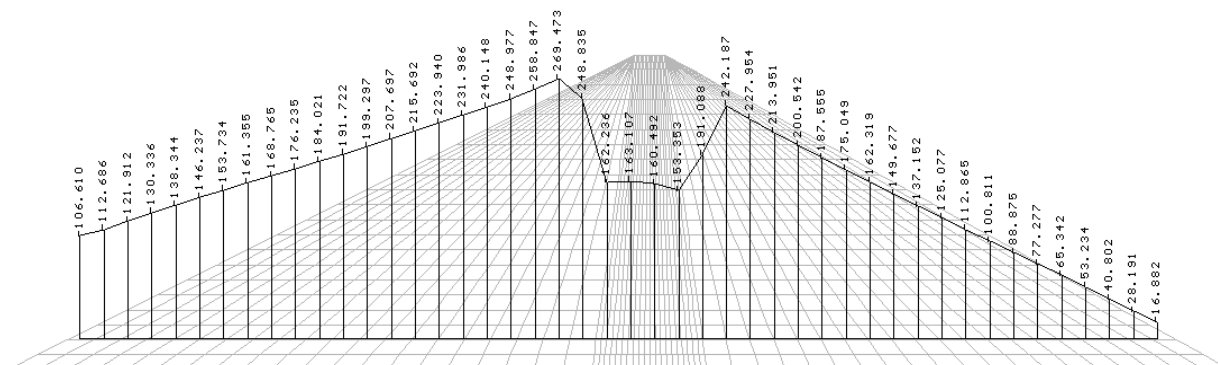


Рис. 4. Расчетные эпюры вертикальных напряжений σ_y (т/м²) на отметке уровня воды 780.0

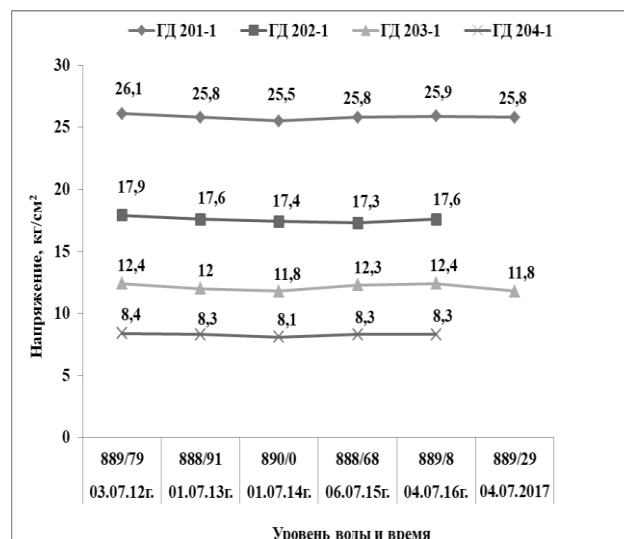


Рис. 5. Данные натурных наблюдений горизонтальных напряжений σ_x (т/м²) на отметке уровня воды 780.0 в зависимости от срока эксплуатации

Сопоставление численных результатов и натурных данных позволило сформулировать следующие выводы:

- понижение порового давления по времени отмечается на отметке 780.0 м (приборы № 8, 16, 17, 18), а также в основании вблизи потерны со стороны нижнего бьефа (прибор № 13);
- на отметке 817.0 м понижение порового давления ощущается со стороны нижнего бьефа (приборы № 22, 23);
- на отметке 853.0 м со стороны нижнего бьефа поровое давление не изменяется во времени, также как и на отметке 858.0 м;
- увеличение во времени порового давления ощущается в основании плотины вблизи ядра со стороны верхнего бьефа и на отметках 817.0 и 853.0 м также со стороны верхнего бьефа.

Все это доказывает, что остаточное поровое давление присутствует на этих отметках и образует ядро порового давления, а процесс консолидации происходит на отметке 780.0 м, которая, как заметно на рис.3,4, находится практически в основании плотины, но выше основания ядра. Следовательно, на этой отметке происходит максимальное давление от ядра плотины, упорных призм и соответственно напора в водохранилище.

Следовательно, в глинистом ядре каменно-земляной плотины Чарвакской ГЭС рассеивание порового давления происходит очень медленно, что может способствовать формированию в теле плотины неблагоприятного напряженно-деформированного состояния, изменяющегося по времени. По мере рассеивания порового давления могут ухудшаться условия фильтрации воды в отдельных зонах ядра и на контакте ядра с основанием плотины.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] КМК 2.06.05-98 Плотины из грунтовых материалов. Ташкент: Госархитекстрой, 1998. – 68 с.
- [2] А н и с к и н Н. А. Фильтрация и поровое давление в ядре каменно-земляной плотины / Рассказов Л.Н., Ядгоров Ё.Х. // Гидротехническое строительство. 2016. № 6. С. 16 – 22.
- [3] Л е д н е в М. А. Результаты натурных наблюдений за напряженно-деформируемым состоянием плотины Чарвакской ГЭС в строительный период / Леднев М.А., Шашкова Э.Г., Сатановский С.Г. // Тезисы докладов и сообщений «3-е Науч.-техн. совещ. гидропроекта по подведению итогов научн.исслед. работ в обл.энерг. и водохоз. Стр-ва за девятую пятилетку и рассмотрению задач десятой пятилетки». 1976. Ч. 1. М., 1976. С. 112 – 114.
- [4] Н и к и т и н В. М. Долгосрочный прогноз осадок каменно-набросных плотин // Труды ТИИМСХ. Вып. 55. 1973. С. 118 – 121.
- [5] З е н к е в и ч О. К. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. – 542 с.
- [6] С а л я м о в а К. Д., Р у м и Д. Ф. Трансформация напряженно-деформированного состояния основания сооружения при неравномерном увлажнении грунта // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. № 5. С. 94 – 99.

К.Д. Салымова, Ҳ.Х. Турдикулов. Табиий кузатиш натижаларини ҳисобга олган ҳолда грунтли баланд тўғонларни статик кучланганлик ҳолати

Юқори қияликларда ўзининг оғирлиги ва гидростатик босим таъсирида қўп жинслилигини ҳисобга олган ҳолда грунтли тўғонни (Чорбоғ ГЭС мисолида) текис кучланиш ҳолатини статик ҳисоблаш модели ишлаб чиқилган. Вақт бўйича грунтли Чорбоғ тўғони ядросидаги ғовақлардаги босимни ўзгариши деярли ўзгармайдиган ҳолатга келганлигини, лекин кучланганлик деформация ҳолатига таъсири борлигини қўришимиз мумкин.

K.D. Salyamova, Kh.Kh. Turdikulov. Static stress state of the high earth dams with account of the data of the field observations

On the basis of the developed system of applied programs, a static calculation of plane models of earth dams on a rigid and yielding base has been carried out, taking into account the structural inhomogeneity under its own weight and hydrostatic pressure on the upstream slope. It was revealed that the pore pressure dispersion in the clay core of the stone-earth dam of the Charvak hydroelectric power plant occurs very slowly, which can contribute to the formation of an unfavorable stress-strain state in the dam body, changing over time.

УДК 631.358:633.51

А.А. ШЕРМУХАМЕДОВ, Г.К. АННАКУЛОВА, Б.Ж. АСТАНОВ

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ НАВЕСНОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО УНИВЕРСАЛЬНО-ПРОПАШНОГО ТРАКТОРА

Исходя из потребностей сельскохозяйственного производства промышленностью разрабатываются более мощные, энергонасыщенные и высокопроизводительные универсально-пропашные тракторы, способные эффективно работать с навесными сельскохозяйственными машинами и орудиями, отличающимися увеличенной шириной захвата и весом. На тракторах для соединения рабочей машины и орудий применяют трехточечную гидронавесную систему, управляемую с раздельно-агрегатным гидравлическим приводом [1].

Гидравлическая навесная система (ГНС) служит для сцепления сельскохозяйственных машин и орудий на тракторе, а также для приведения их в различные (рабочее, транспортное и разгруженное) положения. Современные энергонасыщенные универсально-пропашные тракторы оснащаются высокопроизводительными сельскохозяйственными машинами крупных габаритов и масс. В связи с этим ГНС должна иметь достаточную подъемную мощность.

Непосредственную роль в создании этой силы подъема играет ГНС за счет изменения давления. С целью определения давления, обеспечивающего требуемую подъемную силу, была разработана математическая модель кинематического и динамического расчета ГНС [2]. С помощью математической модели, применяя метод замкнутых векторов, рассмотрена кинематика ГНС энергонасыщенного трактора, состоящая из плоского рычажного семизвенного механизма с вращающимися кинематическими парами звеньев, который управляется силовым гидроцилиндром гидропривода трактора. Полученные на основе кинематического и динамического расчетов зависимости изменения движущей силы и силы сопротивления [2] целесообразно сопоставить с результатами экспериментальных исследований [3].

Расчет ГНС производится следующим образом. Предположим, что звеном приведения является шток гидроцилиндра (рис.1), т.е. звено $l_2=l_2(t)$. Тогда динамика гидроцилиндра описывается следующей системой дифференциальных уравнений [2]:

$$\begin{cases} \frac{d(m_{np}v_2^2/2 + j_{np}\omega_2^2/2)}{dl_2} = P_d - k_\theta v_2 - P_{тр} \operatorname{sign} v_2 - P_c, \\ \frac{dp_1}{dt} = \frac{E_c(Q_1 - v_2 F_1)}{V_{01} + l_2 F_1}, \\ \frac{dp_2}{dt} = \frac{E_c(v_2 F_2 - Q_2)}{V_{02} + (l_{max} - l_2) F_2}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $m_{np} = \sum_{i=2}^n m_i (v_i / v_2)^2 + j_i (\omega_i / v_2)^2$; $j_{np} = \sum_{i=2}^n m_i (v_i / \omega_2)^2 + j_i (\omega_i / \omega_2)^2$; $P_d = p_1 F_1 - p_2 F_2$;

$$P_c = \sum_{i=2}^n P_i v_i \cos \varphi_i / v_2 + M_i \omega_i / v_2,$$

где m_{np} , j_{np} – приведенные к штоку гидроцилиндра массы и моменты инерции перемещающихся частей; l_2 , v_2 , ω_2 – перемещение, скорость и угловая скорость гидроцилиндра; k_s – коэффициент вязкого трения; $P_{тр}$ – коэффициент сухого трения; P_d – движущая сила, действующая на поршень гидроцилиндра; P_c – приведенные к штоку гидроцилиндра силы сопротивления; p_1 , p_2 – давления в напорной и сливной полостях гидроцилиндра; F_1 , F_2 – эффективные площади в напорной и сливной полостях; V_{01} , V_{02} – начальный объем жидкости в напорной и сливной полостях; m_i – масса i -го звена; j_i – момент инерции i -го звена относительно оси, проходящей через центр масс; v_i – скорость центра тяжести i -го звена; ω_i – угловая скорость i -го звена; P_i , M_i – величины активных сил и моментов, действующих на звенья; φ_i – угол между направлениями сил P_i и скоростью v_i ; l_i – длина i -го звена.

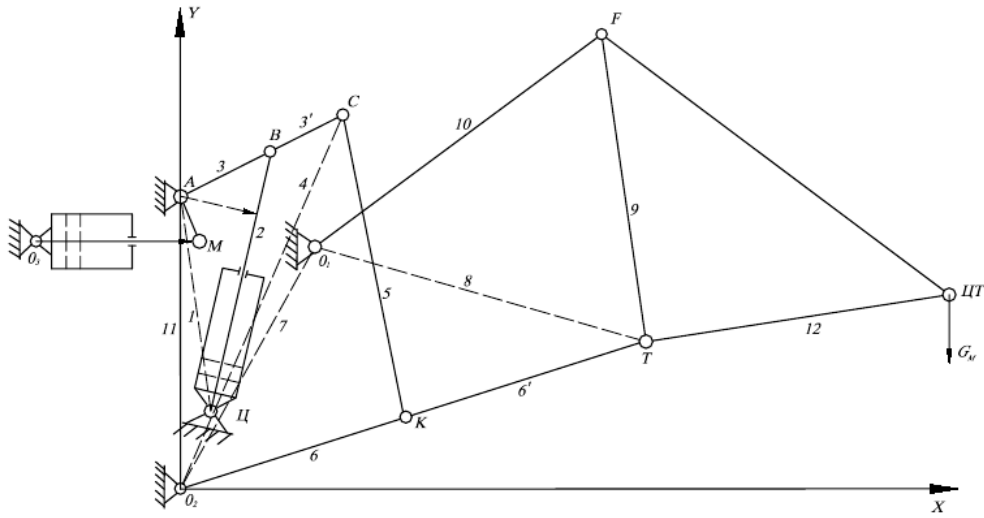


Рис. 1. Кинематическая схема ГНС: 1, 4, 7, 8 – искусственно-введенные звенья рычажного механизма ГНС; 2, 3, 5, 6, 9, 10, 12 – звенья рычажного механизма ГНС; G_m – вес груза

Координаты центра масс рассматриваемого устройства определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} x_u &= \sum G_i x_i / \sum G_i \\ y_u &= \sum G_i y_i / \sum G_i \\ i &= 2 \dots 12 \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

Скорости и моменты инерции звеньев определяются по формулам [3]

$$v_i = l_i \omega_i / 2, \quad (3)$$

$$j_i = m_i [(x_u - x_{iu})^2 + (y_u - y_{iu})^2], \quad i = 2, \dots, 12, \quad (4)$$

где x_{iu} , y_{iu} – координаты центра тяжести i -го звена.

Для исследования движения жидкости в трубопроводе выбрана модель, где жидкость принимается сжимаемой и сосредоточенной в одном или двух объемах малой протяженности (система с сосредоточенными параметрами с учетом податливости элементов гидросистемы). В данной модели имеется возможность учета сжимаемости пузырьков нерастворенного воздуха [3]:

$$\rho l \frac{d^2 x}{dt^2} + 27.5 \frac{l \mu}{f} \frac{dx}{dt} + (0.443 \frac{k_s \mu}{\sqrt{f}} + 0.5 \zeta \rho) \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 \text{sign} \frac{dx}{dt} + p_{вх} = p_{вх}, \quad (5)$$

$$\frac{dp}{dt} = \left(\frac{E_{ж} \delta_T E_T}{E_T \delta_T + d_T E_{ж}} \right) \frac{(Q_{вх} - Q_{вых})}{V_{ж}}, \quad (6)$$

где $\text{sign} \frac{dx}{dt} = \begin{cases} 1 & v > 0 \\ -1 & v < 0 \end{cases}$; $p_{вх}$, $Q_{вх}$ – давление и расход жидкости при входе в трубопровод; $p_{вых}$,

$Q_{вых}$ – давление и расход жидкости при выходе из трубопровода; t – время; ρ и $E_{ж}$ – плотность модуля объемной упругости жидкости; d_T , δ_T , E_T – соответственно диаметр, толщина стенки и модуль упругости материала трубопровода; k_{ε} – коэффициент аппроксимации, значение которого зависит от относительной шероховатости ε гидравлических магистралей; ζ – коэффициент местного сопротивления; f и l – площадь и длина трубопровода; $V_{ж}$ – объем жидкости в участке трубопровода; μ – динамическая вязкость жидкости.

Расход через распределитель определяется зависимостью [4]:

$$Q_p = \eta_p f_p(y) \sqrt{2|p_n - p_{вх}|/\rho}, \quad (7)$$

где p_n – давление, создаваемое насосом; $f_p(y)$ – площадь проходного сечения; η_p – коэффициент расхода.

Площадь проходного сечения распределителя можно аппроксимировать следующей характеристикой [4]:

$$f_p(y) = \begin{cases} 0, & \text{in } t < \tau \\ \pi d_y^2 (t - \tau) / (4(t_k - t)), & \text{in } \tau \leq t \leq t_k, \\ \pi d_y^2 / 4, & \text{in } t > t_k \end{cases}$$

где d_y – условный проход; τ – время запаздывания; t_k – время полного открытия прохода.

При расчете приняты следующие значения звеньев и исходные данные: $l_1=0.415$ м, $l_2=0.447$ м, $l_3=0.2$ м, $l_{3'}=0.158$ м, $l_{31}=0.358$ м, $l_5=0.599$ м, $l_6=0.49$ м, $l_{6'}=0.5$ м, $l_{61}=0.99$ м, $l_7=0.558$ м, $l_9=0.61$ м, $l_{10}=0.711$ м, $l_{11}=0.574$ м, $l_{12}=1.22$ м, $m_2=14.2$ кг, $m_3=6.98$ кг, $m_5=6.84$ кг, $m_6=19.1$ кг, $m_9=1.52$ кг, $m_{10}=2.14$ кг, $m_{12}=3028.9$ кг, $P_2=142$ Н, $P_3=69.8$ Н, $P_5=68.4$ Н, $P_6=191$ Н, $P_9=15.2$ Н, $P_{10}=21.4$ Н, $P_{12}=30289$ Н, $t=0$, $\tau=0.2$, $t_k=2$, $p_n=12$ МПа, $F_1=0.005\text{м}^2$, $F_2=0.003\text{м}^2$, $p_{вх}=Q_{вх}=p_{вых}=Q_{вых}=l_2=v_2=\omega_2=p_1=p_2=0$.

На рис. 2, а представлены результаты расчета зависимости изменения давления в гидроцилиндре при подъеме груза весом $m=10$ кН, полученные по компьютерной программе на алгоритмическом языке DELPHI.

ГНС трактора управляется силовым цилиндром, сообщенным с гидроприводом трактора. Подъемная сила ГНС рассчитывается путем последовательного определения усилий и моментов пары сил в шарнирах звеньев при заданной нагрузке, расположенной в условной точке (ЦТ) кинематической схемы механизма (см. рис. 1).

Поскольку результаты имеют вид переходного процесса, их оценка осуществляется по следующим параметрам, определенным экспериментально[5]:

- время срабатывания $t_{вс}$;
- время переходного процесса t_{enn} ;
- величина перерегулирования давления $P_{\max}$.

На рис. 2 представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований ГНС при различных значениях нагрузки от 10 до 30 кН.

Разница между динамическим расчетным и экспериментальным временем срабатывания (после достижения номинального давления) определяется по формуле [6]

$$\Delta t_{в.с.} = \frac{t_{в.с.}^3}{t_{в.с.}^m} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где $t_{в.с.}^3$ – время срабатывания, определенное экспериментально; $t_{в.с.}^m$ – время срабатывания, определенное расчетным путем.

Разница времени переходного процесса определяется по формуле

$$\Delta t_{enn} = \frac{t_{enn}^{\partial}}{t_{enn}^m} \cdot 100\%, \quad (9)$$

где t_{enn}^{∂} – время переходного процесса, определенное экспериментально; t_{enn}^m – время переходного процесса, определенное при теоретическом расчете.

Разница между величиной перегулирования давления при теоретическом расчете и экспериментальными данными определяется следующим образом:

$$\Delta P_{\max} = \frac{P_{\max}^{\partial}}{P_{\max}^m} \cdot 100\%, \quad (10)$$

где $P_{\max}^{\partial}$ – разница между номинальным и максимальным давлением, полученная из графика в результате экспериментальных исследований; $P_{\max}^m$ – разница между номинальным и максимальным давлением, полученная из графика в результате теоретического расчета.

Проведение экспериментальных исследований энергонасыщенного универсально-пропашного трактора, а также теоретические расчеты исследования проводились при различных значениях нагрузок на ГНС. На основе полученных экспериментальных и теоретических расчетов установлено, что при нагрузке гидравлической навесной системы с массой 1000 кг время срабатывания $t_{с.с.}^m = 0.65$ с, $t_{с.с.}^{\partial} = 0.6$ с, взаимная адекватность составляет 8 %. Время переходного процесса $t_{enn}^m = 1.33$ с, $t_{enn}^{\partial} = 1.45$ с, взаимная адекватность составляет 8 %. Величина перегулирования давления в ГНС $P_{\max}^m = 6.5$ МПа, $P_{\max}^{\partial} = 6.69$ МПа, адекватность результатов – 3.1 % (рис. 2, в).

В таблице представлены результаты сравнения теоретических и экспериментальных исследований ГНС при различных значениях нагрузки $m = 10 - 30$ кН.

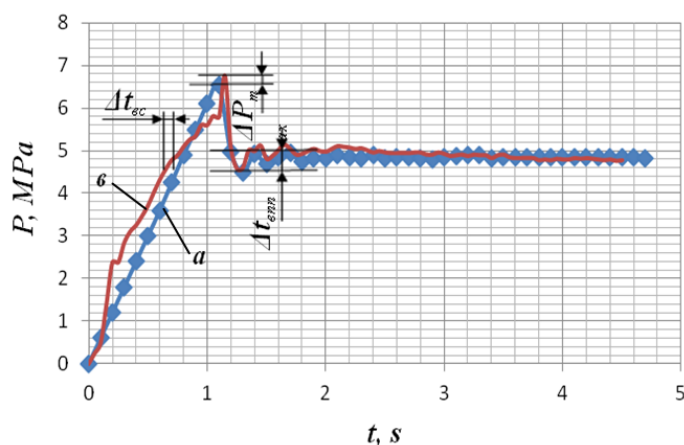


Рис. 2. Зависимость изменения давления в гидроцилиндре при подъеме груза весом $m = 10$ кН: а – теоретический расчет; в – экспериментальный

Результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных

Показатель	Результаты	Нагрузка на ГНС, кН				
		10	15	20	25	30
Время срабатывания $t_{с.с.}$	Расчетное, с	0.65	0.75	0.72	1.2	1.65
	Экспериментальное, с	0.6	0.8	0.65	1.3	1.75
	Разница, %	8	6.6	10	8	6
Время переходного процесса t_{enn}	Расчетное, с	1.33	1.63	1.35	2.2	2.65
	Экспериментальное, с	1.45	1.78	1.53	2.05	2.45
	Разница, %	8	9	9	7	8
Величина перегулирования давления $P_{\max}$	Расчетная, МПа	6.5	10	13.5	16.6	18.3
	Экспериментальная, МПа	6.69	10.5	14.1	16.1	17.5
	Разница, %	3.1	8	3.5	6	4.4

Таким образом, сравнительная разница результатов теоретических и экспериментальных данных по времени срабатывания в среднем составляет 7.72 %, по времени переходного процесса – 8.2 %, по величине перерегулирования давления – 5 %.

На основе анализа результатов теоретических и экспериментальных исследований можно сделать вывод о том, что предложенная математическая модель адекватно описывает реальные процессы в ГНС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ахметов А.А. Универсально-пропашные тракторы для междурядной обработки посевов хлопчатника. Ташкент: Фан, 2017. – 240 с.
- [2] Шермухамедов А.А., Астанов Б.Ж. Компьютерная программа кинематического и динамического расчета задней навесной системы энергонасыщенного трактора. Удостоверение UZDGU № 06003 от 24 января 2019.
- [3] Shermukhamedov A.A., Annakulova G.K., Astanov B.J., Umarova D.F. Definition of kinematic and dynamic parameters of hydro-hinged system of a tractor of high load-carrying capacity // European sciences review. Scientific journal. Vienna Prague. 2017. № 9 – 10. P. 64 – 71.
- [4] Метлюк Н.Ф., Автушко В.П. Динамика пневматических и гидравлических приводов автомобилей. М.: Машиностроение, 1980. – 231 с.
- [5] Шермухамедов А.А., Аннакулова Г.К., Астанов Б.Ж. Анализ теоретических и экспериментальных результатов гидравлической навесной системы энергонасыщенного универсально-пропашного трактора // European Research. Сборник статей XX Международной научно-практической конференции. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2019. С. 66 – 69.
- [6] Попов Д.Н. Динамика и регулирование гидро- и пневмосистем. М.: Машиностроение, 1987. – 464 с.

Институт механики и сейсмостойкости сооружений
им. М.Т. Уразбаева АН РУз

Дата поступления
17.04.2019

А.А. Шермухамедов, Г.К. Аннакулова, Б.Ж. Астанов. Юқори энергияли универсал чопиқ трактори гидравлик осма тизимининг динамик ҳисоби ва экспериментал натижалари таҳлили

Мақолада юқори энергияли универсал-чопиқ трактори гидравлик осма тизими турли хил юкланишлар жараёнида гидрацилиндр босими ўзгаришини аниқлашнинг назарий ҳисоб ва эксперимент натижалари келтирилган. Назарий ва экспериментал натижаларни солиштириши, уларнинг ўзаро адекватлигини кўрсатди.

A.A. Shermukhamedov, G.K. Annakulova, B.J. Astanov. Analysis of dynamic calculation and experimental results of the hydraulic hinged system of energy-saturated universal plough tractor

The article presents the results of theoretical calculation and experiments to determine the pressure change in a hydraulic cylinder under various loads of a hydraulic hinged system of energy-saturated universal plough tractor. Comparison of theoretical and experimental results has shown their adequacy.

УДК 678.7;677.051.21

О.Х. ЭШКАБИЛОВ, Г. ГУЛЯМОВ, Н.С. АБЕД, С.С. НЕГМАТОВ, М.Н. ТУХТАШЕВА

УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ СВОЙСТВ АНТИСТАТИЧЕСКИ-ТЕПЛОПРОВОДЯЩИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С ХЛОПКОМ-СЫРЦОМ

В экономике Узбекистана важное место занимает хлопок-сырец. Поэтому повышение эффективности хлопководства за счет комплексной механизации всех процессов, начиная от уборки хлопка и заканчивая его переработкой, улучшение работоспособности и производительности используемых машин и механизмов – главная технико-экономическая задача, стоящая перед учеными-конструкторами республики.

Одним из возможных способов решения этой задачи является внедрение новых композиционных металло-полимерных материалов и покрытий на их основе с заранее заданными антифрикционно-износостойкими антистатически-теплопроводящими свойствами в деталях трущихся пар рабочих органов машин и механизмов – передвижных перегружателей хлопка, разборщиках бунтов хлопка и туннелеройных машинах, предназначенных для транспортировки, разборки бунтов, рывья туннелей и переработки хлопка-сырца, используемых на хлопкоочистительных заводах и имеющих идентичные зачерпывающие элементы в виде колковых деталей, изготовленных

из стали и дорогостоящих цветных металлов.

Это не только позволит повысить качество хлопковых волокон и семян за счет сохранения их природных свойств в процессе их транспортировки и переработки хлопка-сырца, но и обеспечит значительное повышение надежности и долговечности деталей рабочих органов за счет снижения сил трения пары полимер – хлопок. При этом механическая повреждаемость хлопка-сырца значительно уменьшается как за счет снижения шероховатости поверхностей рабочих органов, так и из-за высокой эластичности и демпфирующих свойств полимерных материалов. Кроме того, также сэкономит материальные и трудовые затраты за счет ликвидации ряда технологических операций на механическую обработку поверхностей деталей трущихся пар рабочих органов. Все это, в конечном итоге, принесет для экономики Республики Узбекистан большой экономический эффект.

Трение конструкционных материалов, взаимодействующих с хлопком-сырцом, отличается многообразием и сложностью одновременно протекающих процессов. Поэтому многие исследователи, исходя из сложности задачи, моделировали трение с хлопком-сырцом на различных установках. Нами разработаны установка и метод определения антифрикционных свойств – силы трения, температуры и величины электростатического заряда машиностроительных композиционных антистатически-теплопроводящих полимерных материалов при взаимодействии с хлопком-сырцом, которые определялись на дисковом трибометре [1 – 3], работающем в диапазоне давлений от 0.001 до 0.05 МПа и скоростей от 0.5 до 10 м/с.

Сущность метода состоит в том, что трение волокнистого материала осуществляется о плоскую поверхность вращающегося дискового образца из исследуемого материала при ряде заданных значений давлений прижима P и скоростей скольжения V . Значения сил трения, температур и величин электростатических зарядов испытуемого образца измеряются в зоне трения с хлопком-сырцом. После обработки результатов измерений можно судить о диапазоне допустимых значений P , V и определить условия работоспособности испытуемого материала.

Дисковый трибометр. Принципиальная схема дискового трибометра для определения силы трения между конструкционным, полимерным и композитным материалом и хлопком-сырцом, температуры и величины заряда статического электричества в зоне трения приведена на рис. 1, на рис. 2 – его общий вид.

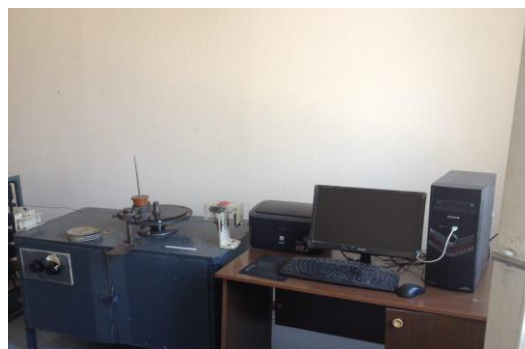
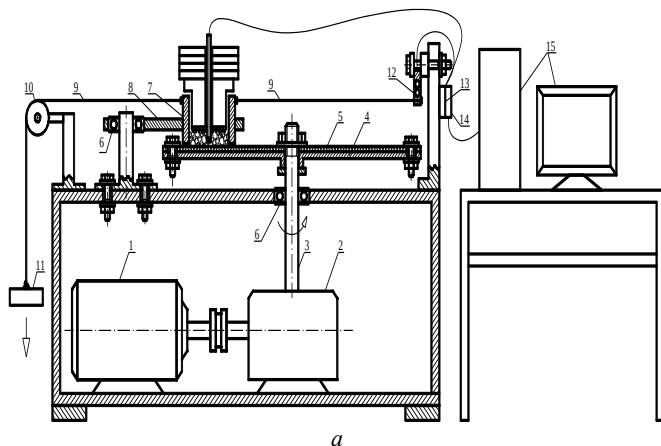


Рис. 1. Принципиальная схема дискового трибометра (а) и его общий вид (б): 1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – вертикальный вал; 4 – диск; 5 – образец с полимерным покрытием или композиционным материалом; 6 – шарикоподшипник; 7 – поршень; 8 – цилиндрический короб; 9 – трос; 10 – блок; 11 – чаша для нагрузки; 12 – измерительная балочка; 13 – АСП конвертор; 14 – микроконтроллер; 15 – компьютер

Дисковый трибометр работает следующим образом. От электродвигателя 1 и редуктора 2 приводится в движение вертикальный вал 3 с установленным на нем горизонтальным диском 4. На диске располагают образец 5 из испытуемого материала. Для предотвращения осевого и радиального биения вал диска установлен на двух радиальных и на одном упорном подшипнике 6. Поршень 7 вставляется в цилиндрический короб 8 с уложенным хлопком-сырцом, расположенный на восьми радиальных шарикоподшипниках 6, передвигается в продольном направлении. Применение радиальных шарикоподшипников уменьшает силу трения между боковыми стенками короба и направляющей рамой.

Направляющая рама может при необходимости перемещаться вертикально. С внутренней стороны стенки имеется четыре вертикальных канала, заполненных шариками.

К коробу с двух сторон прикреплены тросики 9. Один из них переброшен через блок 10 к чаше 11 и служит для тарировочного нагружения. Другой тросик также соединен с коробом, а второй конец его – с измерительной балочкой, на которой наклеены тензометрические датчики 12.

В комплексе дискового трибометра для усиления метрических сигналов, получаемых от тензометрических датчиков, и их записи имеются АСП конвертор 13, микроконтроллер 14 и компьютер 15.

Методика определения коэффициента трения композиционных антистатически-теплопроводящих полимерных материалов при взаимодействии с хлопком-сырцом. Внутри цилиндрического короба закладывается хлопок-сырец, а сверху – поршень с грузами. При вращении диска образец – композиционный полимерный материал увлекает за собой цилиндрический короб с образцом хлопка-сырца и тем самым натягивает трос, который, в свою очередь, изгибает балку с тензометрическими датчиками. Механическая деформация балочки с помощью тензометрических датчиков преобразуется в электрические колебания. Эти колебания усиливаются усилителем и сигналы записываются на экране монитора [4].

После нахождения силы трения коэффициент трения между композиционным полимерным материалом и хлопком-сырцом рассчитывался по известной формуле

$$f = \Sigma f_i / n, \quad (1)$$

где $f_i = F/N$; F – сила трения, Н; N – нормальная сила, действующая на трущиеся пары, Н; n – число произведенных опытов.

Точность измерения дискового трибометра составляет 0.5 – 1.5 %. Предел допустимой погрешности измерения силы трения контактирующих поверхностей, температуры, возникающей в зоне трения, и величины электростатического заряда от измеряемого значения во всем диапазоне скоростей скольжения и создаваемых давлений составляет ± 5.0 .

Образец исследуемого материала (рис. 2) должен быть электрически изолирован от станины испытательного прибора, сопротивление изоляции должно быть не менее 10 МОм, электрическая прочность должна быть не менее 30000 В·см⁻¹.

Зазор между испытываемым образцом и коробом должен быть не более 1 мм. Образец исследуемого материала [3] изготавливают в соответствии с рис. 2

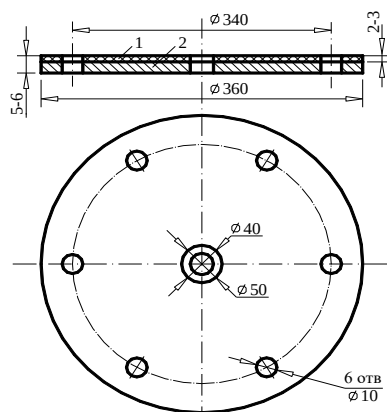


Рис. 2. Образец исследуемого материала:
1 – стальной диск; 2 – испытуемое покрытие или композиционный материал

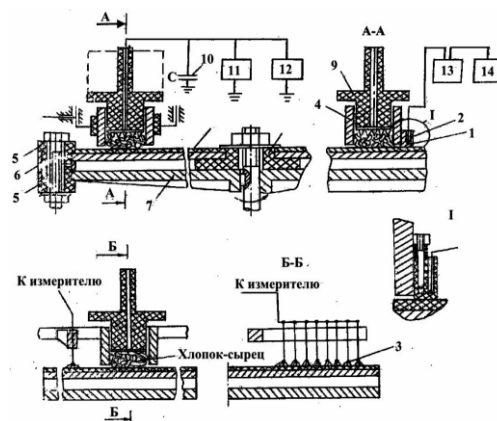


Рис. 3. Установка для измерения электростатического заряда и температуры в зоне трения: 1 – углеграфитовый электрод; 2 – термопара; 3 – щетка; 4 – игольчатый электрод; 5 – втулка; 6 – прокладка; 7 – диск; 8 – образец с полимерным покрытием; 9 – поршень; 10 – добавочная емкость; 11 – статический вольтметр; 12 – измеритель ёмкости; 13 – потенциометр; 14 – термостат

Шероховатость рабочей поверхности образца R_z должна соответствовать условию для предотвращения зацепления волокон за неровности поверхности испытуемого материала

$$R_z \leq 0.4 d_{cp},$$

где d_{cp} – средний диаметр волокна (мм).

Методика измерения величины электростатического заряда. Установка для измерения электростатического заряда и температуры в зоне трения представлена на рис. 3 [5 – 7]. Образующиеся заряды в зоне трения снимали при помощи электродов. Величины зарядов статического электричества определяли, измеряя величину потенциала при помощи вольтметра С-50 по методике, описанной в работах [1 – 2]. Медные электроды 4 для измерения напряжения статического электричества на волокнистой массе должны одновременно служить для фиксации волокнистой массы, не допуская её перекатывания в процессе испытаний.

Для предотвращения утечки зарядов, образовавшихся в результате трения, отдельные детали и узлы трибометра изолировали фторопластовыми прокладками. Образующиеся заряды в зоне трения снимали при помощи электродов. Величины зарядов статического электричества и их плотности определяли, измеряя величину потенциала при помощи вольтметра С-50. Съём зарядов производился с помощью металлической щетки, на концах которой крепили гибкие проволоочки. При таком измерении зарядов появляется дополнительная погрешность из-за электризации самой щетки.

Нами применен датчик, устанавливаемый на определенном расстоянии от заряженной поверхности полимерного покрытия, но позволяющий более просто получать надежные данные. Датчик представляет собой металлическую пластинку с игольчатыми электродами, погруженными в хлопок. Величина заряда измеряется статическим вольтметром, которая передается с заряженной поверхности на датчик по электростатической индукции. При этом опыты показали, что точность измерений величин зарядов при контактном и бесконтактном съемах зарядов практически одинакова. Датчик изолируется от корпуса установки фторопластовыми прокладками. Изоляция зоны трения с использованием высоких диэлектрических свойств фторопласта повышает точность измерения электростатических зарядов. Этому способствует также добавочная ёмкость в измерительной цепи.

По известной ёмкости системы и потенциалу, измеренному статическим вольтметром, величину заряда определяли по формуле

$$Q=U(C_{BK}+C_c+C_{dk}), \quad (2)$$

где C_{BK} – ёмкость статического вольтметра; C_c – ёмкость трущейся пары; C_{dk} – ёмкость добавочного конденсатора; U – напряжение, измеренное статическим вольтметром.

Максимальный заряд статического электричества достигается при разном времени трения с хлопком-сырцом. В результате исследования кинетики образования зарядов статического электричества установлено, что время образования максимального заряда для всех полимерных материалов колеблется от 20 до 145 с. Поэтому во всех экспериментах величину зарядов статического электричества измеряли через 180 с после начала опыта.

Методика определения температуры в зоне трения. Температуру в зоне трения измеряли с помощью токосъемного устройства (рис. 3), принцип действия которого основан на изменении ЭДС в зависимости от температуры. На боковой поверхности цилиндрического короба установлены скользящие углеграфитовые электроды, внутри которых расположены стандартные хромель-копелевые термопары типа ТХК-150. Холодный спай термопары находился в термостате при 273К. Температуру определяли при помощи потенциометра типа ПП-63.

Экспериментальные исследования. На основе созданной модульной установки и методик определения антифрикционных свойств антистатически-теплопроводящих антифрикционных и антифрикционно-износостойких композиционных полимерных материалов и покрытий на их основе были определены их коэффициенты трения, величины электростатических зарядов и температур, возникающих в зоне трения, при взаимодействии с хлопком-сырцом разновидности С-6524, влажности хлопка-сырца $W=8.2\%$, удельного давления $P=0.01$ МПа и скорости скольжения $V=1.5$ м/с.

В табл. 1 – 3 приведены значения коэффициентов трения, величины электростатических зарядов и температуры в зоне трения антифрикционных антистатически-теплопроводящих полиэтиленовых (ААТПЭК), эпоксидных (ААТЭК), пентапластовых (ААТПНПК) и полипропиленовых композиций (ААТППК), износостойких антистатически-теплопроводящих эпоксидных (ИАТЭК) и пентапластовых композиций (ИАТПНПК), антифрикционно-износостойких антистатически-теплопроводящих полипропиленовых (АИАТППК), эпоксидных (АИАТЭК) и пентапластовых (АИАТПНПК) композиций.

Таблица 1

Коэффициенты трения полиэтиленовых (ПЭ), полипропиленовых (ПП), эпоксидных (Э), пентапластовых (ПНП) композитов и конструкционных материалов

Материал	Коэффициент трения f	Материал	Коэффициент трения f	Материал	Коэффициент трения f
ААТПЭК-1	0.36	ААТППК-1	0.29	АИАТППК -1	0.28
ААТПЭК-2	0.34	ААТППК-3	0.27	АИАТППК -2	0.26
ИАТЭК-1	0.34	ИАТПНПК-1	0.31	АИАТЭК-1	0.28
ИАТЭК-2	0.36	ИАТПНПК-2	0.32	АИАТЭК-2	0.26
ААТЭК-1	0.24	ААТПНПК-1	0.24	АИАТПНПК-1	0.26
ААТЭК-2	0.24	ААТПНПК-2	0.24	АИАТПНПК-2	0.27
Сталь 3	0.4 – 0.45	Бронза	0.35 – 0.40	Алюминий	0.45 – 0.50

Таблица 2

Величины электростатических зарядов полиэтиленовых (ПЭ), полипропиленовых (ПП), эпоксидных (Э), пентапластовых (ПНП) композитов и конструкционных материалов

Материал	Величина электростатического заряда, $Q \cdot 10^{-7}$, Кл	Материал	Величина электростатического заряда, $Q \cdot 10^{-7}$, Кл	Материал	Величина электростатического заряда, $Q \cdot 10^{-7}$, Кл
ААТПЭК-1	22.7	ААТППК-1	18.5	АИАТППК -1	15.3
ААТПЭК-2	21.3	ААТППК-3	17.8	АИАТППК -2	16.5
ИАТЭК-1	17.3	ИАТПНПК-1	12.3	АИАТЭК-1	17.5
ИАТЭК-2	16.6	ИАТПНПК-2	13.3	АИАТЭК-2	20.3
ААТЭК-1	18.5	ААТПНПК-1	11.2	АИАТПНПК-1	17.2
ААТЭК-2	17.3	ААТПНПК-2	10.2	АИАТПНПК-2	15.3
Сталь 3	30.5	Бронза	32.6	Алюминий	35.5

Таблица 3

Величины температур, возникающих в зоне трения полиэтиленовых (ПЭ), полипропиленовых (ПП), эпоксидных (Э), пентапластовых (ПНП) композитов и конструкционных материалов

Материал	Величина температуры, возникающей в зоне трения, $T_{тр}$, К	Материал	Величина температуры, возникающей в зоне трения, $T_{тр}$, К	Материал	Величина температуры, возникающей в зоне трения, $T_{тр}$, К
ААТПЭК-1	330	ААТППК-1	308	АИАТППК -1	312
ААТПЭК-2	326	ААТППК-3	306	АИАТППК -2	310
ИАТЭК-1	304	ИАТПНПК-1	302	АИАТЭК-1	303
ИАТЭК-2	303	ИАТПНПК-2	300	АИАТЭК-2	301
ААТЭК-1	300	ААТПНПК-1	298	АИАТПНПК-1	297
ААТЭК-2	298	ААТПНПК-2	296	АИАТПНПК-2	296
Сталь 3	380.0	Бронза	400.0	Алюминий	420.0

Как видно из табл. 1 – 3, коэффициент трения, величины электростатического заряда и температуры, возникающие в зоне трения, антифрикционных и антифрикционно-износостойких антистатически-теплопроводящих полиолефиновых и эпоксидных композиционных полимерных материалов вполне отвечают функциональным требованиям, предъявляемым к материалам деталей трущихся пар рабочих органов машин и механизмов хлопкового комплекса, главными из которых являются технологичность и экономичность используемого материала, эффективное снижение повреждаемости хлопкового волокна и семян, исключение накопления статического электричества, образования намотов волокна на поверхности колков и искры при соударении с твердыми телами, находящимися в хлопке-сырце.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] O'z DSt 3330: 2018. Методы определения коэффициента трения, температуры и величины электростатического заряда в зоне трения / Негматов С.С., Эшкабилов О.Х., Абед Н.С., Гулямов Г., Тухташева М.Н. Ташкент, 2018. –14 с.
- [2] Негматов С.С. Основы процессов контактного взаимодействия композиционных полимерных материалов с волокнистой массой. Ташкент: Фан, 1984. – 296 с.
- [3] Абед Н.С., Негматов С.С., Гулямов Г., Тухташева М.Н. Композиционные антифрикционно-износостойкие материалы и технология их получения. Ташкент: Fan va texnologiya, 2017. – 200 с.
- [4] Гулямов Г., Абед Н.С., Негматов С.С., Тухташева М.Н. Эшкабилов О.Х. Толали массалар билан таъсир килиш шароитида ишловчи антифрикцион-ейилишбардош антистатик иссиқлик ўтказувчи композицион полимер материалларнинг хоссаларини ўрганиш усулининг методологик асосларини ишлаб чиқиш мумаммоси // Композиционные материалы. Тошкент, 2018. № 1. 88 – 89 б.
- [5] Негматов С.С., Эшкабилов О.Х., Абед Н.С., Гулямов Г., Тухташева М.Н. Методы изучения триботехнических свойств антифрикционно-износостойких антистатически-теплопроводящих композиционных полимерных материалов с волокнистой массой (обзор) // Композиционные материалы. Ташкент, 2018. № 1. С. 61 – 65.
- [6] Гулямов Г., Абед Н.С., Негматов С.С., Тухташева М.Н. Эшкабилов О.Х. Разработка и усовершенствование устройства для изучения свойств машиностроительных антифрикционно-износостойких антистатически-теплопроводящих композиционных полимерных материалов, работающих в условиях взаимодействия с волокнистой массой // Композиционные материалы. Ташкент, 2018. № 2. С. 117 – 119.
- [7] Гулямов Г., Абед Н.С., Негматов С.С., Тухташева М.Н. Эшкабилов О.Х. Расчет деформации и возникающих напряжений в измерительной балочке дискового трибометра для определения триботехнических характеристик композиционных полимерных материалов с волокнистой массой // Композиционные материалы. Ташкент, 2018. № 2. С. 98 – 100.

Государственное унитарное предприятие «Фан ва тараккиёт»
Ташкентского государственного технического университета им. Ислама Каримова

Дата поступления
01.03.2019

О.Х. Эшкабилов, Г. Гулямов, Н.С. Абед, С.С. Негматов, М.Н. Тухташева. Пахта хом аиёси билан ўзаро таъсирдаги композицион антистатик-иссиқлик ўтказувчи полимер материалларнинг антифрикцион хоссаларини аниқлаш қўрилмаси ва методикаси

Мақолада пахта хомашёси таъсиридаги машинасозлик композицион антистатик-иссиқлик ўтказувчи полимер материалларнинг антифрикцион хоссалари - ишқаланиш қучи, ишқаланиш зонасида вужудда келадиган температура ва электростатик зарядлар қийматини аниқловчи қўрилма ва методикаси келтирилган.

O.H. Eshkabilov, G. Gulyamov, N.S. Abed, S.S. Negmatov, M.N. Tuhtasheva. Installation and methodology for determining the antifriction properties of antistatic heat-conducting composite polymer materials interacting with raw cotton

The installation and method for determining the anti-friction properties of friction force, temperature and electrostatic charge in the friction zone of engineering composite antistatic-heat-conducting polymer materials when interacting with raw cotton is given.

УДК 621.01, 66.047.37:66.021.3

Б.А. КУШИМОВ, К.А. КАРИМОВ, А.Х. АХМЕДОВ

РАЗРАБОТКА И АНАЛИТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА СУШКИ С ПОМОЩЬЮ ВНЕШНИХ ФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ (ЧАСТЬ 2)

В первой части данной статьи обосновываются тепломассообменные процессы, приводятся различные технологии процесса сушки, а также возможность использования внешних физических полей при сушке сорбентов, агентов сушки или дисперсных материалов. Аналитически изучается учёт взаимодействий между динамикой влаги и тепла в обезвоживаемом объекте, где происходит процесс сушки с помощью теплового облучения [1]. Первая и вторая части данной статьи и последующие исследования являются логическим продолжением исследований, приведенных в работах [1 – 5].

В работе же [1] после аналитических исследований была получена следующая система обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} C_s \dot{T}_\gamma - \varepsilon \dot{W}_\gamma + \lambda a^2 T_\gamma - \frac{Q_0}{\eta - a^2} \{ e^{-\eta l} [\cos a_\gamma l - a_\gamma \sin a_\gamma l] - 1 \} = 0, \\ (1 - \varepsilon) \dot{W}_\gamma + a^2 D W_\gamma + a^2 D_T T_\gamma = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Приступим к аналитической реализации системы уравнений (1). Полученная данная система дифференциальных уравнений решается либо методом преобразования Лапласа, либо переходом динамических переменных T_γ , W_γ к новым, другим переменным U_γ и V_γ .

Введя обозначение

$$f = \frac{Q_0}{C_s(\eta - a^2)} [e^{-\eta l} (\cos a_\gamma l - a_\gamma \sin a_\gamma l) - 1],$$

получим

$$\begin{cases} \dot{T}_\gamma - \frac{\varepsilon}{C_s} \dot{W}_\gamma + \frac{\lambda a^2}{C_s} T_\gamma - f_\gamma = 0, \\ \dot{W}_\gamma + \frac{a^2 D}{1 - \varepsilon} W_\gamma + \frac{a^2 D_T}{1 - \varepsilon} T_\gamma = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Переходим к комплексным переменным от t и s .

Для переменных s имеем динамические переменные

$$\bar{T}_\gamma = \hat{L}(T_\gamma), \quad \bar{W}_\gamma = \hat{L}(W_\gamma), \quad t \rightarrow s,$$

где $\hat{L}$ – оператор Лапласа; $W_{\gamma 0}$, $T_{\gamma 0}$ – начальные значения функции $W_\gamma(t)$ и $T_\gamma(t)$.

С учетом вышеприведенных зависимостей вместо (2) получим следующую систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} (s + \frac{\lambda a^2}{C_s}) \bar{T}_\gamma - s \frac{\varepsilon}{C_s} \bar{W}_\gamma = f_\gamma + T_{\gamma 0} + \frac{\varepsilon}{C_s} W_{\gamma 0} = F, \\ \frac{a^2 D_T}{1 - \varepsilon} \bar{T}_\gamma + (s + \frac{a^2 D}{1 - \varepsilon}) \bar{W}_\gamma = W_{\gamma 0}. \end{cases} \quad (3)$$

С помощью метода Крамера однозначно определим неизвестные функции $\bar{T}_\gamma$ и $\bar{W}_\gamma$ в системе уравнений (3).

Определены следующие системы:

$$\begin{aligned} \Delta &= \begin{vmatrix} s + \frac{\lambda a^2}{C_s} & -s \frac{\varepsilon}{C_s} \\ \frac{a^2 D_T}{1 - \varepsilon} & s + \frac{a^2 D}{1 - \varepsilon} \end{vmatrix} = (s + \frac{\lambda a^2}{C_s})(s + \frac{a^2 D}{1 - \varepsilon}) + \frac{a^2 D_T}{1 - \varepsilon} s \frac{\varepsilon}{C_s}, \\ \Delta_1 &= \begin{vmatrix} F & -s \frac{\varepsilon}{C_s} \\ W_{\gamma 0} & s + \frac{a^2 D}{1 - \varepsilon} \end{vmatrix} = F(s + \frac{a^2 D}{1 - \varepsilon}) + W_{\gamma 0} s \frac{\varepsilon}{C_s}, \\ \Delta_2 &= \begin{vmatrix} s + \frac{\lambda a^2}{C_s} & F \\ \frac{a^2 D_T}{1 - \varepsilon} & W_{\gamma 0} \end{vmatrix} = (s + \frac{\lambda a^2}{C_s}) W_{\gamma 0} - F \frac{a^2 D_T}{1 - \varepsilon}. \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом функциональных зависимостей (4) из системы алгебраических уравнений (3) находим

$$\bar{T}_\gamma = \frac{\Delta_1}{\Delta}, \quad \bar{W}_\gamma = \frac{\Delta_2}{\Delta}. \quad (5)$$

В итоге получим следующие функциональные зависимости для определения искомых ве-

личин динамических переменных:

$$\begin{aligned}\bar{T}_\gamma &= \frac{F(s + \frac{a^2 D}{1-\varepsilon}) + W_{\gamma 0} s \frac{\varepsilon}{C_s}}{(s + \frac{\lambda a^2}{C_s})(s + \frac{a^2 D}{1-\varepsilon}) + \frac{a^2 D_T}{1-\varepsilon} s \frac{\varepsilon}{C_s}}, \\ \bar{W}_\gamma &= \frac{(s + \frac{\lambda a^2}{C_s})W_{\gamma 0} - F \frac{a^2 D_T}{1-\varepsilon}}{(s + \frac{\lambda a^2}{C_s})(s + \frac{a^2 D}{1-\varepsilon}) + \frac{a^2 D_T}{1-\varepsilon} s \frac{\varepsilon}{C_s}}.\end{aligned}\quad (6)$$

После некоторых простых математических преобразований имеем

$$\begin{aligned}\bar{T}_\gamma &= \frac{s(F + W_{\gamma 0} \frac{\varepsilon}{C_s}) + F \frac{a^2 D}{1-\varepsilon}}{s^2 + s(\frac{\lambda a^2}{C_s} + \frac{a^2 D}{1-\varepsilon} + \frac{\varepsilon}{C_s} \frac{a^2 D_T}{1-\varepsilon}) + \frac{\lambda a^4 D}{C_s(1-\varepsilon)}} = \frac{sA_1 + A_2}{(s + B_1)(s + B_2)}, \\ \bar{W}_\gamma &= \frac{sW_{\gamma 0} + \frac{\lambda a^2 W_{\gamma 0}}{C_s} - F \frac{a^2 D_T}{1-\varepsilon}}{s^2 + s(\frac{\lambda a^2}{C_s} + \frac{a^2 D}{1-\varepsilon} + \frac{\varepsilon}{C_s} \frac{a^2 D_T}{1-\varepsilon}) + \frac{\lambda a^4 D}{C_s(1-\varepsilon)}} = \frac{sA_3 + A_4}{(s + B_1)(s + B_2)}.\end{aligned}\quad (7)$$

Здесь A_1, A_2, B_1, B_2 являются постоянными величинами, которые определяются следующими функциональными зависимостями:

$$\begin{aligned}A_1 &= F + W_{\gamma 0} \frac{\varepsilon}{C_s}, \quad A_2 = F \frac{a^2 D}{1-\varepsilon}, \\ B_1 &= \frac{-\left(\frac{\lambda a^2}{C_s} + \frac{a^2 D}{1-\varepsilon} + \frac{\varepsilon}{C_s} \frac{a^2 D_T}{1-\varepsilon}\right) + \sqrt{\left(\frac{\lambda a^2}{C_s} + \frac{a^2 D}{1-\varepsilon} + \frac{\varepsilon}{C_s} \frac{a^2 D_T}{1-\varepsilon}\right)^2 - 4 \frac{\lambda a^4 D}{C_s(1-\varepsilon)}}}{2}, \\ B_2 &= \frac{-\left(\frac{\lambda a^2}{C_s} + \frac{a^2 D}{1-\varepsilon} + \frac{\varepsilon}{C_s} \frac{a^2 D_T}{1-\varepsilon}\right) - \sqrt{\left(\frac{\lambda a^2}{C_s} + \frac{a^2 D}{1-\varepsilon} + \frac{\varepsilon}{C_s} \frac{a^2 D_T}{1-\varepsilon}\right)^2 - 4 \frac{\lambda a^4 D}{C_s(1-\varepsilon)}}}{2}.\end{aligned}$$

Вышеприведенные зависимости теперь имеют табличный вид для обратного преобразования, где выражения для коэффициентов $A_1, A_2, A_3, A_4, B_1, B_2$ входят в (7).

Поскольку одной из целей задачи является изучение поведения влажности в системе сушки, будем считать, что $\bar{W}(s, t) \rightarrow W(x, t)$.

Для этого случая рассмотрим следующую функцию отображения:

$$\bar{W}_\gamma = \frac{sW_{\gamma 0}}{(s + s_1)(s + s_2)} + \frac{\frac{\lambda a^2 W_{\gamma 0}}{C_s} - F \frac{a^2 D_T}{1-\varepsilon}}{(s + s_1)(s + s_2)}.\quad (8)$$

С целью восстановления оригинальных функций для функции отображения в выражении (8) с помощью обратных преобразований Лапласа получим следующую функциональную зависимость:

$$\frac{s}{(s + s_1)(s + s_2)} = \frac{s}{\left(s + \frac{s_1 + s_2}{2}\right)^2 - \frac{(s_1 - s_2)^2}{4}} \Rightarrow Ae^{at} \sin(\omega t + \alpha),\quad (9)$$

где A определяется из выражения

$$A = \frac{1}{\left(\frac{s_1 + s_2}{2}\right)^2} \left[\left(\frac{s_1 + s_2}{2}\right)^2 + \left(\frac{s_1 + s_2}{2}\right)^2 - s_1 s_2 \right]^{1/2} = \frac{s_1^2 s_2^2}{\left(\frac{s_1 + s_2}{2}\right)^2 - s_1 s_2}, \quad a = \frac{s_1 + s_2}{2},$$

$$\alpha = \arctg \frac{\left(\frac{s_1 + s_2}{2}\right)^2 - s_1 s_2}{\frac{s_1 + s_2}{2}} = \arctg \left[\frac{s_1 + s_2}{2} - \frac{s_1 s_2}{2(s_1 + s_2)} \right].$$

На основании формулы восстановления оригинальной функции (9) получим возможность однозначно определить заранее неизвестную искомую функцию W_γ – функцию по определению распространения влаги:

$$W_\gamma = Ae^{-at} \sin(\omega t + \alpha), \quad (10)$$

где a^1 , ω , α – параметры исследуемой задачи, т.е. известная функция коэффициентов в системе уравнений и собственные значения γ .

На основании вышеприведенных исследований полное решение для определения состояния влаги в слое имеет вид

$$W = W^{\text{однородный}} + W^{\text{неоднородный}},$$

$$\text{где } W^{\text{однородный}} = \sum_{n=1}^{\infty} T_0 \left(1 + \alpha \frac{Z_{\gamma 0}}{X_{\gamma 0}}\right) e^{-a_\gamma^2 t} \cos a_\gamma x, \quad W^{\text{неоднородный}} = \sum_{n=1}^{\infty} A e^{-a_\gamma^2 t} \sin(\omega_\gamma t + \alpha_\gamma) \cos a_\gamma x. \quad (11)$$

Таким образом, получено полное точное решение в следующей аналитической форме:

$$W = \sum_{n=1}^{\infty} T_0 \left(1 + \alpha \frac{Z_{\gamma 0}}{X_{\gamma 0}}\right) e^{-a_\gamma^2 t} \cos a_\gamma x + \sum_{n=1}^{\infty} A e^{-a_\gamma^2 t} \sin(\omega_\gamma t + \alpha_\gamma) \cos a_\gamma x.$$

Состояние температуры аналогично можно получить из второго уравнения (2) или из уравнений (7) и (11) в виде

$$T_\gamma = \frac{(1 - \varepsilon) W_\gamma}{a^2 D_T} - \frac{D}{D_T} W_\gamma. \quad (12)$$

На основе вышеприведенных исследований можно отметить, что во второй части статьи аналитически изучен учёт взаимодействий между динамикой влаги и тепла в обезвоживаемом объекте, где происходит процесс сушки с помощью теплового облучения. На основании этого решения получены распределения температуры и влажности в зависимости от координаты и времени при облучении, а также зависимость температуры от скорости влагопереноса и величины влажности в единичном объёме тела. Подставляя в математическую модель процесса сушки различные варианты вариации величин (l , η , Q_0 , λ , k , σ , q_1 , q_2 , g_1 , g_2), можем проанализировать возможные режимы сушки. Численные значения коэффициентов также можно использовать для практических расчетов при проектировании сушилок, поиске оптимальных режимов их работы, создании систем автоматического управления.

При этом следует отметить, что при определении температуры и влажности для интегрирования дифференциальных уравнений, приведенных в математической модели, преобразование Лапласа – Карсона требует определенных упрощений. С целью описания реального процесса при построении решения системы нелинейных дифференциальных уравнений численными методами преобразованную систему уравнений в дискретный случай представляется необходимым использование современных ЭВМ программ.

Полученные научные результаты на основе аналитических исследований могут быть использованы при разработке технических средств и конструкций новых механизмов не только для сушки сорбентов и дисперсных материалов, но также фруктов и овощей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кушимов Б.А., Каримов К.А., Ахмедов А.Х. Разработка математических моделей процесса сушки с помощью внешних физических полей (Часть 1) // Узбекский журнал «Проблемы механики». Ташкент, 2019. № 1. С. 61 – 65.
- [2] Каримов К.А., Ахмедов А.Х. Перспективы использования реологических жидкостей с целью повышения эффективности управляемых механизмов прецизионного машиностроения // Сборник научных статей Международной научной конференции «Инновация – 2016». Ташкент, 2016. С. 31 – 33.
- [3] Kushimov B. A. Investigation of solar Drying of Desert Fodder Plant Seeds // APPLIED Solar Energy. (Geliotekhnika) 1. Vol. 37. New York: Allerton Press. Ink. 2001. P. 82 – 90.
- [4] Кушимов Б.А., Каримов К.А., Ахмедов А.Х. К аналитическому описанию сушки под действием теплового облучения для нестационарных и стационарных задач // Вестник ТГТУ. Ташкент, 2018. № 1. С. 86–92.
- [5] Кушимов Б.А., Каримов К.А., Ахмедов А.Х. Постановка и решение стационарных задач теплообменных процессов в технологических машинах для сушки семян // Вестник ТГТУ. Ташкент, 2018. № 3. С. 147 – 150.

Ташкентский государственный технический университет
им. Ислама Каримова

Дата поступления
02.02.2019

Б.А. Кушимов, К.А.Каримов, А.Х.Ахмедов. Ташқи физик майдонлар ёрдамида қуритиш жараёнини математик моделлари яратиш ва уларнинг аналитик ечимларини топиш. 2 қисм.

Ушбу мақола биринчи қисмдаги мақоланинг узвий давомидир. Мақолада стационар ва ностационар ҳоллардаги иссиқлик масса алмашинуви жараёнларини ифодаловчи бир жинсли ва бир жинсли бўлмаган дифференциал тенгламани аналитик ечими яратилган. Тенгламани ечими асосида термал нурланишни координата ва вақтга боғлиқ ҳолда иссиқлик ва намликни тарқалиши аниқланган.

B. Kushimov, K. Karimov, A. Akhmedov. Development and analytical implementation of mathematical models of the drying process using external physical fields. Part 2.

An analytical solution of the homogeneous and inhomogeneous equations of the process of heat and mass transfer for drying in linear form for stationary and non-stationary cases is obtained. Based on this solution, the temperature and humidity distributions depending on the coordinate and time during thermal exposure, as well as the dependence of temperature on the velocity.

УДК 631.31:634.1

А.С. САДРИДДИНОВ, А.Т. МУСУРМОНОВ

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ДВИЖЕНИЯ САДОВОЙ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ МАШИНЫ

Для изучения влияния инерционных свойств машины, распределения масс и положения центров тяжести на устойчивость орудия по глубине обработки необходимо исследовать динамику его движения. Садовая почвообрабатывающая машина представляет собой сложную динамическую систему со многими степенями свободы, определяющимися большим числом независимых обобщенных координат. Составление дифференциальных уравнений движения такой системы без соответствующих упрощений и их анализ представляют значительные трудности.

Кинематическая модель навесного почвообрабатывающего агрегата, состоящего из трактора и центральной секции садового культиватора (рис. 1), может быть получена при раздельном рассмотрении движения агрегата в продольно-вертикальной, поперечно-вертикальной плоскостях. Такое упрощение дает возможность существенно облегчить изучение устойчивости движения агрегата по глубине обработки и получить приемлемые результаты при практических расчетах основных геометрических параметров секции.

В продольном движении агрегат можно рассматривать как систему с тремя степенями свободы [1]. В качестве обобщенных координат выберем линейные вертикальные перемещения Z_0 центра масс трактора и продольно-угловые колебания ψ' и ψ'' трактора и секции соответственно (рис. 2).

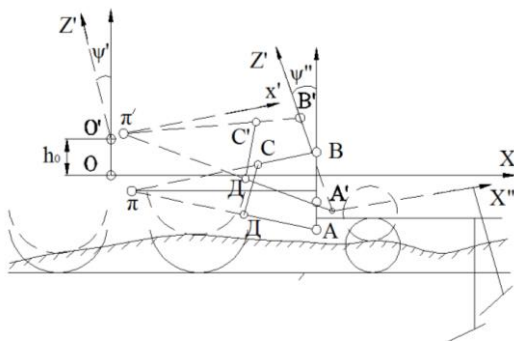


Рис. 1. Перемещение агрегата в продольно-вертикальной плоскости

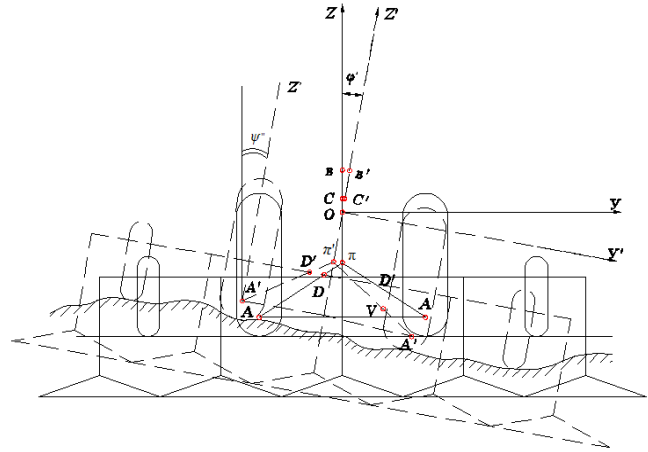


Рис. 2. Перемещение агрегата в поперечно-вертикальной плоскости

Тогда, согласно соотношениям [1], при малых колебаниях агрегата линейные перемещения любой точки трактора в продольно-вертикальной плоскости определяются по формулам

$$\Delta x = -z' \psi', \quad \Delta z = x' \psi' + z_0, \quad (1)$$

где x' и z' – соответствующие координаты точек трактора в подвижной системе координат $x'o'z'$.

При изменении обобщенных координат от нулевых значений до z_0 , ψ' , ψ'' перемещение секции орудия в продольно-вертикальной плоскости в любой момент времени можно рассматривать как поворот относительно мгновенного центра вращения, положение которого меняется от точки π до точки π' в зависимости от положения механизма навески. Поэтому линейные перемещения произвольной точки секция являются функциями обобщенных координат:

$$\Delta x = f(z_0, \psi', \psi''), \quad \Delta z = g(z_0, \psi', \psi''). \quad (2)$$

Для этого в качестве обобщенных координат в поперечно-вертикальной плоскости выберем поперечно-угловые колебания ϕ' и ϕ'' трактора и секции соответственно (см. рис. 2).

Тогда в силу соотношений [1] линейные перемещения произвольной точки трактора в поперечно-вертикальной плоскости определяются по формулам

$$\Delta y = z' \phi', \quad \Delta z = -y' \phi', \quad (3)$$

где y' и z' – координаты точек трактора в подвижной системе отсчета $Y'O'Z'$.

Как и ранее, при изменении обобщенных координат от нулевых значений до ϕ' , ϕ'' перемещение секции в поперечно-вертикальной плоскости является поворотом вокруг мгновенного центра вращения, положение которого меняется от точки π до точки π' в зависимости от положения нижних и верхних тяг механизма навески трактора. Поэтому линейные перемещения секции зависят от обобщенных координат

$$\Delta y = f(\phi', \phi''), \quad \Delta z = g(\phi', \phi''). \quad (4)$$

Что касается определения углов ψ'' и ψ''' , то для ψ'' справедливо выражение (4), а угол ψ''' находится из условия безотрывного копирования опорным колесом правой боковой секции соответствующего профиля рельефа

$$\Delta \bar{z}_0' + (x'_\kappa - x_\pi) \psi'' - (y'_\kappa - d_1) \phi''' = h_7, \quad (5)$$

где x'_κ и y'_κ – координаты колеса боковой секции.

В многочисленных исследованиях по динамике машины принимаются следующие основные допущения [1, 2]:

- 1) отклонения траекторий точек машины от их траекторий в движении малы и приращения обобщенных координат первой степени не учитываются;
- 2) изменения внешних сил и моментов, обусловленных входными воздействиями, прямо

пропорциональны обобщенным координатам и их первым производным;

3) колебания трактора незначительно влияют на вертикальные перемещения орудия;

4) колеса машины перемещаются по неровностям поля без отрыва, обеспечивая постоянный контакт с поверхностью поля;

5) характер неровностей поля после деформации их опорными колесами практически не изменяется.

Наряду с перечисленными допущениями примем, что

6) опорные колеса центральной рамы и боковых крыльев садовой почвообрабатывающей машины абсолютно жесткие.

Это допущение принято по следующим причинам:

– деформация колес орудия, исключая статическое сжатие, определяется, в основном, вертикальной составляющей реакции на рабочие органы, которые от секции слабо передаются через механизм навески на центральную раму и боковые крылья орудия;

– жесткость опорных колес рамы садовой почвообрабатывающей машины выше жесткости опорных колес боковых крыльев;

– значительно уменьшается число независимых обобщенных координат орудия и упрощается математическая модель.

Для составления уравнений движения садовой почвообрабатывающей машины (рис. 3) используем уравнение Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = Qq_i \quad (6)$$

где q_i – i -я обобщенная координата; T – кинетическая энергия системы; Π – потенциальная энергия системы; Φ – функция сопротивления; Qq_i – обобщенная сила, соответствующая координате q_i .

Кинетическая энергия центральной секции

$$T = \frac{m_1}{2} (\Delta \dot{x}_{01}^2 + \Delta \dot{y}_{01}^2 + \Delta \dot{z}_{01}^2) + \frac{J_{x1}}{2} \dot{\varphi}^2 + \frac{J_{y1}}{2} \dot{\psi}^2, \quad (7)$$

где m_1 – масса машины; Δx_{01} , Δy_{01} , Δz_{01} – линейные перемещения центра масс машины; J_{x1} , J_{y1} – моменты инерции машины.

Потенциальная энергия машины

$$\Pi = \frac{C}{2} (\Delta z_3 - h_3)^2 + \frac{C}{2} (\Delta z_4 - h_4)^2, \quad (8)$$

где C – жесткость опорных колес машины; Δz_3 и Δz_4 – вертикальные перемещения колес машины; h_3 и h_4 – рельеф поверхности поля под колесами машины.

Функция сопротивления центра машины

$$\Phi = \frac{\alpha}{2} (\Delta \dot{z}_3 - \dot{h}_3)^2 + \frac{\alpha}{2} (\Delta \dot{z}_4 - \dot{h}_4)^2, \quad (9)$$

где α – коэффициент демпфирования колес машины; $\Delta \dot{z}_3, \Delta \dot{z}_4, \dot{h}_3, \dot{h}_4$ – производные по времени от $\Delta z_3, \Delta z_4, h_3, h_4$ соответственно.

Обобщенные силы по обобщенным координатам φ''' и ψ'''

$$Q_{\varphi'''} = - \sum_{i=1}^{n_1} \bar{y}_i R_{iz}; Q_{\psi'''} = - \sum [(\bar{z}_i - \bar{z}'_{\pi}) R_{ix} - (\bar{x}_i - x'_{\pi}) R_{iz}], \quad (10)$$

где n_1 – число рабочих органов на машине; $\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i$ – координаты i -го рабочего органа; $\bar{x}_i$ и z'_{π} – координаты мгновенного центра вращения; R_{ix} и R_{iz} – составляющие реакции, действующей со стороны почвы на i -й рабочий орган секции ($i=1, \dots, n_1$).

Согласно кинематике движения садовой почвообрабатывающей машины, линейные перемещения центра масс машины

$$\begin{aligned}
\Delta x_{01} &= \Delta x'_{\pi} - (z_{01} - z'_{\pi})\psi''', \\
\Delta y_{01} &= \Delta y'_{\pi} - (z_{01} - z'_{\pi})\psi''', \\
\Delta z_{01} &= \Delta z'_{\pi} - (z_{01} - z'_{\pi})\psi''',
\end{aligned} \tag{11}$$

где x_{01} и z_{01} – координаты центра масс машины;

$$\Delta x'_{\pi} = \frac{z'_{\pi} - z_{\pi}}{2(x_{\kappa} - x_{\pi})}(h_5 + h_6), \quad \Delta y'_{\pi} = \frac{z'_{\pi} - z_{\pi}}{2y_{\kappa}}(h_6 + h_5), \quad \Delta z'_{\pi} = \frac{z'_{\pi} - z_{\pi}}{2(x_{\kappa} - x_{\pi})}(h_5 + h_6).$$

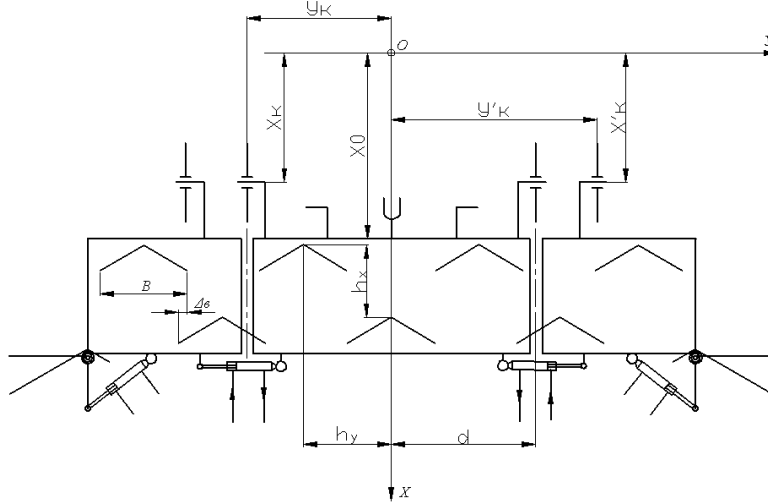


Рис.3. Трехсекционная садовая почвообрабатывающая машина

Аналогично вертикальные перемещения колес центра машины определяются из соотношений

$$\begin{aligned}
\Delta z_3 &= \Delta z'_{\pi} + (x''_{\kappa} - x'_{\pi})\psi''' - y''_{\kappa}\varphi''', \\
\Delta z_4 &= \Delta z'_{\pi} + (x''_{\kappa} - x'_{\pi})\psi''' - y''_{\kappa}\varphi''',
\end{aligned} \tag{12}$$

где x''_{κ} и y''_{κ} – координаты опорных колес секции

Подставляя выражения (7) – (12) в уравнение (6), после некоторых преобразований получим уравнения движения центра машины в виде

$$\begin{aligned}
A_1\ddot{\varphi}''' + A_2\dot{\varphi}''' + A_3\varphi''' &= A_4(\ddot{h}_5 - \ddot{h}_6) + A_5(\dot{h}_4 - \dot{h}_3) + A_6(h_4 - h_3) - \sum_{i=1}^{n1} \bar{y}_i R_{iz}; \\
B_1\ddot{\varphi}''' + B_2\dot{\varphi}''' + B_3\varphi''' &= B_4(\ddot{h}_5 + \ddot{h}_6) + B_5(\dot{h}_5 + \dot{h}_6) + B_6(h_5 + h_6) + B_7(\dot{h}_4 + \dot{h}_3) + B_8(h_4 + h_3) - \\
&\quad - \sum_{i=1}^{n1} [(\bar{z}_i - z'_{\pi})R_{iz}(\bar{x}_i - x'_{\pi})R_{iz}] \\
A_1 &= m_1(z_{01} - z'_{\pi})^2 + J_{x1}; \quad A_2 = 2\alpha Y_{\kappa}''^2; \quad A_3 = 2c Y_{\kappa}''^2; \quad A_4 = \frac{m_1(z_{01} - z'_{\pi})(z'_{\pi} - z_{\pi})}{2Y_{\kappa}}; \quad A_5 = \alpha Y_{\kappa}''; \quad A_6 = c Y_{\kappa}''; \tag{13} \\
B_1 &= m_1(z_{01} - z'_{\pi})^2 + m_1(x_{01} - x'_{\pi})^2 + J_{y1}; \quad B_2 = 2\alpha(x''_{\kappa} - x'_{\pi})^2; \quad B_3 = 2c(x''_{\kappa} - x'_{\pi})^2; \\
B_4 &= \frac{m_1(z_{01} - z'_{\pi})(z'_{\pi} - z_{\pi}) + m_1(x_{01} - x'_{\pi})(x'_{\pi} - x_{\pi})}{2(x_{\kappa} - x_{\pi})}; \quad B_5 = -\frac{\alpha(x''_{\kappa} - x'_{\pi})(x'_{\pi} - x_{\pi})}{x_{\kappa} - x_{\pi}}; \\
B_6 &= -\frac{c(x''_{\kappa} - x'_{\pi})(x'_{\pi} - x_{\pi})}{x_{\kappa} - x_{\pi}}; \quad B_7 = \alpha(x''_{\kappa} - x'_{\pi}); \quad B_8 = c(x''_{\kappa} - x'_{\pi}).
\end{aligned}$$

Правая боковая секция наряду с вертикальным перемещением $\Delta z'_0$ получает угловые перемещения ψ', φ''' в продольно-вертикальной и поперечно-вертикальной плоскостях. Следовательно, для ее рабочих органов вертикальные перемещения определяются, согласно [1,2], по формуле

$$\Delta \bar{z}'_i = \Delta z'_0 + (\Delta \bar{x}'_i - x_\pi) \psi'' - (\Delta \bar{y}'_i - d_i) \varphi''', \quad (14)$$

где $\Delta \bar{z}'_i$ и $\Delta \bar{y}'_i$ – координаты рабочих органов правой боковой секции относительно инерциальной системы отсчета ХОУ, выражаемые для клиновой схемы расположения через три конструктивных параметра:

$$\bar{x}'_i = x_0 + \left(i + \frac{n_1 - 1}{2}\right) h_x; \bar{y}'_i = \left(i + \frac{n_1 - 1}{2}\right) h_y \quad (i = 1, \dots, n_2), \quad (15)$$

где n_1 и n_2 – количество рабочих органов на центральной и боковой секциях.

Используя изложенную методику составления уравнений движения для боковой секции, получим следующую систему:

$$C_1 \ddot{\varphi}^{IV} + C_2 \dot{\varphi}^{IV} + C_3 \varphi^{IV} = C_4 \ddot{h}_5 + C_5 \ddot{h}_6 + C_6 \ddot{h}_7 + C_7 (\dot{h}_8 - \dot{h}_7) - \sum_{i=1}^{n_1} (\bar{y}_i - y''_\pi) R'_{iz}, \quad (16)$$

$$\begin{aligned} D_1 \ddot{\psi}^{IV} + D_2 \dot{\psi}^{IV} + D_3 \psi^{IV} = & D_4 \ddot{h}_5 + D_5 \ddot{h}_6 + D_6 \ddot{h}_7 + D_7 \dot{h}_5 + D_8 \dot{h}_6 + D_9 \dot{h}_7 + C_{10} (\dot{h}_7 + \dot{h}_8) + \\ & + D_{11} h_5 + D_{12} h_6 + D_{13} h_7 - \sum_{i=1}^{n_1} [(\bar{z}_i - z''_\pi) R'_{iz} - (\bar{x}'_i - z''_\pi) R'_{iz}], \end{aligned} \quad (17)$$

где

$$\begin{aligned} C_1 = m_2 (z_{02} - z'_\pi)^2 + J_{x2}; C_2 = 2\alpha Y''^2_\kappa; C_3 = 2CY''^2_\kappa; \\ C_{4,5} = \frac{m_2 (z_{02} - z''_\pi)(z''_\pi - z_\pi)}{2(Y'_\kappa - d_1)} \left(\frac{x'_\kappa - x_\pi}{x_\kappa - x_\pi} \pm \frac{d_1}{Y_\kappa} \right); C_6 = -\frac{m_2 (z_{02} - z''_\pi)(z''_\pi - z_\pi)}{Y'_\kappa - d_1}; C_7 = \alpha Y''^3_\kappa; C_8 = cY''^3_\kappa. \\ D_1 = m_2 (z_{02} - z''_\pi)^2 + m_2 (x_{02} - x''_\pi)^2 + J_{y2}; D_2 = 2\alpha (x''_\kappa - x''_\pi)^2; D_3 = 2c(x''_\kappa - x''_\pi)^2; \\ D_{4,5} = -\frac{m_2 (z_{02} - z''_\pi)(z''_\pi - z_\pi)}{2(x_\kappa - x_\pi)} - \frac{m_2 (x_{02} - x''_\pi)}{2} \left[\frac{z''_\pi - z_\pi}{x_\kappa - x_\pi} \pm \frac{d_1}{Y_\kappa} - \frac{y''_\pi - d_1}{y'_\kappa - d_1} \cdot \left(\frac{x''_\pi - x_\pi}{x_\kappa - x_\pi} \pm \frac{d_1}{Y_\kappa} \right) \right]; \\ D_6 = -\frac{m_2 (x_{02} - x''_\pi)(y''_\pi - d_1)}{(y'_\kappa - d_1)}; D_{7,8} = -\alpha (x''_\kappa - x''_\pi) \left[\frac{x''_\pi - x_\pi}{x_\kappa - x_\pi} + \frac{d_1}{Y_\kappa} - \frac{y''_\pi - d_1}{y'_\kappa - d_1} \left(\frac{x''_\pi - x_\pi}{x_\kappa - x_\pi} \pm \frac{d_1}{Y_\kappa} \right) \right]; \\ D_9 = -\frac{2\alpha (x''_\kappa - x''_\pi)(y''_\pi - d_1)}{y'_\pi - d_1}; D_{10} = \alpha (x''_\kappa - x''_\pi); \\ D_{11,12} = -c(x''_\kappa - x''_\pi) \left[\frac{x''_\pi - x_\pi}{x_\kappa - x_\pi} \pm \frac{d_1}{Y_\kappa} - \frac{y''_\pi - d_1}{y'_\kappa - d_1} \left(\frac{x'_\pi - x_\pi}{x_\kappa - x_\pi} \pm \frac{d_1}{Y_\kappa} \right) \right]; \\ D_{13} = -\frac{2c(x''_\kappa - x''_\pi)(y''_\pi - d_1)}{y'_\pi - d_1}; D_{14} = c(x''_\kappa - x''_\pi). \end{aligned} \quad (18)$$

Для исследования уравнений движения садовой почвообрабатывающей машины, представляющих собой линейную дифференциальную систему уравнений с постоянными коэффициентами, применим методы статической динамики [3]. Совершая над уравнениями (16) и (17) преобразование Лапласа, получим следующую систему алгебраических уравнений относительно изображений обобщенных координат:

$$\begin{aligned} (A_1 p^2 + A_2 p + A_3) \bar{\varphi}''' = & A_4 p^2 (\bar{h}_5 - \bar{h}_6) + (A_5 p + A_6) (\bar{h}_8 - \bar{h}_7) - \sum_{i=1}^{n_1} \bar{y}_i \bar{R}_{iz}; \\ (B_1 p^2 + B_2 p + B_3) \bar{\varphi}''' = & (B_4 p^2 + B_5 p + B_6) (\bar{h}_5 - \bar{h}_6) + (B_7 p + B_8) (\bar{h}_9 - \bar{h}_8) - \sum_{i=1}^{n_1} [\bar{z}_i - z'_\pi] \bar{R}_{iz} - (\bar{x}'_i - x''_\pi) \bar{R}_{iz}; \\ (C_1 p^2 + C_2 p + C_3) \bar{\varphi}''' = & C_4 p^2 \bar{h}_5 + C_5 p^2 \bar{h}_6 + C_6 p^2 \bar{h}_7 - \sum_{i=1}^{n_2} (\bar{y}_i - y''_\pi) \bar{R}'_{iz}; \\ (D_1 p^2 + D_2 p + D_3) \bar{\varphi}''' = & ((D_4 p^2 + D_7 p + D_8) \bar{h}_5 + (D_5 p^2 + D_8 p + D_7) \bar{h}_6) + ((D_6 p^2 + D_9 p + \\ & + D_8) \bar{h}_7 + (D_7 p + D_8) (\bar{h}_7 + \bar{h}_8) - \sum_{i=1}^{n_1} [(\bar{z}_i - z'_\pi) \bar{R}'_{iz} - (\bar{x}'_i - x''_\pi) \bar{R}'_{iz}], \end{aligned}$$

где p – некоторое комплексное число.

Разрешая систему относительно изображений обобщенных координат по Лапласу, находим

$$\begin{aligned}\bar{\varphi}^{III} &= W_1(p)(\bar{h}_5 - \bar{h}_6) + W_2(p)(\bar{h}_9 - \bar{h}_8) - \sum_{i=1}^{n1} W_{3i}(p)\bar{R}_{iz}; \\ \bar{\varphi}^{III} &= W_4(p)(\bar{h}_5 - \bar{h}_6) + W_2(p)(\bar{h}_9 - \bar{h}_8) - \sum_{i=1}^{n1} [W_{6i}(p)\bar{R}_{ix} - W_{i7}(p)\bar{R}_{iz}]; \\ \bar{\psi}^{IV} &= W_8(p)\bar{h}_5 + W_7(p)\bar{h}_6 + W_7(p)\bar{h}_7 + W_8(p)(\bar{h}_8 - \bar{h}_7) - \sum_{i=1}^{n2} W_{12i}(p)\bar{R}'_{iz}; \\ \bar{\psi}^{IV} &= W_{13}(p)\bar{h}_5 + W_{14}(p)\bar{h}_6 + W_7(p)\bar{h}_7 + W_8(p)(\bar{h}_8 - \bar{h}_7) - \sum_{i=1}^{n2} [W_{7i}(p)\bar{R}'_{ix} - W_{8i}(p)\bar{R}'_{ix}]; \\ \Delta\bar{z}_i &= b'_5 h_5 + b'_6 h_6 + (\bar{x}_i - x'_\pi)\psi^{III} - \bar{y}_i \varphi^{III}; \\ \Delta\bar{z}_i &= c'_5 h_5 + c'_6 h_6 + c'_7 h_7 + (\bar{x}'_i - x''_\pi)\psi^{IV} (\bar{y}_i^I - \bar{y}_\pi^II)\varphi^{IV}.\end{aligned}$$

Таким образом, с применением методов статистической динамики получены линейные дифференциальные системы уравнений с постоянными коэффициентами. С использованием преобразования Лапласа получены системы алгебраических уравнений относительно изображений обобщенных координат.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бледных В.В. Устройство, расчет и проектирование почвообрабатывающих орудий. Челябинск: ЧГАА, 2010. – 201 с.
- [2] Бледных В.В., Рахимов Р.Ф. Почвообрабатывающие и посевные машины. Челябинск: ЧГАА, 2004. – 235 с.
- [3] Выгодский Н.Я. Справочник по математике. М.: Наука, 2006. – 460 с.

Ташкентский государственный технический университет
НИИСВиВ им. акад. М.М.Мирзаева

Дата поступления
16.04.2019

А.С. Садриддинов, А.Т. Мусурмонов. Бог оралигида тупроққа ишлов берувчи машина ҳаракати динамикасини ўрганиши

Мақолада кенг энламли уч секцияли бог культиваторининг кинематик ҳаракати асосида, эркинлик даражаси кўп бўлган мураккаб динамик тизимни ўзида акс эттирувчи ҳаракат тенгламаси тузилган.

A.S. Sadriddinov, A.T. Musurmonov. Studying dynamics of movement of a garden soil processing machine

In the article, based on the kinematics of the motion of a wide-spread three-section garden cultivator, equations of motion are compiled which are a complex dynamic system with many degrees of freedom.

О РЕЖИМЕ РАБОТЫ РЕАКТОРА

Рассматривается возможность стабилизации неустойчивого режима работы химического реактора с неоднородным кипящим слоем для одностадийной реакции. Определен диапазон параметра стабилизации, в котором можно получить устойчивый режим работы реактора. Построена область устойчивости среднего стационарного режима при идеальном регулировании в зависимости от гидродинамических параметров.

Как показал анализ влияния гидродинамических параметров на режим работы реактора [1] с неоднородным кипящим слоем, для адиабатического реактора ($\alpha=0$) в случае малой интенсивности массообмена между фазами ($A \ll 1$) стационарных режимов в зависимости от значений A , B , T_0'' , β , u_1 , u_2 , может быть от одного до трех, причем они соответствуют высокотемпературному, среднему и низкотемпературному режимам T_1^{01} , T_1^{02} , T_1^{03} . Обычно нижние и верхние стационарные режимы устойчивы [2].

В нижнем стационарном режиме T_1^{01} температура в реакторе слишком мала, чтобы реакция протекала достаточно эффективно, а в верхнем T_1^{03} она настолько велика, что это часто приводит к распаду продукта и возникновению побочных реакций.

Средний стационарный режим T_1^{02} обычно оказывается наиболее целесообразным с точки зрения проведения химико-технологических процессов. Но как раз этот режим не устойчив и возникает задача его стабилизации [3]. В связи с этим исследуем возможность стабилизации среднего режима работы реактора с использованием уравнений массо- и теплопереноса в безразмерном виде, которые имеют следующий вид:

уравнения для плотной фазы

$$\frac{\partial Z_1}{\partial \tau} + u_1 \frac{\partial Z_1}{\partial x} = (1 - Z_1)g \exp\left(-\frac{\beta}{T_1}\right) - A(Z_1 - Z_2), \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = \alpha(T_0' - T_1) + \omega u_1(T_0'' - T_1) + \omega g \exp\left(-\frac{\beta}{T_1}\right) \int_0^1 (1 - Z_1) dx - B\left(T_1 - \int_0^1 T_2 dx\right). \quad (2)$$

Начальные и граничные условия

$$\begin{aligned} \tau = 0: \quad T_1(0) &= T_0'', \quad Z_1(x, 0) = Z_{01}(x), \\ x = 0: \quad Z_1(0, \tau) &= 0; \end{aligned} \quad (3)$$

уравнения для разбавленной фазы

$$\frac{\partial Z_2}{\partial \tau} + u_2 \frac{\partial Z_2}{\partial x} = A(Z_1 - Z_2), \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial \tau} + u_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = B(T_1 - T_2). \quad (5)$$

Начальные и граничные условия

$$\begin{aligned} \tau = 0: \quad Z_2(x, 0) &= Z_{02}(x), \quad T_2(x, 0) = T_{02}(x, 0), \\ x = 0: \quad Z_2(0, \tau) &= 0, \quad T_2(0, \tau) = T_0''. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\text{Здесь } A = \frac{LA^*}{VC}; B = \frac{LB^*}{VT_0''}; g = k_0\tau_*; u_n = \frac{u_n^*}{v} \frac{X}{L}; \alpha = \alpha_s \frac{s\tau_*}{V\rho_*C_*}; \beta = \frac{E}{RT}; Z = \frac{C_0 - C_n}{C_0}; \tau = \frac{t}{\tau_*};$$

$$T_n = \frac{T_n^*}{T_0''}; x = \frac{X}{L}; W = \frac{E\rho_g C_g}{\rho_* C_*}; \rho_* C_* = \varepsilon \rho_g C_g + (1 + \varepsilon) \rho_s C_s,$$

где A^* и B^* – коэффициенты массо- и теплообмена между плотной и разбавленной фазами; C_n^* , C_0 – концентрация реагента в фазе n ($n=1$ соответствует плотной фазе, $n=2$ – разбавленной фазе) и на входе реактора; C_g , C_s – удельная теплоемкость катализатора и газа; E – энергия активации; h – теплота реакции; L – длина реактора; R – универсальная газовая постоянная; T_n^* , T_0' , T_0'' – температура соответствующих фаз, окружающей среды и температура поступающей смеси; t – время; V – объем реактора; u_n – скорость соответствующей фазы; u_n^* , v – скорость соответствующих фаз и потока ($v=(1-\chi)u_1+\chi u_2$); χ – объемная доля разбавленной фазы; X – координата, отсчитываемая по длине реактора; Z_n, Z_n^0 – степень продвижения реакции соответствующих фаз и в стационарном режиме реактора; ε – пористость слоя; ρ_g, ρ_s – плотность газа и катализатора; S – боковая сторона реактора; α_s – коэффициент теплопередачи.

В результате решения задачи (1 – 4) найдены выражения для исследования стационарных распределений степени продвижения реакции в плотной $Z_1^0(x)$, разбавленной $Z_2^0(x)$ фазах и при температуре $T_2^0(x)$ разбавленной фазы. Получено уравнение относительно стационарной температуры, решение которого дает значение стационарных температур для плотной фазы:

$$T_0'' - T_0' + \frac{1}{w} Z_1^0(1) + \frac{u_2}{wu} Z_2^0(1) - \frac{u_2}{wu_1} (T_2^0(1) - T'') = 0. \quad (7)$$

Для стабилизации неустойчивого режима работы реактора с неоднородным кипящим слоем в систему вводится пропорциональное регулирование скорости реагента в разбавленной фазе по отклонению температуры в плотной фазе реактора:

$$v_2 = v_{02} (1 + d(T_1(\tau - \tau_a) - T_1^{02})). \quad (8)$$

Здесь T_1^{02} – температура среднего стационарного режима плотной фазы при $v_2=v_{02}$; τ_a – время запаздывания, определяемое степенью инертности контроля; d – параметр стабилизации.

При определении области параметров стабилизации задача сводится к выявлению корней квазиполинома шестой степени.

Рассмотрим идеальное регулирование. Если запаздывающий аргумент $\tau_\beta=0$, то имеем:

$$\psi^*(p) = p^6 + a'_{11}p^5 + a'_{12}p^4 + a'_{13}p^3 + a'_{14}p^2 + a'_{15}p + a'_{16} + (a'_{21}p^3 + a'_{22}p^2 + a'_{23}p + a'_{24})\exp(-p/u_1) + (a'_{31}p^3 + a'_{32}p^2 + a'_{33}p)\exp(-p/u_2) + d((a'_{41}p^4 + a'_{42}p^3 + a'_{43}p^2 + a'_{44}p) + (a'_{51}p^3 + a'_{52}p^2 + a'_{53}p)\exp(-p/u)), \quad (9)$$

где a'_{is} – функции гидродинамических параметров реактора.

Для суждения о стабилизации режима работы химического реактора при идеальном регулировании достаточно иметь представление о знаках всех корней квазиполинома $\psi^*(p)$. Естественно, что более просто и эффективно, чем при обычном решении уравнения, особенно, когда такой порядок уравнений высок. Если найти соотношения между коэффициентами дифференциального уравнения системы, при которых вещественная часть корней характеристического уравнения меняется со знака минус на плюс, то тем самым будет сформулировано условие перехода процесса от устойчивого к неустойчивому режиму, а при обратном изменении знака, наоборот, от неустойчивого к устойчивому режиму.

Исследование устойчивости может проводиться в двух аспектах: 1) выяснить, является ли устойчивой данная конкретная система при вполне определенных численных значениях ее параметров; 2) некоторые параметры могут быть не заданы и цель исследования будет заключаться в нахождении всех тех значений этих параметров, при которых система устойчива, т.е. в нахождении области устойчивости системы по тем или иным ее параметрам.

Второй подход особенно важен, поскольку он позволяет не только проверить устойчивость уже действующей системы, но и выбрать параметры проектируемых установок. Именно этот второй подход и реализуется с помощью метода D -разбиения [4].

Согласно изложенному, область стабилизации при значениях параметров $A=0.01$; $B=0.4$; $u_1=1.2$; $T_1^0=1.7$; $\beta=50$; $W=0.8$; $T_1''=1.6 - 1.8$ квазиполинома (9) показана на рис. 1.

Как установлено расчетами, с увеличением интенсивности массообмена между фазами происходит сужение области стабилизации параметра d . Судя по рис. 2, влияние температуры поступающей среды T_0'' оказывается существенным, т.е. правая граница области резко увеличивается.

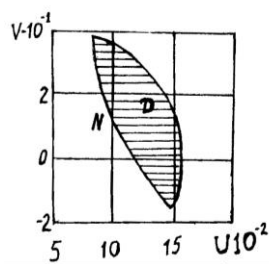


Рис. 1. D -область стабилизации: линия N – её граница на область стабилизации D

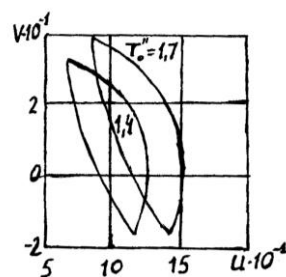


Рис. 2. Влияние температуры поступающей среды

Таким образом, можно утверждать, что при изменении значений гидродинамических параметров реактора с неоднородным псевдооживленным слоем область стабилизации параметра всегда остаётся ограниченной. Это свидетельствует о возможности подбора параметров системы для стабилизации неустойчивого режима работы реактора во взвешенном слое.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Абдурахимов А. Работа реактора в псевдооживленном слое // Труды VII Международной конференции по математическому моделированию. Якутск, 2014. С. 114 – 116.
- [2] Гупало Ю.П., Абдурахимов А.А., Джуманиязов К.А. Об одной модели химического реактора с неоднородным псевдооживленным слоем // ТОХТ. 1989. Т. XXII. № 6. С. 772 – 776.
- [3] Гупало Ю.П., Рязанцев Ю.С. О термомеханической неустойчивости стационарного режима работы проточного химического реактора с неподвижным слоем катализатора // Изв. АН СССР. ЖГ. 1968. № 2. С. 64.
- [4] Горяченко Д.В. Устойчивость систем с запаздыванием. Горький, 1975. – 142. с.

Ташкентский архитектурно-строительный институт

Дата поступления
13.05.2019

А.А. Абдурахимов. Реакторнинг иш ҳаракати тўғрисида

Мақолада суюлтирилган қатламда реакторнинг статционар бўлмаган иш режасини стационар ҳолга келтиришни суюлтирилган фаза тезлиги билан қуюқ фаза иссиқликлари пропорционал бўлган регулятор киритиш орқали ҳал этилган. Модел икки фазали назарияга асосланган, системанинг статционар иш режасини тортиш олтинчи тартибли полиномнинг илдизларини аниқлашга келтирилган.

A.A. Abdurahimov. About the mode of operation of the reactor

Task of stabilization of unstable mode of operation reactor with pseudo-compressed liquid by a layer here is decided, by a introduction in system of proportional regulation of speed reagent of the diluted phase, on a deprivation of temperature of a dense phase reactor. The model is based on the biphasе theory of current of gas through pseudo-compressed liquid a layer.

К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ, ПОВРЕЖДАЕМОСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ВЯЗКОУПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЛ ПРИ СЛОЖНЫХ ЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЖЕНИЯХ (ОБЗОР)

Повышение прочности, снижение материалоемкости, интенсификация рабочих параметров конструкций—наиболее важные условия повышения эффективности их применения в отраслях строительства, машиностроения, энергетики. Как известно, работа большинства несущих элементов тонкостенных конструкций происходит на фоне выхода материалов за пределы упругости в наиболее напряженных участках, что при действии циклических нагрузок приводит к возникновению ряда дополнительных явлений, таких, как возникновение вторичных пластических деформаций, изменение диаграмм деформирования от цикла к циклу, проявление свойств циклического упрочнения-разупрочнения, теплообразование, явление ползучести и релаксации, виброползучести, накопление повреждений и распространение трещин [1 – 6].

Исследования процессов циклического деформирования упругопластических и вязкоупругопластических тел, разработки методов и алгоритмов расчета, анализ НДС элементов конструкций и сооружений за пределами упругости при циклических нагрузках с учетом накопления повреждаемости приобрели особую актуальность [7 – 12].

Следует отметить, что в последние годы интенсивно развивается подход, основанный на введении макроскопического параметра, характеризующего на макроуровне степень поврежденности материала (скалярного, векторного, тензорного характера) [1, 13 – 15].

В статье Я.Хульта [16] приводится обзор концепции поврежденности, принадлежащей Пальмгрену-Майнеру, Л.М. Качанову и Ю.Н. Работнову. Как известно, концепция (гипотеза) поврежденности возникла при интерпретации испытаний элементов конструкций на усталостную прочность. На основании этих испытаний были предложены линейный закон накопления повреждений. Совершенно аналогичное определение повреждений ползучести было предложено Робинсоном.

Различные варианты критериев на длительную и малоцикловую прочность предложены И.А.Биргером, В.С.Бондарем, В.Н.Кукуджановым, Ю.Г.Коротких, А.А.Лебедевым, А.М.Локощенко, Н.А.Махутовым, Г.В.Москвитным, С.В.Серенсенем, В.Т.Трощенко, Г.П.Черепановым, С.А.Шестериковым и др.

Ряд экспериментов на усталостную прочность, а также на разрыв при ползучести, проводившихся при сильно меняющихся нагрузках, показали, что линейный критерий разрушения в ряде случаев не выполняется [5, 9, 17, 18].

В работе [19] отмечается, что процессы накопления повреждений являются многомасштабными и многостадийными кинетическими процессами. Они развиваются одновременно на разных масштабных уровнях. Процессы накопления повреждений являются сильно нелинейными и зависящими от истории нагружения конструктивного элемента. С точки зрения механики сплошных сред (МСС), стадия развития распределенных микродефектов описывается механикой поврежденной среды (МПС), а стадия распространения макротрещин – механикой разрушения (МР). Отмечается, что для адекватного моделирования процесса разрушений в этой области необходимо сближение границ МПС и МР.

В статье А.А. Лебедева [17] отмечено, что различие физической природы отдельных повреждений, их геометрии и размеры, а также масштабная стадийность развития требуют использования разных подходов при построении феноменологических моделей, в частности, описывающих кинетику накопления повреждений. В отдельных нормативных документах наряду с определением текущих коэффициентов запаса прочности конструкции, по пределам текучести и прочности материала, предусматривается обязательная оценка коэффициентов запаса по поврежденности материала. В механике материалов поврежденность обычно связывают с влиянием различных механических воздействий на сопротивление материалов. Для прогнозирования кинетики рассеянных повреждений в материале на разных стадиях деформирования при статическом нагружении разработана модель накопления повреждений[17].

В работе [5] рассмотрены современные проблемы оценки сопротивления материалов и элементов конструкций действию широкого круга повреждающих факторов. Обосновывается применение уравнений состояния, моделей деформирования и разрушения при кратковременном и длительном, малоцикловом и многоцикловом нагружениях.

В книге В.В. Болотина [20] изложены вопросы прогнозирования ресурса на стадии проектирования и теория надежности конструкций. Рассмотрены полуэмпирические и структурные модели накопления повреждений, зарождения и роста усталостных трещин при циклических нагружениях.

В монографии Ю.И. Лихачева [21] рассмотрена теория расчета НДС и поврежденности элементов ядерных реакторов с учетом особенностей термомеханического нагружения за пределом упругости, а также поведения конструкционных и делящихся материалов в условиях облучения. Учитывается влияние облучения на длительные и кратковременные механические свойства материалов. Для оценки ресурса элементов конструкции предложено кинетическое уравнение повреждаемости.

Статья А.Б. Киселева [22] посвящена проблеме построения математических моделей повреждаемых термоупруговязкопластических сред и методы определения «нестандартных» констант моделей, связанных с параметрами поврежденности и подлежащие экспериментальному определению.

В монографии В.П.Тамужа и В.С.Куксенко изложены методы обнаружения субмикротрещин посредством измерения дифракции рентгеновских лучей и данные о накоплении дефектов в полимерах и изменения механических свойств материалов. Предложен вариант феноменологической теории повреждаемости и проведен соответствующий расчет долговечности. В работе дан анализ нелинейного деформирования анизотропного материала на примере однонаправленного композита и поиска связи накопления повреждений при циклическом асимметричном нагружении с особенностями пластического деформирования.

В работе [23] излагаются теоретические основы механики растущих вязкоупругих и вязкоупругопластических тел. Дается постановка начально-краевой задачи для наращиваемого тела как в случае малых, так и в случае конечных деформаций с учетом возрастной неоднородности и старения материалов. Рассматриваются задачи длительной прочности, устойчивости и оптимизация растущих тел и элементов конструкции.

В работе В.Н. Кукуджанова [11] рассматривается компьютерное моделирование процессов деформирования, поврежденности и континуального разрушения нелинейных материалов и конструкций. Основное внимание уделяется численному моделированию задач механики сплошных сред.

В книге [13] проанализированы вопросы прогнозирования длительных деформационно-прочностных свойств полимерных и композиционных материалов. Изложены методы прогнозирования, основанные на температурно-временной и напряженно-временной аналогии. Приведены результаты экспериментального исследования прочности различных материалов и модели длительной прочности, основанные на концепции накопления повреждений.

В [24] рассматривается проблема образования остаточных напряжений и моделирования напряженно - деформированного состояния в упрочненном слое элементов конструкций. Приведены результаты испытаний на ползучесть материалов и оценки длительной прочности при сложном напряженном состоянии с учетом поврежденности.

В монографии А.М. Локощенко [18] на базе теории ползучести Ю.Н. Работнова [25] разработаны модели длительной прочности для конструкционных материалов (металлов) на основе экспериментальных и теоретических исследований. При описании длительной прочности используется структурный параметр, который является некоторой мерой «растрескannости» материала. Ползучесть материала с учетом повреждаемости описывается системой уравнений

$$\dot{\rho} = f(\sigma, \omega), \quad \dot{\omega} = \varphi(\sigma, \omega) \quad (1)$$

В частности, уравнения (1) представляются в следующих видах:

$$\dot{\rho} = a\sigma^n(1-\omega)^{-s}, \quad \dot{\omega} = b\sigma^k(1-\omega)^{-r} \quad (2)$$

или

$$\dot{p} = a \frac{sh(\sigma/c)}{(1-\omega)^n}, \quad \dot{\omega} = b \sigma^k \frac{1}{(1-\omega)^k} \quad (3)$$

Уравнения кривой ползучести построены при постоянном напряжении. Отмечается, что введение различных функциональных соотношений для учета влияния напряжений на скорость ползучести и на скорость накопления повреждений дают возможность описать немонотонную зависимость деформации разрушения от уровня напряжений. Описаны методы моделирования ползучести и длительной прочности металлов в агрессивных средах [18]. Предложены кинетические уравнения для моделирования разрушенного поверхностного слоя и приведены решения типичных задач при различных граничных условиях.

В сборнике трудов С.А.Шестрикова [26] приведен ряд оригинальных статей в области механики деформируемого твердого тела – в теории ползучести, механике разрушения, устойчивости, пластичности. В некоторых статьях дан критический анализ дальнейшего развития как теоретических, так и экспериментальных исследований в области ползучести и длительной прочности материалов. Рассмотрены вопросы, связанные с разработкой частных видов кинетических уравнений и описание экспериментальных результатов. Предложены соотношения ползучести для двух кинетических параметров поврежденности:

$$\omega_1 = f_1(\sigma, T, \omega_1, \omega_2), \quad \dot{\omega}_2 = f_2(\sigma, T, \omega_1, \omega_2). \quad (4)$$

Уравнения состояния представлены в виде

$$\dot{p} = \Phi(p, \sigma, T, \omega_1, \omega_2). \quad (5)$$

Предельное состояние определяется условием

$$\max\{\omega_1, \omega_2\} = 1. \quad (6)$$

Отмечается, что такое представление процесса накопления повреждений позволяет описать ряд наблюдаемых в экспериментах явлений. В частности, соотношения (4) записано в форме:

$$\dot{\omega}_1 = A_1 \left[\frac{\sigma}{(1-\omega_1)} \right]^{n_1}, \quad \dot{\omega}_2 = A_2 \left[\frac{\sigma}{(1-\omega_2)} \right]^{n_2}. \quad (7)$$

В статье [27] выполнен анализ системы (4) в случае учета взаимного влияния ω_1 и ω_2 . Здесь показано, что кривая длительной прочности в логарифмических координатах имеет вид ломанной. Точки пересечения двух прямых определяет напряжение σ_* , при котором одновременно ω_1 и ω_2 достигают заодно и то же время своего критического значения.

Общая формулировка феноменологического подхода к описанию в тензорном виде накопления повреждений дана А.А.Ильюшиным [1, 28].

В монографии [1] изложены основы механики вязкоупругих сплошных сред при изотермических и неизотермических процессах деформирования. Дана постановка и методы решения нелинейных задач, установлены соотношения между напряжениями и деформациями физической нелинейной теории термовязкоупругости изотропных и анизотропных сред. Данная теория обобщена на случай конечных деформаций.

В работах В.В.Москвитина [3, 29] рассмотрены некоторые виды уравнения состояний, описывающие упругопластические и вязкопластические свойства материалов с учётом накопления повреждений, а также критерии длительной прочности при исходном состоянии и при переменном нагружении.

Фундаментальные основы общей математической теории пластичности при сложных нагружениях предложены А.А.Ильюшиным [30]. В основе законов связей напряжений и деформаций в общем случае при сложном нагружении и при сложном напряженном состоянии лежат следующие постулаты А.А.Ильюшина: условие однозначности, постулат изотропии, гипотеза о разгрузке и деформационная анизотропия, постулат пластичности. Они получили экспериментальное подтверждение в работах В.С.Ленского, Р.А.Васина, В.Г.Зубчанинова, А.С.Кравчука, К.Ш.Бабамурадова, Р.А.Абиров, В.И.Малого и И.В.Кнетса.

Разработанная А.А. Ильюшиным общая математическая теория пластичности основывается на созданный им специальный векторный аппарат, который позволяет наглядно представить процесс изменения во времени механического состояния в окрестности некоторой точки тела. Отсюда следует ряд экспериментально оправданных постулатов [30, 31], ограничивающих вид возможных соотношений между напряжениями и деформациями.

Постулат изотропии математически формулируется следующим образом: связь любого физического вектора $\bar{\chi}$ (в том числе вектора напряжений $\bar{\sigma}$) с процессом деформации для начальных изотропных материалов определяется соотношением [30]

$$L'(\bar{\sigma}) = L(\bar{\varepsilon}), \quad (8)$$

где L', L – векторно-линейные операторы $\bar{\sigma}$ и $\bar{\varepsilon}$ по времени общего вида.

Согласно (8), вектор напряжений $\bar{\sigma}$ представляется в виде

$$d\bar{\sigma} = Nd\bar{\varepsilon} + (N_1\bar{\varepsilon} + N_2\bar{\sigma})ds, \quad (9)$$

где N, N_1, N_2 определяются из опытов.

Отмечается, что из постулата изотропии следует инвариантность образа процесса деформирования относительно вращения и отражения в пятимерном пространстве деформаций.

Для проверки постулата изотропии проведены испытания образцов из различного материала по двум или нескольким траекториям деформаций с одинаковой внутренней геометрией и изучены ориентации векторов напряжений относительно траекторий и значения их модулей в соответствующих точках траекторий. Экспериментальные исследования, проведенные В.Г.Зубчаниновым, Р.А.Васиным, К.Ш.Бабамурадовым и Р.А.Абировым, Г.А.Доцинским и В.И.Максаком, Л.С.Андреевым и др., подтверждают выполнение постулата изотропии для ряда начальной изотропных материалов.

Гипотеза о разгрузке формулируется следующим образом: для каждой точки траектории деформаций существует поверхность в пространстве деформаций, разделяющая область пассивных и активных деформаций; в пределах области, ограниченной этой поверхностью, пластические деформации не меняются, а упругая деформация является однородной линейной функцией напряжений. А.А.Ильюшин описанную поверхность назвал поверхностью текучести.

В этом случае выражение (9) для определения приращения напряжений будет иметь вид [30]

$$\delta\bar{\sigma} = N\delta\bar{\varepsilon} - (N - P) (\bar{t} \cdot \delta\bar{\varepsilon})\bar{t}, \quad (10)$$

где N – модуль упругой разгрузки по направлению нормали к $\bar{t}$, т.е. он зависит только от $|\bar{\varepsilon}_k|$;

P – функция $|\bar{\varepsilon}_k|$ и угол поворота Θ . Закон разгрузки, когда $\Theta > \Theta_k \left(\Theta_k \approx \frac{\pi}{2} \right)$, имеет вид

$$\bar{\sigma} = N\bar{\varepsilon}^e - (N - P_k)(\bar{t} \cdot \bar{\varepsilon}^e)\bar{t}, \quad (11)$$

где P_k – модуль разгрузки по направлению t . На основе приведённых зависимостей при определённом выборе функций N и P можно получить различные варианты теории [32].

Постулат пластичности формулируется следующим образом: тело из заданного состояния равновесия через другие состояния равновесия можно вернуть в исходное деформированное состояние только при условии затраты неотрицательной работы внешних сил. Работа будет положительна, если процесс сопровождался изменением пластических деформаций, и равна нулю при изменении только упругих деформаций [30].

Приведем теперь принцип запаздывания: угол между вектором напряжения и касательной к траектории деформаций в некоторой точке этой траектории зависит не от всей предыдущей траектории, а только от некоторого конечного участка её длиной h , называемого следом запаздывания [30]. Траектория деформаций, для которой во всех точках за пределом упругости кривизна χ меньше $1/h$, называется траекторией малой кривизны, иначе – траекторией большой кривизны. Принцип запаздывания подтвержден исследованиями В.С.Ленского [33], Р.А.Васина [34] и др. Экспериментальные результаты, полученные С.А.Елсуфьевым и О.А.Шишмаревым, в свою оче-

редь показывают, что длина следа запаздывания не всегда будет постоянной величиной и в общем случае зависит от степени сложности траектории деформирования [32]. Дальнейшее исследование общих свойств вектора напряжений, являющегося функционалом образа процесса деформирования, проведено В.И.Малым. Им показано, что при определённом понимании внутренней геометрии траектории деформаций следствие постулата изотропии, определяющее форму функционала напряжений, сохраняет свою формулировку и в общем случае кусочно-гладких траекторий деформирования.

Отметим также некоторые работы зарубежных ученых, посвященные неизотермическому поведению неупругих твердых тел в различных аспектах: Койтера, Циглера, Прагера, Фрейдентала и Гейрингера, Нагди, Дракера, Ольшака, Мруза и Пежины и др.[32].

Теория сплошной среды в наиболее общей постановке, т. е. без ограничений, связанных с малостью деформаций, изотропностью и изотермичностью, предложена Грином и Нагди [35], причем определяющие уравнения выведены на основе законов необратимой термодинамики. Основываясь на теории упругости Трусделла и Нолла [36], Грин установил определяющие уравнения для пластических упрочняющихся тел. Анализ выполнен как для несжимаемого, так и для сжимаемого материала, подвергаемого большим деформациям [35].

Для описания механических свойств материала и процессов деформирования установлено единое аналитическое выражение В.Д.Клюшниковым. Проведен анализ различных вариантов тензорно-линейных соотношений в теории пластичности Ю.И.Кадашевичем и В.В.Новожиловым.

В.В.Москвитиным [3] сформулированы основные уравнения переменной пластичности и вязкопластичности, доказаны теоремы о переменном нагружении, о вторичных пластических деформациях. Рассмотрены вопросы циклической и длительной прочности элементов конструкций. Им предложен один из вариантов связи напряжений и деформаций в случае траекторий в виде прямых линий, не проходящих при сложных циклических нагружениях через начало координат.

Для анализа упругопластического и вязкопластического деформирования несущих элементов конструкций при циклических нагружениях с учетом накопления повреждений и оценки влияния циклических свойств материалов используются обобщенный принцип Мазинга – Москвитина, обобщенная диаграмма деформирования Гусенкова – Шнейдеровича и диаграмма циклического деформирования в текущих координатах Т.Буриева. Учет циклических диаграмм деформирования позволяет более эффективно произвести расчет на малоцикловую прочность и деформируемость упругопластических и вязкопластических элементов конструкций.

На основе теории малых упругопластических деформаций в работе Т.Буриева [10] сформулированы алгоритмические системы расчета тонкостенных конструкций при повторно-переменном нагружении в текущих величинах с учетом циклических свойств материалов и накопления повреждений.

В.Г.Зубчаниновым [37] получены дифференциально нелинейные определяющие соотношения в векторных пятимерных пространствах деформаций и напряжений в двух основных формах- локальной и нелокальной. Приведены математические модели теории процессов и течений для траекторий деформирования средней, малой кривизны и кручения.

В работах Р.А.Васина [34, 38] изложены экспериментальные результаты, рассмотрены некоторые вопросы общей математической теории пластичности Ильюшина, сформулированы варианты соотношений между напряжениями и деформациями для траекторий в виде двухзвенных ломаных, а также численно-экспериментальные методы решения краевых задач теории пластичности СН-ЭВМ.

Рассматриваются деформирования и разрушения конструкционных сталей и сплавов при циклических, а также при многоосном непропорциональном нагружении в [9, 19, 37, 39]. Приводятся основные положения и уравнения теории пластического деформирования, а также результаты экспериментов на малоциклового усталости.

В статье Г.Л.Бровко [40] представлены результаты исследований определяющих соотношений по классическим моделям сплошных сред и обобщенных на область конечных деформаций. В работах [41 – 47] исследованы упругопластические свойства материалов при конечных перемещениях и деформациях.

Работа Р.А.Абирова [48] посвящена построению определяющих соотношений на основе экспериментального исследования, определены области физической достоверности теории пластичности применительно к процессам сложного нагружения, а также экспериментально доказана

сходимость метода СН-ЭВМ при различных вариантах аппроксимации определяющих соотношений.

Упругопластическому деформированию материалов при простом и сложном нагружении посвящена работа В.В.Косарчука, в которой предложено экспериментально обоснованное определяющее соотношение теории пластичности анизотропных сред.

Известно, что современные композиционные материалы обладают широким спектром физико-механических и прочностных свойств. Теоретические основы механики композиционных и анизотропных материалов, методы экспериментального определения параметров изложены в книге Б.Е.Победря [4, 49]. В работе А.М.Каримова [14] метод осреднения [4] обобщается применительно к динамическим задачам вязкоупругих композиционных материалов регулярной структурой в произвольной криволинейной системе координат. Изучению анизотропно-пластических сред посвящена работа [50], в которой предлагается модель пластичности и термопластичности на основе теории течения.

В работе Дж.Ф.Белла [51] рассматривается возникновение малых и конечных деформаций в различных условиях, в различных телах и, в частности, с учетом предшествующей истории напряженного состояния. Им представлен капитальный исторический обзор и приведены экспериментальные основы МДТТ.

Отметим, что ввиду сложности задач теории пластичности при сложных нагружениях, их эффективное решение возможно лишь численными методами с применением персональных компьютеров. Наиболее распространенными методами решения краевых задач пластичности и вязкопластичности являются методы конечных разностей, конечных элементов и граничных элементов. Создание программных средств составляет одну из составных частей алгоритмической системы расчета конструкций при циклических нагружениях с учетом конечных (малых) деформаций, так как достоверности расчетов и надежность проектных решений конкретных классов задач непосредственно зависят от адекватности выбираемых математических моделей, методов решения и краевых условий.

В процессе решения краевых задач тонкостенных конструкций при циклических нагружениях применяется комбинация методов перехода от систем дифференциальных уравнений в частных производных к системам нелинейных алгебраических или обыкновенных дифференциальных уравнений и методов их решения [7, 52 – 55].

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ильюшин А.А., Победря Б.Е. Основы математической теории термовязкоупругости. М.: Наука, 1970. – 280 с.
- [2] Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. – 311 с
- [3] Москвитин В.В. Циклические нагружения элементов конструкций. М.: Наука, 1981. – 344 с.
- [4] Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. М.: Изд. Московского ун-та, 1984. – 336 с.
- [5] Трощенко В.Т., Лебедев А.А., Стрижало В.А. и др. Механическое поведение материалов при различных видах нагружениях. Киев, 2000. – 571 с.
- [6] Шевченко Ю.Н., Бабешко М.Е., Терехов Р.Г. Термо-вязкопластические процессы сложного деформирования элементов конструкций. Киев: Наукова думка, 1992. – 328с.
- [7] Абдусаттаров А., Даминов А.Д. Циклическое деформирование вязкоупругопластических систем с учетом упрочнения-разупрочнения и накопления повреждений. Ташкент: Фан, 1996. – 162 с.
- [8] Березин А.В. Влияние повреждений на деформационные и прочностные характеристики твердых тел. М.: Наука, 1990. – 135 с.
- [9] Бондарь В.С. Термовязкопластичность. Теория и эксперименты // Упругость и неупругость М.: Изд-во Московского университета, 2011. С. 122 – 128.
- [10] Бурiev Т. Алгоритмизация расчета несущих элементов тонкостенных конструкций. Ташкент: Фан, 1986. – 244с.
- [11] Кукуджанов В.Н. Компьютерное моделирование деформирования, повреждаемости и разрушения неупругих материалов и конструкций. М.: МФТИ, 2008. – 215 с.
- [12] Старовойтов Э.И. О переменном нагружении вязкопластических трехслойных пологих оболочек // Вестник МГУ. Сер.1, мат.мех. 1980. №2. С. 92 – 96.
- [13] Гольдман А.Я. Прогнозирование деформационно-прочностных свойств полимерных и композиционных материалов. Л.: Химия, 1988. – 272 с.
- [14] Каримов А.М. Некоторые методы решения динамических задач вязкоупругих композитов квазипериодической структуры // Узбекский журнал «Проблемы механики». Ташкент, 2018. №1. С. 21 – 24.
- [15] Регель В.Р., Слуккер А.И., Томашевский Э.Б. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука, 1974. – 560 с.

- [16] Хульт Я. Поврежденность и распространение трещин // Механика деформируемых твердых тел. М.: Мир, 1983. – 346 с.
- [17] Лебедев А.А. Новые методы и результаты исследования развития рассеянных повреждений в деформируемом материале // Современные проблемы ресурса материалов и конструкций. М.: МАМИ, 2009. С. 3 – 16.
- [18] Локощенко А.М. Моделирование процесса ползучести и длительной прочности материалов. М.: МГУ, 2007. – 268 с.
- [19] Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. М.: Физматлит, 2008. – 424 с.
- [20] Болотин В.В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций. М.: Машиностроение, 1984. – 312 с.
- [21] Лихачев Ю.И. Прочность тепловыделяющих элементов ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1975. – 250 с.
- [22] Киселев А.Б. Модели необратимого динамического деформирования и микроразрушения повреждаемых сред // Упругость и неупругость. М.: Изд-во МГУ, 2001. С. 381 – 383.
- [23] Арутюнян Н.Х., Дроздов А.Д., Наумов В.Э. Механика растущих вязкоупругопластических тел. М.: Наука, 1987. – 472 с.
- [24] Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. М.: Машиностроение. Т. 1. 2005. – 226 с.
- [25] Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкции. М.: Наука, 1966. – 752 с.
- [26] Шестериков С.А. Избранные труды. М.: Изд-во Московского университета, 2007. – 242 с.
- [27] Неместникова И.В., Шестериков С.А. Векторное представление параметра поврежденности // Деформирование и разрушение твердых тел. М.: МГУ, 1985. С. 43 – 52.
- [28] Ильюшин А.А. Механика сплошной среды. М.: Изд. Моск. ун-та, 1990. – 310 с.
- [29] Москвитин В.В. Сопротивление вязкоупругих материалов (применительно к зарядам ракетных двигателей на твердом топливе) М.: Наука, 1972. – 328 с.
- [30] Ильюшин А.А. Пластичность. Основы общей математической теории. М.: Изд-во. РАН, 1963. – 271 с.
- [31] Бабамуродов К.Ш., Ильюшин А.А., Кабулов В.К. Метод СН-ЭВМ и его приложения к задачам теории пластичности. Ташкент: Фан, 1987. – 288 с.
- [32] Кнетс И.В. Основные современные направления математической теории пластичности. Рига: Зинатие, 1971. – 146 с.
- [33] Ленский В.С. Экспериментальная проверка основных постулатов общей теории упругопластических деформаций // Вопросы теории пластичности. М.: Изд-во РАН, 1961. С. 58 – 82.
- [34] Васин Р.А. Теория упругопластических процессов и экспериментальная пластичность // Упругость и неупругость. М.: Изд-во Московского университета, 2011. С. 44 – 51.
- [35] Green A., Naghdi P. A general theory of an elastic-plastic continuum // Arch. Rat. Mech. Anal. N. 18. 1965. P. 251.
- [36] Truesdell C., Noll W. The non-linear field theories of Mechanics. Handbuch der Physik. III/3 Berlin: Springer Verlag, 2004. – 602 p.
- [37] Зубчанинов В.Г. Механика процессов пластических сред. М.: Физматлит, 2010. – 352 с.
- [38] Васин Р.А., Моссаковский П.А. Теория упругопластических процессов при конечных деформациях: обобщение постулата изотропии // Матер. науч. конференции Института механики МГУ. М.: 1999. С. 219 – 220.
- [39] Tanaka E., Murakami S., Ooka M. Effects of strain path shapes on nonproportional cyclic plasticity // Journal Mech. Phys. Solids. Vol. 33. 1985. № 6. P. 559 – 575.
- [40] Бровко Г.Л. Понятия образа процесса и пятимерной изотерпии свойств материалов при конечных деформациях // ДАН. 1989. Т. 308. № 3. С. 565 – 570.
- [41] Левитас В.И. Большие упругопластические деформации материалов при высоком давлении. Киев: Наукова думка, 1987. – 231 с.
- [42] Лепик Ю.Р. Равновесие гибких упругопластических пластинок при больших прогибах // Инж. сб. 1956. № 24. С. 53 – 58.
- [43] Поздеев А.А., Трусов П.В., Няшин Ю.И. Большие упругопластические деформации. М.: Наука, 1986. – 232 с.
- [44] Финошкина А.С. Модели пластичности при конечных деформациях: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: МГУ, 2003. – 22 с.
- [45] Маркин А.А., Толоконников Л.А. Меры и определяющие соотношения конечного упругопластического деформирования // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Изд-во Горьковского ун-та, 1987. С. 32 – 37.
- [46] Муравлёв А.В. Экспериментальные методики исследования механических свойств термовязкопластических материалов при сложном нагружении конечных деформаций // Упругость и неупругость. М.: Изд-во Московского университета, 2011. С. 216 – 220.
- [47] Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упругопластического разрушения. М.: Наука, 1985. – 504 с.
- [48] Абиров Р.А. Развитие математической модели пластичности с учетом деформирования материалов при сложном нагружении: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Ташкент, 2014. – 52 с.
- [49] Победря Б.Е. О моделях поврежденности реальных сред // Изв. РАН. МТТ. 1998. № 4. С. 128 – 148.
- [50] Халджигитов А.А., Полатов А.М., Адамбаев У.Э. и др. Математическое и численное моделирование напряженного состояния упругопластических трансверсально-изотропных тел // Матер. Междуна-род. науч. конф. «Ал-Хорезми 2012». Ташкент, 2012. Т. 1. С. 246 – 250.
- [51] Белл Дж.Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. М.: Наука, 1984. – 596 с.

- [52] Абдусаттаров А. О развитии теории пластичности А.А. Ильшина при сложных циклических нагружениях // Вестник ТашИИТ. 2017. № 2/3. С. 98 – 105.
- [53] Абдусаттаров А., Юлдашев Т., Маткаримов А.Х. и др. Численные методы расчета несущих элементов тонкостенных конструкций при пространственном нагружении. Ташкент: Узбекистан, 2015. – 160 с.
- [54] Абдусаттаров А., Собиров Н.Х., Исомиддинов А.И. Исследование кинетики напряжённого состояния тонкостенных упругопластических стержней с учетом диаграммы циклического деформирования и повреждаемости // Вестник ТашИИТ. 2019. № 1. С. 47 – 57.
- [55] Абдусаттаров А., Сабиров Н.Х. К решению разностных краевых задач составных оболочечных конструкций // Узбекский журнал «Проблемы механики». Ташкент, 2018. № 1. С. 6 – 12.

Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

Дата поступления
22.05.2019

А. Абдусаттаров. Қовушқоқ эластик-пластик жисмларнинг мураккаб такрорий юкланишлар таъсирида деформацияланиши, емирилиши ва узоқ муддатли мустаҳкамлиги жараёnlарини бaшopaт қилиш

Мақoлада мураккаб такрорий юкланишлар таъсиридаги қовушқоқ эластик-пластик жисмларнинг деформацияланиши емирилиши ва узoқ мудатли мустаҳкамлигини бaшopaт қилиш масалалари қаралган.

A. Abdusattarov. To the prediction of deformation processes, damageability and long-term strength of viscoelastic-plastic bodies under complex cyclic loading

The article considers the issues of forecasting processes of complex cyclic deformation, damageability and long-term strength of viscoelastic-plastic bodies.

УДК 624.131

Х.А. БАЙБУЛАТОВ, У.Ю. ХАМДАМОВ, Ж.Г. ГАЙИБОВ

ХАРАКТЕРНЫЕ ДЕФЕКТЫ И ПОВРЕЖДЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ ОПОРНЫХ ЧАСТЕЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ

Многие мостовые сооружения на автомобильных дорогах имеют большой срок эксплуатации, построены по старым нормам и технологиям, находятся в неудовлетворительном состоянии и требуют серьезной реконструкции и ремонта. Техническое состояние мостов характеризуется наличием большого числа дефектов и повреждений, которые значительно снижают эксплуатационную надежность.

Дефект – отдельное несоответствие конструкции или сооружения в целом какому-либо параметру, установленному проектом или нормативным документом (КМК, ШНК, МШН, ИКН, О'zDst и т.д.).

Повреждение – неисправность, полученная конструкцией при изготовлении, транспортировании, монтаже или эксплуатации.

Большой проблемой является недостаточная ширина габаритов проезда и тротуаров, малая высота ограждений безопасности, повреждения деформационных швов и гидроизоляции [1].

К наиболее распространенным повреждениям несущих конструкций относятся: разрушение защитного слоя бетона, обводнение, выщелачивание, размораживание цементного камня, коррозия арматуры, повреждения от ударов негабаритных грузов и др. Фактическая долговечность автодорожных мостов низка, средний срок службы железобетонных мостов составляет 30 – 35 лет.

Одной из основных причин уменьшения срока службы мостовых сооружений являются дефекты и повреждения опорных частей (рис. 1). Дефекты опорных частей, как правило, приводят к серьезным последствиям в нарушении работы всего сооружения:

- 1) неправильной работе пролетного строения на температурные воздействия;
- 2) разрушению торцов балок пролетных строений;
- 3) разрушению несущих конструкций, насадок, ригелей опор; обрушению пролетных строений;
- 4) нарушению безопасности движения.

Дефекты опорных частей в большинстве своем относятся к дефектам III категории по МШН 4-04. Исправление дефектов опорных частей связано с большими затратами на подъемку пролетных строений [2]:



Рис. 1. Разрушение конструкций пролетных строений по причине отсутствия или недостаточной подвижности опорных частей

1. Скользящие металлические и тангенциальные опорные части с железобетонными валками:

- поверхностная, пластовая или очаговая коррозия; отсутствие графитовой смазки поверхностей скольжения;
- загрязнение опорных частей;

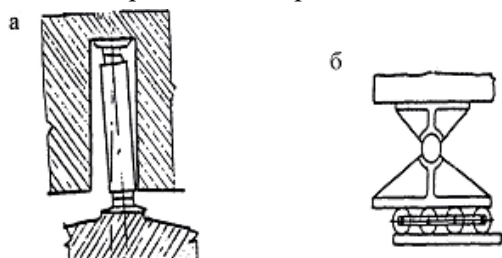


Рис. 2. Перекос (а) и угон (б) опорных частей

- износ соприкасающихся рабочих поверхностей;
- срез фиксаторов, отсутствие стопорных и противоугонных элементов; износ зубьев противоугонных планок;
- заклинивание поверхностей скольжения или катания;
- неправильное положение подвижных элементов, взаимное смещение балансиров или металлических подкладок, угон и перекас катков (рис. 2, 3);



Рис. 3. Угон металлических опорных частей

- недопустимый завал валков (угол наклона валка к вертикали), способный вызвать их заклинивание;
- завал срезанных катков, способный вызвать их заклинивание;
- отсутствие опорных частей или одного из балансиров;
- отсутствие или срез болта в креплении соединительных планок;
- трещины, сколы, раздавливание железобетонных валков;
- неисправность, повреждение или отсутствие защитного кожуха, футляра;
- в валковых опорных частях, расположенных в колодце: отсутствие эластичного заполнителя, засорение заполнения каменной мелочью, пылью, что мешает повороту валков.

2. Резиновые, резино-металлические и резино-фторопластовые опорные части (рис. 4):

- несоответствие опорных частей типам пролетных строений, в том числе по величине температурных перемещений;
- трещины старения на боковой поверхности опорной части;
- расслоение опорной части с оголением армирующих листов;

- выдавливание резины по всей площади торцевой поверхности;
- выдавливание резины в виде отдельных валиков, пузырей;
- отсутствие контакта (наличие зазоров) опорных частей с опорными площадками балок и подферменников;
- механические повреждения опорных частей.



Рис. 4. Дефекты резиновых опорных частей

3. Опорные части всех типов (рис. 5):

- отсутствие опорных частей;
- отсутствие смазки и окраски;
- загрязнение опорных частей;
- отсутствие закрепления опорных частей на пролетном строении, на опоре;
- отсутствие закрепления опорных точек на пролетном строении, на опоре.



Рис. 5. Дефекты конструкций мостов, возникшие по причине отсутствия опорных частей

Ремонт или замена опорных частей, имеющих дефекты, затруднены несколькими факторами. В первую очередь отсутствие усиленной площадки для установки домкратов. Поддомкратная площадка предусматривается на железнодорожных мостах, такие площадки на мостовых сооружениях на автомобильных дорогах общего пользования Республики Узбекистан практически отсутствуют. Замена опорных частей эксплуатируемых мостовых сооружений без использования домкратов представляется неразрешимой задачей.

Неудовлетворительное состояние опорных частей на большинстве мостовых сооружений связано также с отсутствием ухода и профилактического ремонта. В эксплуатируемых организациях отсутствуют мостовые мастера, которые могли бы проводить данный тип работ. Отсутствие ухода приводит к возникновению дефектов как в конструкциях опорных частей, так и в конструкциях пролетных строений и опор мостов.

Следует отметить, что значительное количество эксплуатируемых в настоящее время мостовых сооружений было построено в 1970-х годах. В этот период шло интенсивное освоение посевных земель в Сырдарьинской, Джизакской, Навоийской, Бухарской областях и других регионах Узбекистана. На большинстве этих мостов опорные части вообще отсутствуют или вместо опорных частей уложено несколько слоев рубероида. Отсутствие опорных частей приводит к преждевременному разрушению ребер балок пролетного строения на участках опирания, просадке пролетного строения, разрушению насадок опор. В настоящее время часть мостов, построенных без опорных частей, находится в аварийном состоянии.

Изучение использования различных типов существующих опорных частей, разработка рекомендаций по использованию современных типов опорных частей являются, на наш взгляд, актуальными на сегодняшний день вопросами.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Васильев А. И. Оценка технического состояния мостовых сооружений. М., 2017. – 257 с.
[2] МШН 4-2004 Автомобиль йўлларидаги кўприк иншоотлари ва кувурларни кўриқдан ўтказиш йўриқномаси. Тошкент, 2017.

Институт механики и сейсмостойкости сооружений
им. М.Т. Уразбаева АН РУз

Дата поступления
16.05.2019

Х.А. Байбулатов, У.Ю. Хамдамов, Ж.Г. Гайибов. Темир бетон кўприкларнинг таянч қисмлари ва конструкцияларининг характерли нуқсонлари

Мақолада кўприкларнинг конструкцияларини қуриш ва эксплуатация қилиш жараёнида пайдо бўлган нуқсонлар ва шикастланишлар билан боғлиқ физик эскириши келтирилган. Кўприк конструкцияларини таянч қисмларидаги нуқсонлари, бузилишлари ва уларнинг кўприкларнинг эксплуатацион хоссаларига таъсири ўрганилган.

H.A. Baybulatov, U.Y. Khamdamov, J.G. Gayibov. Characteristic defects and damage structures of supporting parts of reinforced concrete bridges

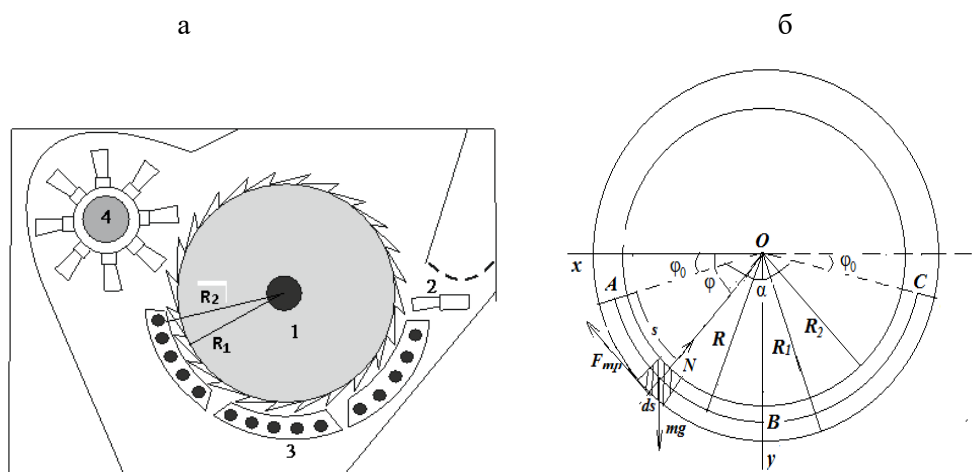
The article describes physical depreciation associated with defects and injuries caused by construction and exploitation of bridges. The components of the bridge constructions support their faults and their impact on the exploitative properties of bridges.

УЎК 677.21.021

Э. ГАЙБНАЗАРОВ

КОЛОСНИКЛИ ПАНЖАРА СИРТИДА ҲАРАКАТЛАНАЁТГАН ПАХТА ХОМАШЁСИДАН ИФЛОСЛИКЛАРНИ АЖРАТИШ ЖАРАЁНИНИНГ НАЗАРИЙ ТАҲЛИЛИ

Пахта хом ашёсини йирик ифлосликлардан тозалаш асосан қозикли ва аррали тозалагичларда амалга оширилади (1, а–расм). Пахта таъминлагич ва қозикли барабан орқали йирик тозалагич аррали барабан – 1 га узатилади. Пахтани арра тишларига мустаҳкам илаштириб бериш учун панжарадан олдин қўзғалмас чўтка–2, ўрнатилади. Арра тишларига илашган пахта бўлакларини йирик ифлосликлардан тозалаш учун мослаштирилган коворғали (колосникли) панжара – 4 орқали судраб ўтилади ва чўткали қўзғалувчан барабан – 5 ёрдамида аррали барабан тишларидан пахта бўлакчалари ечиб олиниб, пахта хом ашёси тозалаш учун кейинги жараёнларга узатилади.



1-расм. Хом ашё оқимининг колосникли панжара ёйи бўйлаб ҳаракатланиш схемаси

Тозалаш машинасида қовурғали панжарага нисбатан қатлами h га тенг бўлган пахта хом ашёси ҳаракатини ва унинг таркибидан йирик ифлосликлар ажралиши натижасида массасининг камайиши жараёнини назарий таҳлил қиламиз. Хом ашё қатламининг панжара билан ўзаро таъсирланишуви натижасида унинг тезлиги ва зичлиги ўзгаради. Хом ашёни самарали тозалаш учун унинг зичлиги камайиши ва унинг тақибидан ифлосликларининг ажралиб кетиши имконияти ҳосил бўлиши лозим. Зичликнинг ёй бўйича тақсимланиш қонунини аниқлашда хом ашёни туташ муҳит оқими асосида қабул этиб, унинг ҳаракат тенгламаси тузамиз. Бу тенглама ёй бўйича оқимдаги босим, зичлик ва тезликни ўзаро боғловчи тенглик бўлиб, уни тўлдириш учун қўшимча равишда массанинг сақланиш (стационар ҳаракат ҳоли учун) қонуни ва муҳитнинг ҳолат тенгламасидан фойдаланамиз. Шундай қилиб пахта хом ашёсини туташ муҳит деб, қўйидаги фаразларини қабул қиламиз:

1. Муҳитнинг қалинлиги $h=R_2-R_1$ ёй бўйича ўзгармас бўлиб, барабан радиусига нисбатан жуда кичик ($h \ll R_1$) бўлиб, унинг ҳаракати ёй бўйлаб бир ўлчовли тезликка v тенг (1, б-расм). Бу ҳолда муҳит учун массанинг сақланиш қонуни ўринли бўлади:

$$\rho v S = Q_0. \quad (1)$$

Бу ерда ρ – муҳит зичлиги; $S=Lh$ – хом ашё қатламининг кесим юзаси; L – барабан узунлиги; Q_0 – хом ашё сарфи.

2. Оқим тезлиги, босими ва зичлиги муҳит қалинлигининг ўрта чизиғи ёйининг ихтиёрий s масофасида аниқланади

3. Хом ашё муҳити ҳолат тенгламаси унинг зичлиги ρ ва босими p орасида чизиқли боғланиш орқали ифодаланади [1]

$$\rho = \rho_0 [1 + A(p - p_0)]. \quad (2)$$

Бу ерда ρ_0 ва p_0 хом ашёнинг табиий ҳолидаги зичлиги ва ундаги босим, A тажриба асосида аниқланадиган ўзгармас.

Координата бошини барабан марказида жойлаштирамиз ва $0x$ ўқини чапдан ўнга, $0y$ ўқини ўнга перпендикуляр қилиб юқоридан пастга йўналтирамиз (1,б-расм). Юқорида келтирилган фаразлар асосида хом ашё оқимининг ABC ёй бўйича ҳаракат тенгламасини оламиз. Қутб координатлари ($r=R$, φ) бўлган оқимдан A нуқтадан ихтиёрий $s=R(\varphi-\varphi_0)$ масофада ds элемент ажратиб оламиз ва унинг стационар ҳолатдаги инерция кучини эътиборга олган ҳолда мувозанат тенгламасини тузамиз.

1,б-расмдан фойдаланиб элементга панжаранинг бир бирлиги узунлиги бўйича таъсир этаётган кучларни аниқлаб оламиз. Оқимнинг мусбат йўналишдаги ҳаракати A нуқтадан C нуқта томон бўлсин. Бу кучлар қўйидагича аниқланади:

1. Элемент оғирлик кучи ёйнинг мусбат йўналишидаги проекцияси 3 расмга кўра:

$$F_g = \rho g \sin \varphi.$$

2. Элемент оғирлик кучи таъсирида ҳосил бўлган ишқаланиш кучининг проекцияси:

$$F_{1\text{тр}} = -f_1 \rho g \cos \varphi.$$

3. Марказдан қочма кучдан ҳосил бўлган панжара ёйи бўйлаб ишқаланиш кучи:

$$F_{2\text{тр}} = -f_1 v^2 \rho / R.$$

4. Барабан тишлари орқали қатламга таъсир этаётган уринма куч:

$$F_6 = \tau / s_0.$$

бу ерда f_1 – панжара ва қатлам орасидаги ишқаланиш коэффициенти, τ – уринма кучланиш.

Юқоридаги кучларни эътиборга олиб, оқимнинг стационар ҳаракати учун Эйлер тенгламасини ёзамиз

$$\rho v \frac{dv}{ds} = -\frac{dp}{ds} + \rho g (\sin \varphi - f_1 \cos \varphi) - f_1 \rho \frac{v^2}{R} + F_6, \quad (3)$$

(3) тенглама (1) ва (2) боғланишлар билан биргаликда номаълум v , ρ ва p ларни аниқлаш учун хизмат қилади. (3) тенгламага юқоридаги (1) ва (2) тенгликлардан v , ρ ларининг ифодаларини қўйсақ босим p аниқлаш учун қўйидаги тенгламани ҳосил қиламиз

$$\frac{dp}{d\varphi} = F_1(\varphi)p + F_2(\varphi), \quad (4)$$

$$\text{бу ерда } F_1 = \frac{A[F_0(\varphi) + f_1 \bar{Q}_0 v_0]}{1-a}, \quad F_2 = \frac{F_0(\varphi) - f_1 \bar{Q}_0 v_0}{1-a} - \frac{A[F_0(\varphi) + f_1 \bar{Q}_0 v_0]}{1-a} p_0 + \frac{RF_6}{1-a},$$

$$F_0 = \rho_0 g R (\sin \varphi - f_1 \cos \varphi), \quad a = \bar{Q}_0 v_0 A, \quad \bar{Q}_0 = Q_0 / Lh.$$

(4) тенгламанинг $p(\varphi_0) = p_0$ шартни қаноатлантирувчи ечими қўйидаги квадратура орқали ифодаланади

$$p = \exp[F_3(\varphi)] \{ p_0 \exp[-F_3(\varphi_0)] + \int_{\varphi_0}^{\varphi} F_2(x) \exp[-F_3(x)] dx \} \quad F_3 = \int F_1(\varphi) d\varphi. \quad (5)$$

Тозалаш зонасида панжара ёйи бўйлаб хом ашё массасининг камайиши А.Г. Севостьянов [2] формуласи (3) кўра қўйидаги формула билан ифодаланади

$$\frac{m}{m_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\lambda.$$

(6) формуладан фойдалансак, тозалаш самарадорлигини аниқлаймиз

$$\varepsilon = \frac{m_0 - m}{m_0} = 1 - [1 - A(p - p_0)]^\lambda.$$

Хом ашёдан ажралаётган ифлосликла микдори ушбу интеграл орқали ҳисобланади

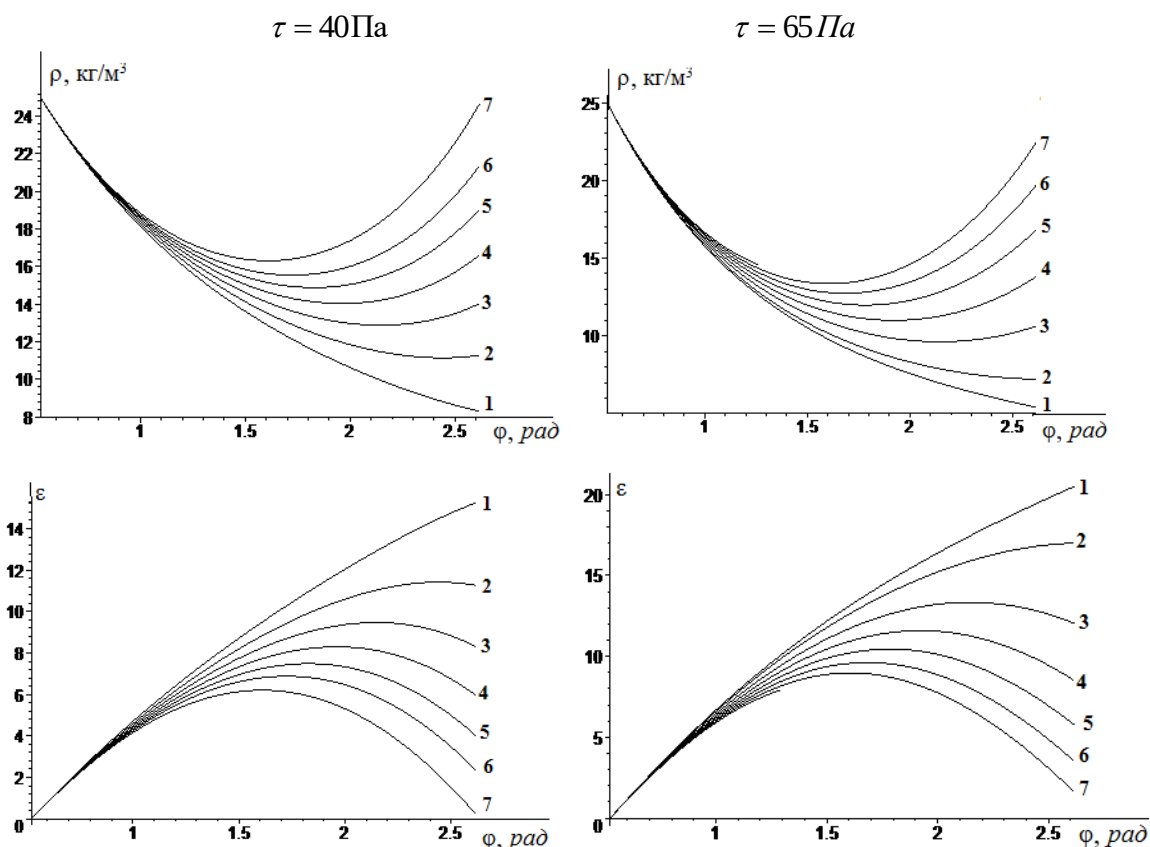
$$M = m_0 \int_{\varphi_0}^{\varphi_0 + \alpha} [1 - [1 - A(p - p_0)]^\lambda] d\varphi.$$

Ҳисоблаш натижаларининг параметрлари ушбу қийматларида келтирилган $R = 0.204\text{м}$, $\rho_0 = 25\text{кг}/\text{м}^3$, $f_1 = 0.2$, $\varphi_0 = 30^\circ$, $\alpha = 120^\circ$, $Q_0 = 4000\text{кг}/\text{час}$, $L = 1.3\text{м}$, $h = 0.02\text{м}$, $p_0 = 20\text{Па}$.

Жадвалда $\tau = 40\text{Па}$ бўлганда хом ашё таркибидан ажралган ифлосликларнинг коэффициент $A (\text{Па}^{-1})$ ҳар хил қийматларида хомашё бошланғич массаси m_0 га нисбатининг (фоизда) қийматлари келтирилган.

Хом ашё таркибидан ажралган ифлосликлар массасининг қийматлари

$A (\text{Па}^{-1})$	0.014	0.015	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.021	0.022	0.024
$\frac{M}{m_0} 100$	18.22	17.07	16.03	15.10	14.24	13.22	12.72	11.40	10.21	8.66



2 – расм. Хом ашё зичлиги (ρ (кг/м³)) ва тозалаш самарадорлиги ε нинг уринма кучланиш τ_0 (Па) нинг иккита ва коэффициент A (Па⁻¹) ҳар хил қийматларида колосникли панжара сирти бўйлаб тақсимланиши:
1– $A=0.014$; 2– $A=0.016$; 3– $A=0.018$; 4– $A=0.02$; 5– $A=0.022$; 6– $A=0.023$; 7– $A=0.024$

Келтирилган графиклар таҳлилидан мойиллик коэффициенти A ошганда зичлик ρ ва тозалаш самарадорлик ε ларининг ёй бўйича тақимланиш қонунлари ўзгариб бориши кузатилади. Унинг кичик қиймаларида зичлик олинган интервалда камайиб бориб унинг ошиши билан зичлик интервалда минимумга, самарадорлик эса максимумга эришади. Бу қонуниятлар хом ашёни ифлосликлардан ажратиш узатилаётган хом ашё муҳитининг мойиллик коэффициентини танлаш имкониятини яратади.

АДАБИЁТЛАР

- [1] Мирошниченко Г.И. Основы проектирования машин первичной обработки хлопка. М.: Машиностроение, 1972. – 486 с.
- [2] Севостьянов А.Г., Севостьянов П.А. Моделирование технологических процессов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 341 с.

Наманган муҳандислик-технология институти

03.04.2019 й.
қабул қилинган

Э. Гайбназаров. Теоретический анализ процесса отделения сорных примесей от хлопка-сырца во время его движения по колосниковой решетке

В данной статье описана модель механизма отделения интенсивности сора от хлопка-сырца силой удара или вибрации, а также изучен процесс отделения сорных примесей от хлопка-сырца. Установлено, что во время движения хлопка-сырца по колосниковой решетке образуется контактная сила, а частицы перемещаются в пространство, в результате чего некоторые из них выпадают за пределы поверхности.

E. Gaybnazarov. Theoretical analysis of the process of separating weed impurities from the cotton-bale during movement along the grate

This article describes a model of the mechanism for separating the intensity of litter from raw cotton by shock or vibration, and also studies the process of separating weed impurities from cotton. During the movement of the raw cotton on the grate, contact force is formed, and the particles move into space. As a result, some of them fall outside the surface.

Б.М. МАРДОНОВ, Р.Ш. СУЛАЙМОНОВ

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ЗЕРНИСТОЙ СРЕДЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ВАЛИКА В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ ЛИНТЕРНОЙ МАШИНЫ

В процессе линтерования семян степень съема линта определяется, в основном, величиной зазора между ворошителем и поверхностью гарнитуры пыльного цилиндра [1].

Для теоретического изучения процесса деформирования массы хлопковых семян в рабочей камере используем модель зернистой среды [2, 3]. Обозначим через $\varepsilon = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$ – относительное изменение объема; $\gamma_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon \delta_{ij}/3$ – компоненты девиатора тензора деформаций, где $\delta_{ij} = 1$ при $i=j$,

$\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$; $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ – компоненты тензора деформаций ($i, j = 1, 2, 3$); $u_i(x_1, x_2, x_3, t)$ –

компоненты вектора перемещения в декартовых координатах.

Компоненты тензора напряжений σ_{ij} выражаются через среднее давление p и компоненты девиатора тензора напряжений τ_{ij} по формулам

$$\sigma_{ij} = \tau_{ij} - p \delta_{ij}, \quad p = -(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33})/3. \quad (1)$$

Зависимости между компонентами тензора напряжения и тензора деформации вычисляются по уравнению состояния зернистой среды, которое определяется видом зависимости объемной деформации от компонентов девиатора тензора деформации. Следуя работе [3], такую зависимость представляем в виде квадратичной формы и из уравнения состояния установим связь между компонентами девиатора напряжений и девиатора деформаций:

$$\varepsilon = \mu \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \gamma_{ij}^2, \quad \tau_{ij} = 2\mu \gamma_{ij}. \quad (2)$$

Здесь μ – безразмерный параметр, характеризующий степень сжатия (при $\mu < 0$) и разрежения (при $\mu > 0$) среды при сдвиговых деформациях.

Используем модель зернистой среды для моделирования состояния вращающейся с постоянной угловой скоростью ω массы хлопковых семян в рабочей камере линтера. Полагаем, что зернистая среда заполняет цилиндрический вращающийся сосуд радиусом R и длиной l . Задачу считаем осесимметричной. Установим начало координат в правом торце цилиндра и направим ось Oz вдоль оси цилиндра, ось Or – перпендикулярно к ней.

Составляющие вектора перемещения вдоль координатных осей Or и Oz соответственно обозначим через $u(r, z)$ и $w(r, z)$. Компоненты тензора деформации ε_{ij} , объемная деформация ε , а также девиатор тензора деформации γ_{ij} выражаются следующими формулами:

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \varepsilon_{22} = \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}, \quad \varepsilon_{33} = \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_\theta + \varepsilon_z, \quad \gamma_{13} = \gamma_{rz} = \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z},$$

$$\gamma_{11} = \gamma_r = (2\varepsilon_r - \varepsilon_\theta - \varepsilon_z)/3, \quad \gamma_{22} = \gamma_\theta = (2\varepsilon_\theta - \varepsilon_r - \varepsilon_z)/3, \quad \gamma_{33} = \gamma_z = (2\varepsilon_z - \varepsilon_r - \varepsilon_\theta)/3. \quad (3)$$

Зависимость объемной деформации от компонентов девиатора деформации и компоненты тензора напряжений σ_{ij} соответственно вычисляются по формулам (1) – (2)

$$\varepsilon = \mu(\gamma_r^2 + \gamma_\theta^2 + \gamma_z^2 + \gamma_{rz}^2), \quad (4)$$

$$\sigma_{11} = \sigma_r = -p(1 - 2\mu\gamma_r), \quad \sigma_{22} = \sigma_\theta = -p(1 - 2\mu\gamma_\theta), \quad \sigma_{33} = \sigma_z = -p(1 - 2\mu\gamma_z), \quad \sigma_{13} = \sigma_{rz} = 2\mu p \gamma_{rz}. \quad (5)$$

Компоненты тензора напряжений удовлетворяют уравнениям равновесия

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = -\rho \omega^2 r, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} = 0. \quad (7)$$

Подставляя в уравнения равновесия (4) и (5) выражения напряжений (с учетом зависимостей (3) для напряжений и компонентов девиатора тензора деформации), можно получить два уравнения, которые совместно с зависимостью (4) составляют нелинейную систему для определения перемещений $u(r, z)$, $w(r, z)$ и давления $p(r, z)$. В общем случае решение соответствующих краевых задач для этих уравнений требует привлечения численных методов. Исходя из физических соображений, можно сформулировать упрощенную постановку задачи, где удастся получить точные или приближенные их решения. Пусть вращение зернистого валика происходит при отсутствии касательных напряжений σ_{rz} и продольных перемещений частиц среды в теле валика, т.е.

$$w = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z} = 0.$$

Таким образом, радиальные и продольные смещения не зависят от переменной z . Тогда объемная деформация ε и остальные компоненты девиатора тензора деформации примут вид

$$\varepsilon = \frac{du}{dr} + \frac{u}{r}, \quad \gamma_r = \frac{1}{3} \left(2 \frac{du}{dr} - \frac{u}{r} \right), \quad \gamma_\theta = \frac{1}{3} \left(2 \frac{u}{r} - \frac{du}{dr} \right), \quad \gamma_z = -\frac{1}{3} \left(\frac{du}{dr} + \frac{u}{r} \right).$$

Пользуясь зависимостью (10), получаем уравнение для определения производной $\varepsilon_r = \frac{du}{dr}$:

$$\mu(\varepsilon_r^2 + \varepsilon_\theta^2 - \varepsilon_r \varepsilon_\theta) - 1.5\varepsilon_r - 1.5\varepsilon_\theta = 0.$$

Вводим новые функции по формулам $u = \bar{u}/\mu$, $y = u/r$. Разрешим это уравнение относительно $\frac{d\bar{u}}{dr}$:

$$\bar{u}_r = F(r, \bar{u}) = \left[0.5y + 0.75 \pm \sqrt{(0.5y + 0.75)^2 - y^2 + 1.5y} \right], \quad (8)$$

где знак перед корнем выбирается из условия $\varepsilon=0$ при $u=0$, $w=0$. Как видно, при отрицательном знаке это условие выполняется. При этом уравнение (7) удовлетворяется тождественно. Пользуясь зависимостями (5), записываем уравнение (6) относительно давления

$$\frac{dp}{dr} = \frac{2(\gamma_r - \gamma_\theta)p + 2pr\gamma'_r + \rho\omega^2 r^2}{r(1 - 2\lambda_r)}. \quad (9)$$

Учитывая $\gamma'_r = \frac{d\gamma_r}{dr} = \frac{1}{3} \frac{d}{dr} \left(2 \frac{du}{dr} - \frac{u}{r} \right) = \frac{2}{3} \frac{d^2 u}{dr^2} - \frac{1}{3r} \frac{du}{dr} + \frac{1}{3} \frac{u}{r^2}$ и (8), получаем:

$$\gamma'_r = (2F_r - F/r + y/r)/3,$$

$$F'_r = \frac{F_0(r, y)}{2r} \left[1 - \frac{3-y}{\sqrt{(0.5y + 0.75)^2 - y^2 + 1.5y}} \right], \quad F_0 = [F(r, y) - y]/r.$$

Уравнение (9) с учетом выражения γ'_r и зависимостей (8) приводится к виду

$$\frac{dp}{dr} = \frac{6pr(F - y) + 2p(2r F'_r - F + y) + 3\rho\omega^2 r^2}{2r[3 - 2(2F - y)]}. \quad (10)$$

Уравнение (8) записываем относительно функции $y = y(r)$ в виде

$$y'_r = [F(r, y) - y]/r. \quad (11)$$

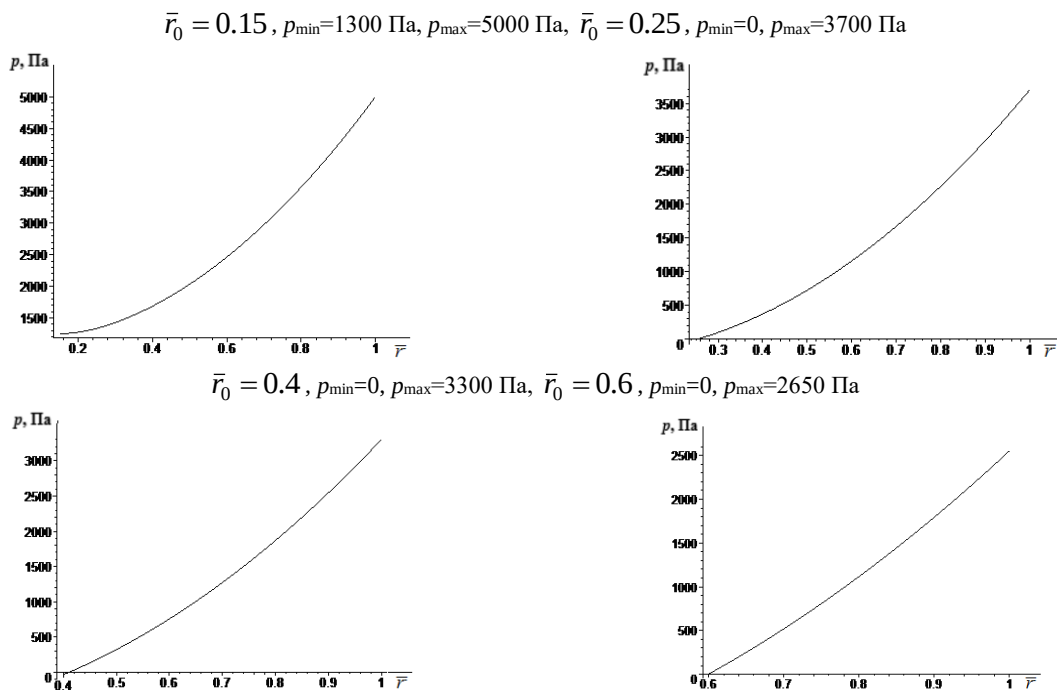
Равенства (10) и (11) совместно образуют систему уравнений для определения радиального перемещения частиц и давления в слое зернистой среды. В качестве краевого условия для инте-

гирования уравнений (10) и (11) принимаем отсутствие перемещения на границе камеры линтерования, т. е. полагаем: $u=0$ при $r=R$.

Исходя из физических соображений, требуем, чтобы давление на внутренней границе цилиндрического слоя $r=r_0$ принимало минимальное значение

$$p=p_{\min} \text{ при } r=r_0. \quad (12)$$

Условие (12) позволяет при заданном значении r_0 определить давление $p=p_{\max}$ на внешней границе зернистого слоя. На рисунке представлены графики изменения давления по приведенному радиусу $\bar{r} = r/R$ слоя для различных значений отношения $\bar{r}_0 = r_0/R$. Анализ кривых показывает, что при малом внутреннем радиусе слоя на внутренней поверхности слоя давление отличается от нуля. При больших значениях этого радиуса вращение слоя происходит при нулевом давлении на внутренней поверхности слоя.



Зависимости давления p (Па) от приведенного радиуса $\bar{r} = r/R$ для различных значений отношения $\bar{r}_0 = r_0/R$

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мирошниченко Г.И. Основы проектирования машин первичной обработки хлопка. М.: Машиностроение, 1972. – 484 с.
- [2] Вайсман А.М., Гольдштик М.А. Деформирование зернистой среды // ДАН СССР, 1980. Т. 252. № 1. С. 61 – 64.
- [3] Бердичевский В.Л. Вариационные принципы МСС. М.: Наука, 1983. – 420 с.

Акционерное общество «Paxtasanoat ilmiy markazi»

Дата поступления
16.04.2019

Б.М. Мардонов, Р.Ш. Сулаймонов. Линтер машинасининг ишчи камерасида айланаётган валнинг деформацияланган ҳолатини ўрганиш учун донатор муҳит моделини қўллаш

Линтер машинаси камерасида айланаётган чигитли пахта хом ашёси қатламининг босими ва хажмий деформациясини аниқлаш учун донатор муҳит модели таклиф қилинган. Босим камеранинг радиуси бўйлаб тарқалиш қонунияти аниқланган. Жумладан, кичик қалинликдаги қатламлар айланишидан қатлам сиртида нолга тенг босим юзга келиши кўрсатиб ўтилган.

B.M. Mardonov, R.Sh. Sulaymonov. Application of a model of a granular medium for studying the deformed state of a rotating roller in the working chamber of a linter machine

A model of a granular medium is proposed for determining the pressure and volumetric deformation of a rotating layer of raw cotton seeds in the chamber of a linter machine. The laws of pressure distribution along the radius of the chamber are established. In particular, it was shown that at small thicknesses of the layer, its rotation occurs at zero pressure on the surface of the layer.

ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ ХЛОПЧАТОБУМАЖНОЙ ПРЯЖИ

Физически нелинейный закон деформирования хлопчатобумажной пряжи при растяжении до обрыва имеет вид [1]

$$\frac{d\sigma}{E_D(\varepsilon)dt} + \mu(\varepsilon)\frac{\sigma}{E_S(\varepsilon)} = \frac{d\varepsilon}{dt} + \mu(\varepsilon)\varepsilon \text{ при } \frac{d\varepsilon}{dt} > 0, \quad \varepsilon < \varepsilon_k, \quad (1)$$

$$\sigma = 0 \text{ при } \varepsilon \geq \varepsilon_k, \quad (2)$$

где σ – напряжение; ε – деформация; E_D и E_S – динамический и статический модули; μ – параметр вязкости; ε_k – критическое значение деформации, при достижении которой пряжа обрывается и напряжение в пряже мгновенно падает до нуля. Эти параметры являются функциями деформации.

Уравнение (1) приводим к виду

$$\frac{d\sigma}{dt} + \sigma \frac{E_D(\varepsilon)}{E_S(\varepsilon)} \mu(\varepsilon) = E_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{dt} + \mu(\varepsilon) E_D(\varepsilon) \varepsilon. \quad (3)$$

С учетом $\gamma = E_D(\varepsilon)/E_S(\varepsilon)$ уравнение (3) принимает вид

$$\frac{d\sigma}{dt} + \mu(\varepsilon)\gamma\sigma = E_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{dt} + E_D(\varepsilon)\mu(\varepsilon)\varepsilon. \quad (4)$$

При конкретных значениях ε функции $E_D(\varepsilon)$, $E_S(\varepsilon)$ и $\mu(\varepsilon)$ известны. С учетом этого обстоятельства правую часть (4) можно считать известной. Тогда получим

$$\frac{d\sigma}{dt} + G(\varepsilon)\sigma = Q(\varepsilon), \quad (5)$$

$$G(\varepsilon) = \mu(\varepsilon)\gamma, \quad Q(\varepsilon) = E_D(\varepsilon) \frac{d\varepsilon}{dt} + E_D(\varepsilon)\mu(\varepsilon)\varepsilon. \quad (6)$$

Значение скорости деформирования пряжи $d\varepsilon/dt$ считаем постоянным. Тогда решение уравнения (5) примет вид

$$\sigma = e^{-\int G(\varepsilon)dt} \left[\int Q(\varepsilon) e^{\int G(\varepsilon)dt} dt + C_1 \right]. \quad (7)$$

Если предположим, что при конкретном значении ε , $G(\varepsilon)=\text{const}$ и $Q(\varepsilon)=\text{const}$, то получим

$$\sigma = e^{-G(\varepsilon)t} \left(Q(\varepsilon) \int e^{G(\varepsilon)t} dt + C_1 \right). \quad (8)$$

С учетом начальных условий

$$\sigma = 0 \text{ при } t = 0 \quad (9)$$

получим

$$C_1 = \frac{Q(\varepsilon)}{G(\varepsilon)}. \quad (10)$$

С учетом (10) уравнение (8) принимает вид

$$\sigma = \frac{Q(\varepsilon)}{G(\varepsilon)} (1 - e^{-G(\varepsilon)t}). \quad (11)$$

Окончательно с учетом (6) получим

$$\sigma = E_s(\varepsilon) \left(\frac{d\varepsilon}{dt} + \mu(\varepsilon)\varepsilon \right) \frac{1 - e^{-\mu(\varepsilon)t}}{\mu(\varepsilon)}. \quad (12)$$

В момент обрыва хлопковой пряжи при $\varepsilon = \varepsilon_k$ уравнение (12) принимает вид

$$\sigma_k = E_{Sk} \left(\frac{d\varepsilon}{dt} + \mu_k \varepsilon_k \right) \frac{1 - e^{-\mu_k \gamma_k t_k}}{\mu_k}, \quad (13)$$

где σ_k – критическое напряжение (прочность), при котором обрывается пряжа; E_{Sk} – квазистатический модуль деформации пряжи в момент обрыва при $t=t_k$; μ_k – параметр вязкости пряжи в момент обрыва; $\gamma_k = E_{Dk}/E_{Sk}$; E_{Dk} – динамический модуль деформации пряжи в момент обрыва.

Уравнение (13) содержит 7 параметров: E_{Sk} , ε_k , t_k , $d\varepsilon/dt$, μ_k , γ_k и E_{Dk} . Скорость деформирования $d\varepsilon/dt$ также считается известной в момент обрыва пряжи. В эксперименте значение $d\varepsilon/dt$ задается. Параметр объемной вязкости пряжи μ_k в момент обрыва пряжи неизвестен. Определение коэффициента вязкости или параметра вязкости пряжи является экспериментальной задачей на перспективу. Приблизительно значение параметра вязкости может быть определено по формуле

$$\mu_k = \mu_N / \gamma_m. \quad (14)$$

Для определения значения γ_k в момент обрыва пряжи предлагается соотношение

$$\gamma_k = \gamma_m + (\gamma_m - \gamma_N) \left(\frac{d\varepsilon}{\mu_k dt} \right)^\omega, \quad (15)$$

где γ_N – начальное значение γ при $\varepsilon=0$; γ_m – максимальное значение γ при $\varepsilon=\varepsilon_m$, $\omega=0.1$.

Параметр E_{Dk} в момент обрыва непосредственно не входит в формулу (13). Однако, учитывая $\gamma_k = E_{Dk}/E_{Sk}$, можно считать, что модуль динамического деформирования пряжи входит в формулу (13) через соотношение

$$E_{Dk} = \gamma_k E_{Sk}. \quad (16)$$

Значения параметров E_{Sk} , ε_k и t_k определяются из результатов опытов по растяжению пряжи до обрыва. Значение модуля статического обрыва пряжи E_{Sk} в момент обрыва равняется критическому значению данного модуля E_k .

Таким образом, все параметры формулы (13) можно считать известными. Используя формулу (13) и соотношения (14) – (16), можем определить значение критического напряжения – прочности пряжи с любой линейной плотностью T . Отсюда следует, что полученную новую формулу (13) на основе физической нелинейной модели (1) можно использовать для определения, оценки и прогноза прочности пряжи.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Султанов К.С., Исмоилова С.И. Структурная прочность текстильных нитей. Ташкент: Фан, 2017. – 256 с.

Институт механики и сейсмостойкости сооружений
им. М.Т.Уразбаева АН РУз

Дата поступления
16.05.2019

К.С. Султанов, С.И. Исмоилова, Ш.Э. Туланов. Пахта ипининг мустаҳкамлигини баҳолашнинг тақрибий усули

Пахта ипининг физик нозизиқ деформацияланиш қонуни асосида унинг узулгунча чўзилишида мустаҳкамлигини баҳолаш учун формула олинган.

K.S. Sultanov, S.I. Ismoilova, Sh.E. Tulanov. Approximate method for assessing the strength of cotton yarn
Based on a physically non-linear model of cotton yarn strain, a formula is obtained for estimating the yarn strength under tension to break.

ХРОНИКА

К НОВОЙ РЕДАКЦИИ РАЗДЕЛА IV «ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ И ИНЖЕНЕРНЫЕ СЕТИ» КМК 2.01.03-96 – «СТРОИТЕЛЬСТВО В СЕЙСМИЧЕСКИХ РАЙОНАХ»

Данная работа выполнена в соответствии с техническим заданием, утвержденным Министерством строительства Республики Узбекистан 25 октября 2018 г.

С момента введения в действие норм проектирования в сейсмических районах КМК 2.01.03-96 прошло уже более 20 лет. За указанный период использования норм в практике строительства элементов жизнеобеспечения произошли серьезные изменения: появились новые данные последствий сильных мировых землетрясений, характеризующие поведение подземных инженерных сооружений во взаимодействии с окружающим грунтом, накоплен определенный опыт проектирования, строительства, появились новые строительные материалы, изделия и конструкции, для которых ряд положений КМК 2.01.03-96 практически устарели и не отвечают современным требованиям. В связи с этим сдерживается дальнейшее развитие проектирования и строительства сейсмостойких подземных сооружений и инженерных сетей в республике.

Нормативный документ КМК 2.01.03-96 устарел и нуждается в переработке, учитывая современные материалы, конструктивные особенности, различные виды грунтовых условий и т.д. В связи с этим основной задачей на данном этапе при пересмотре КМК 2.01.03-96* являлось создание условий применения материалов и конструктивных решений, обеспечивающих сейсмостойкость подземных систем жизнеобеспечения. В целом пересмотр КМК 2.01.03-96* направлен на дальнейшее развитие и совершенствование положений нормативного документа.

В Постановлении Кабинета Министров Республики Узбекистан от 22 января 2016 г. № 15 «О дополнительных мерах по совершенствованию проектных работ и экспертизы инвестиционных проектов, финансируемых за счет централизованных инвестиций». Приложение № 3 п. 8.6 отмечается, что действующие нормы и правила в сфере сейсмостойкого строительства подземных сооружений и инженерных сетей не отвечают современным требованиям. В целях дальнейшего совершенствования сейсмостойкого проектирования и строительства подземных систем жизнеобеспечения Госархитектстрою (ныне – Министерство строительства) совместно с другими заинтересованными министерствами и ведомствами поручено проведение критического изучения действующих норм и правил проектирования, обеспечив их пересмотр и государственную регистрацию.

С учётом вышеизложенного была осуществлена переработка КМК 2.01.03-96*.

В нём уточняются требования к проектированию подземных трубопроводов, в местах их перехода через зоны с разной сейсмической интенсивностью. Известно, что зона сейсмической интенсивности влияет на работу подземных сооружений в период их эксплуатации, в зависимости от которой применяются различные мероприятия по укреплению подземных сооружений. В картах сейсмического районирования зоны сейсмичности разделяются просто линией. Подземные сооружения являются протяженными, поэтому установить длину перехода сложно. Исходя из этого рекомендуется в местах перехода применять технические решения, соответствующие наибольшей сейсмической зоне.

Отмечено о влиянии глубины заложения подземных трубопроводов при их проектировании, т.е. необходимо учитывать глубину промерзания грунта.

Внесены изменения в расчетных формулах для значений коэффициента A в зависимости от сейсмичности района, учитывающие и перемещения грунта, особенно в водонасыщенных грунтах.

Для определения коэффициента жесткости стыка предложена другая формула, которая более удобна для пользования в практике. При этом учитывалась незначительная разница в полученных результатах значений приведенной продольной жесткости трубопроводов.

В переработанном варианте рисунки для определения динамического коэффициента улучшены качеством и оставлены только кривые, соответствующие средним значениям реальных данных.

Внесено дополнение о конструктивном решении, направленное на улучшение функционирования водопроводной сети.

Проведенные теоретические исследования показали, что трубопровод получает перемещения при сейсмической нагрузке и в перпендикулярном направлении к оси трубопровода. В соответствии с этим дана соответствующая методика расчета.

Добавлены пункты 4.7.24* – 4.7.25*, отражающие современные данные о повреждениях магистральных трубопроводов при сильных землетрясениях.

Учитывая результаты анализа, отражающие современные данные о повреждениях магистральных трубопроводов при сильных землетрясениях, добавлены пункты по расчету, связанные с выпучиванием трубопроводов и колодцев. При сильных землетрясениях наблюдаются случаи выпучивания подземных трубо-

проводов и подъемы колодцев, основной причиной которых является разжижение окружающего грунта. Как известно, разжижению подвергаются мелкодисперсные грунты, такие как глинистые, глинисто-песчаные и лёссовые. Учитывая тот факт, что в Центральной Азии (в том числе на территории Узбекистана) значительная часть подземных сооружений расположена в водонасыщенных мелкодисперсных грунтах, является необходимой динамическая устойчивость подземных сооружений, уложенных в вышеперечисленных грунтах. В связи с этим приведены формулы, связанные с определением продольной и критической нагрузок, при которых трубопровод может потерять устойчивость, а также предложены рекомендации по предотвращению подъема участка трубопровода и колодца.

Добавлен раздел «Пластмассовые трубопроводы». На сегодняшний день известно, что трубопроводы из полимерных материалов являются более сейсмостойкими. Данный факт подтверждается последствиями сильных землетрясений (например, Кобе, 1995), а также проведенными научно-исследовательскими работами как теоретическими, так и экспериментальными. На основе этих данных и нормативного документа КМК 2.04.11-98 приведены расчетные формулы по определению допустимых деформаций трубы с учетом влияния внутреннего давления, температурного изменения, а также в зависимости от действия сейсмической нагрузки.

Применение рекомендуемых мер позволяет проводить расчет подземных трубопроводов на сейсмические воздействия с учетом новых строительных материалов, изделий и конструкций, т.е. в соответствии с современными требованиями.

В объем нормативного документа включено дополнительное Приложение № 4 (обязательное) «Перечень нормативных документов».

Положения, вносимые в КМК 2.01.03-96*, сформулированы с учетом климатических и социально-экономических условий республики, производственной базы и рынка материалов.

Анализ и обобщение передовых технических достижений были проведены с использованием всех доступных информационных систем, включая возможности Интернета, технической литературы, результатов НИР (фундаментальных и прикладных исследований), зарубежных нормативных документов и опыта в сейсмостойком строительстве, практических рекомендаций международных экспертов.

Требования, содержащиеся в изменении КМК 2.01.03-96*, увязаны с требованиями действующих нормативных документов, а также с отраслевой системой стандартизации в строительстве, с межгосударственными нормами и стандартами, действующими на территории республики.

Данная работа выполнена коллективом: руководители – акад. АН РУз Т.Р. Рашидов, д.т.н., проф. Г.Х.Хожметов и исполнители – доктора философии (PhD) по техническим наукам Д.А. Бекмирзаев, Н.А. Нишонов, А.С. Ювмитов и по физико-математическим наукам Е.В. Ан.

ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ПРИ РАЗРАБОТКЕ

- [1] КМК 2.04.11-98. Инструкция по проектированию технологических трубопроводов из пластмассовых труб.
- [2] СНиП 2.04.02-84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения.
- [3] СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения.
- [4] СНиП -11-7-81 Строительство в сейсмических районах.
- [5] СП 14.13330.2012 «СНиП -II -7 -81*. Строительство в сейсмических районах».
- [6] СП 31.13330.2012 «СНиП 2.04.02-84*. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения».
- [7] СП 32.13330.2012 «СНиП 2.04.03-85. Канализация. Наружные сети и сооружения».
- [8] СП 20.13330.2011 «СНиП 2.01.07 -85*. Нагрузки и воздействия».
- [9] СП 30.13330.2012 «СНиП 2.04.01 -85*. Внутренний водопровод и канализации зданий».
- [10] СП 33.13330.2012 «СНиП 2.04.12 -86. Расчет на прочность стальных трубопроводов».
- [11] КМК 3.06.08-97 «Магистральные трубопроводы».
- [12] Отчет о научно-исследовательской работе по гранту прикладных исследований ФА-А14-Ф019 «На основе инженерного анализа последствий мировых сильных землетрясений и новых исследований разработать рекомендации для актуализации методов расчета и проектирования сейсмостойких подземных инженерных сооружений». Итоговый за 2015 – 2017 гг. ИМиСС. – 187 с.
- [13] Отчет о научно-исследовательской работе по гранту прикладных исследований ФА-Атех-2018-67 «Оценка реакций подземных трубопроводов на действие набора реальных записей землетрясений и их внедрение». Промежуточный за 2018 г. ИМиСС. – 100 с.
- [14] Отчет о научно-исследовательской работе по гранту фундаментальных исследований ФА-Ф-4-006 «Сейсмодинамика плоско- и пространственно-расположенных подземных трубопроводных систем при произвольном угле атаки воздействия». Промежуточный за 2017 г. ИМиСС. – 85 с.
- [15] Отчет о научно-исследовательской работе по гранту прикладных исследований ГНТП-А-5-060 «Дифференцированная оценка сейсмических воздействий на подземные системы жизнеобеспечения, разработка рекомендаций по обеспечению их сейсмостойкости и уменьшению ущерба». Заключительный за 2008 г. ИМиСС. – 135 с.

Доктор технических наук, профессор Г.Х. Хожметов

ШОУМАРОВА МУХАЙЁ 80 ЁШДА

Мухайё Шоумарова 1939 йил 10 май куни Тошкентда таваллуд топган. 1956 йил ўрта мактабни имтиёзли тугатиб, автомобилист отаси туфайли ёшлигидан техникага қизиққанлиги учун, улуг математик олим Қори-Ниёзий суҳбатидан ўтиб, Тошкент ирригация ва кишлок хўжалигини механизациялаш инженерлари институти (ТИҚХММИ) нинг “Қишлоқ хўжалигини механизациялаш” факультетига ўқишга кирган.

Факультет талабаларига ўша даврнинг энг малакали ўқитувчилари сабоқ берганлари сабабли М.Шоумарова ҳам шу билимлардан баҳраманд бўлган. 1961 йилда институтини муваффақиятли битирган М.Шоумаровани Ўзбекистон Республикаси Олий таълим вазирлигининг буйруғига асосан ТИҚХММИда ўқитувчилик лавозимида ишга қолдирилган.

Ўз ФА Механика ИТИнинг махсус таклифига биноан мазкур институтга ишга юборилган. У ерда академиклардан М.Т.Ўрозбоев, В.Қ.Қобулов, Х.Х.Усмонхўжаев, Ж.Ф.Файзуллаев, Т.Р.Рашидов каби буюк олимлар билан биргаликда меҳнат қилиб, механика фани бўйича чуқур билимлар орттирган ва тадқиқотчилик маҳоратини эгаллаган.

1965–1968 йиллари аспирантурада профессор А.Д.Мошков ва проф. А.Д.Глуценко илмий раҳбарлигида “Исследование динамического воздействия хлопчатника на шпиндели вертикально - шпиндельных хлопкоуборочных машин” мавзусидаги диссертация ишини бажариб, 1971 йил Ўз ФАнинг физика-техник илмий кенгашида муваффақиятли ҳимоя қилган.

ЎзФА Механика институтида, яъни Фанлар Академиясини илмий мактабида, олган билимларини ўқув жараёнига татбиқ қилиш ниятида 1973 йил М.Шоумарова ТИҚХММИнинг “Қишлоқ хўжалиги машиналари” кафедрасига ўқитувчиликка таклиф қилинган. Ўқитувчилик фаолиятида М.Шоумарованинг қобилиятлари тўлиқроқ очилди. ТИҚХММИ даги энг фаол мураббийлар қаторидан ўрин олди. Жамоа ишларида фаол қатнашиб, факультетнинг ривожланишига катта ҳисса қўшди. “Билим” жамиятининг раиси сифатида ўқитувчилар малакасини ошириш бўйича фаол ишлар олиб борди. Кўп йиллар институтда нуронийлар кенгашида, аёллар кенгашида фаол ишлади. Унга ТИҚХММИда хизмат кўрсатган доцент фахрий унвони берилди.

М.Шоумарова илмий, методик ишлар билан фаол шуғулланиб келмоқда, 250 тадан ортиқ илмий мақолалар, методик ишлар чоп этган, ихтироларга гувоҳномалар олган.

М.Шоумарованинг ижодий фаолияти Республикамиз ўз мустақиллигига эришгандан кейинги йиллари айниқса самарали бўлди. Ўзбек тилига Давлат тили мақоми берилганидан сўнг, илгари фақат рус тилида ўқитилган “Қишлоқ хўжалиги машиналари” фанини Давлат тилида ўқитиш муаммо бўлиб қолди, чунки ўзбек тилида ёзилган дарсликлар йўқ эди. Бу муаммони ечишда М.Шоумарова самарали хизмат қилди, бир нечта дарсликлар, ўқув қўлланмалар яратди.

Олий таълим муассасалари учун “Қишлоқ хўжалиги машиналари” фанидан дарслик илк бор яратилди. Мазкур дарсликнинг иккинчи ва учинчи нашрлари ҳам босмадан чиққан бўлиб, Республикамиздаги Қишлоқ хўжалиги институтларида ва Техника университетида асосий дарслик сифатида, илмий ходимлар ва докторантлар учун илмий манба бўлиб фойдаланилмоқда.

Дарсликнинг иккинчи нашри 2011 йили “Йилнинг энг яхши дарслиги ва ўқув адабиёти муаллифи” Республика танловида ғолиб деб топилди.

Олий таълим учун М.Шоумарова “Қишлоқ хўжалиги машиналаридан практикум” ўқув қўлланмасини ёзиб чоп этди. Бундан ташқари коллежлар учун 15 дан ортиқ дарслик ва ўқув қўлланмалар яратган.

Асосий ишига қўшимча ТИҚХММИ даги ихтисослашган илмий кенгаши илмий-техник семинарининг аъзоси сифатида кишлок ва сув хўжалигини механизациялаш ихтисослиги бўйича ёзилган диссертацияларни экспертиза ва оппонентлик қилишда фаол ишлаб келмоқди.

М.Шоумарова факультетдаги ёш ўқитувчиларга методик ёрдам бериб, улар учун очик дарслар, муаммоли маърузалар ташкиллаштиришда амалий ёрдам бермоқда.

Талабалар ва ёш ўқитувчиларни миллий кадриятларни эъзозлаш руҳида тарбиялаш мақсадида турли анжуманларни уюштиришда бош-қош бўлиб келмоқда.

М.Шоумарова билимдон тадқиқотчи ўзига ҳамда ҳамкасбларига нисбатан ўта талабчан механизатор олима. Ўз касбий маҳоратини ошириш устида узлуксиз ишлайдиган, камтарин меҳнатсевар инсон, ёшларларнинг ғамхўр мураббийси.



Техника фанлар доктори, профессор А.А. Ризаев

ЎЗБЕКИСТОН МЕХАНИКЛАРИ

Хурматли, журналхонлар! “Механика муаммолари” Ўзбекистон журнали 2019 йил № 2-сонидан бошлаб **“Ўзбекистон механикларни”** (“Ўзбекистон механик олимлари”) рукни остида энциклопедик характердаги маълумотларни бериб боради. Чунки, Президент Ш.М.Мирзиёевнинг “2019 – 2023 йилларда Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий университетида илмий салоҳиятни ривожлантириш ва замон талабидаги малакали кадрлар тайёрлаш тизимини тубдан такомиллаштириш чора-тадбирлари тўғрисида” ги қарорида табиий фанлар, амалий математика, компьютер технологиялари ва информатика соҳаларига устуворлик берилиши таъкидланган. Шундан келиб чиқиб, ушбу соҳаларда самарали меҳнат қилиб жаҳонга танилган, илмий мактаб яратган, бой илмий меросга эга бўлган Ўзбекистоннинг механик олимлари ҳақида қисқача маълумотларни бериб борамиз. Бундан мақсад: Ўзбекистонда механика фанининг ютуқларини тарғиб қилиш, иқтидорли ёшларни илмий-тадқиқотларга жалб этиш, олимларимиз ижодини ибрат мактаби қилиб улар онгида фанга эътиқод ва ватанпарварликни тарбиялашдан иборатдир. Келгусида журнал материаллари асосида юқоридаги номда энциклопедик китоб нашр қилиш режалаштирилмоқда. Журналнинг ўтган сонларида (2016 йил, №1, 4) “Механиклар учбурчаги” сарлавҳаси остида А.А.Ильошин, Х.А.Раҳматулин, М.Т.Ўрозбоевларнинг илмий мероси, фан учун қилган хизматлари ҳақида қисқача маълумот берган эдик. Ушбу сонда эса, академик-механиклар ҳақида маълумот берамиз. Фикр-мулоҳазаларингиз, таклифларингиз, механик олимлар ҳақида маълумотлар бўлса, журнал таҳририятига юборишингизни сўраймиз.

Таҳририят

“Ўзбекистон механикларни” материалларини доцент Муҳаммад Раҳим тайёрлади

АРЖАНИХ ИВАН СЕМЁНОВИЧ (1914 – 1980)

Таниқли математик ва механик олим, физика–математика фанлари доктори, профессор, Ўзбекистон ФА мухбир аъзоси, Ўзбекистонда хизмат қўрсатган фан ва техника арбоби.

У 1914 йил 24 февралда Киев шаҳрида таваллуд топган. 1931 – 34 йилларда Ўрта Осиё давлат университетида (ҳозирги Ўзбекистон МУ) ўқиган, кейинчалик Ленинград давлат университетида ўқишни ўтказиб, уни 1936 йилда битирган. 1936 – 1937 йилларда Ўрта Осиё давлат университети (САГУ) физика-математика факультетида ассистент, 1938 – 43 йилларда САГУ доценти, 1941 – 42 йилларда кўнгиллилардан бўлиб иккинчи жаҳон урушида қатнашган. 1943 йилда САГУ нинг аэрогидродинамика кафедраси мудири, 1943 – 80 йилларда ЎзР ФА В.И.Ромоновский номидаги Математика институтида катта илмий ходим, математик таҳлил бўлимининг мудири, ТошДУда математик таҳлил кафедраси мудири, 1960 – 62 йилларда ЎзР ФА В.И.Ромоновский номидаги Математика институтида илмий ишлар бўйича директор ўринбосари лавозимларда ишлаган.

Илмий ишлари дифференциал ва интеграл тенгламалар, вариацион ҳисоб, майдонлар назарияси, аналитик механика, квант механикаси, эластиклик назарияси ва бошқа соҳаларга бағишланган. Айниқса, унинг ранги нолдан катта бўлган каноник тенгламалар соҳасидаги кашфиёти алоҳида диққатга сазовор.

У физика ва математиканинг кўпгина бўлимларида математика йўналишлари қаторига боғлиқ дифференциал ва интеграл тенгламалар ва уларнинг иловалари ривожланишида жуда катта ҳисса қўшган. Унга Коши ва Руассон-Якобнинг умумлаштирилган классик услублари дастлабки қаторининг хусусий ишлаб чиқишида чизиксиз тенгламаларнинг қўшма системалари тегишлидир. Олим каноник тенгламаларнинг контакт ўзгарилиши нисбатини умумий кўринишини ўрнатган.

У уч ўлчовли Лайм оператори учун потенциал назария яратган. У гидродинамик соҳаларда аналитик функцияларни тўлиқ аниқланишини, қовушқоқ бўлмаган суюқликнинг уюрмалари (гирдобли) ҳаракатининг уч ўлчовли синфини яратган. У ечимни Грин функцияси ёрдамида тасвирлаш, Лаплас ўзгартиргичи ва ечимни намоиш этишда Фредгольм интеграл тенгламалар назариясига асосланган ҳолда гирдоб ва дивергенция асосида вектор майдонини тузиш усулини ишлаб чиққан.

У 1938 йилда механик тизимнинг мустақамлигига бағишланган “Вековое уравнение и его роль в исследовании качественного поведения интегралов уравнений механики” мавзусида диссертация ҳимоя қилиб, физика-математика фанлари номзоди илмий даражасини олган. 1956 йилда “Интегральные уравнения основных задач теории поля и теории упругости” мавзусида докторлик диссертациясини ҳимоя қилиб, физика-математика фанлари доктори илмий даражасига эга бўлган. 1957 йили унга “Профессор” илмий унвони берилган. 1960 йилда ЎзР ФА мухбир-аъзоси қилиб сайланган. 1961 йилда собиқ Иттифоқ назарий ва амалий механика Миллий қўмитаси аъзоси қилиб сайланган.

Олим 7 та монография, 280 илмий мақолалар ёзган, 20 дан ортиқ монография ва илмий тўпламларга масъул муҳаррирлик қилган. Фанимиз учун 5 та фан доктори, 36 та фан номзоди тайёрлаб берган.

Олимнинг илмий-педагогик фаолияти давлатимиз томонидан муносиб баҳоланган. Унга 1964 йилда

“Ўзбекистонда хизмат кўрсатган фан ва техника арбоби” фахрий унвони берилган. Улуғ ватан уруши ордени ва медаллари, “Ҳурмат белгиси” ордени, Ўзбекистон ССР Олий Совети Президиумининг Фахрий ёрлиқлари билан мукофотланган. У 1980 йил 20 мартда Тошкентда вафот этган.

Асосий асарлари:

1. Интегральные уравнения основных задач теории поля и теории упругости. Ташкент: Фан, 1954. – 108 с.
2. Канонические уравнения ранга, большего нуля. Ташкент: Фан, 1962. – 145 с.
3. Обращение волновых операторов. Ташкент: Фан, 1962. – 164 с.
4. Поле импульсов. Ташкент: Фан, 1965. – 231 с.
5. Многомерная теория поля. Ташкент: Фан, 1978. – 166 с.
6. Опыт классификации математических исследований: категории математического познания. Ташкент: Фан, 1982. – 136 с.

У ҳақидаги адабиётлар:

Ўз МЭ, 1-том, 2000. – 404 б.; Памяти Ивана Семеновича Аржаных // Изв. АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук. 1980. № 4. С. 100 – 101.; Узбекская ССР: Энциклопедия. Ташкент: Энциклопедия, 1981. С. 285, 286, 295, 518; Академия наук УзССР: Справочник. Ташкент: Фан, 1983. С. 51, 382, 509, 510, 550; Боголюбов А.Н. Математики. Механики: Биографический справочник. Киев: Наукова думка, 1983. С. 20; Салахитдинов М.С. Развитие математики в Узбекистане за 60 лет // Изв. АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук. 1984. № 5. С. 3 – 8; Саримсаков Т.А. Постигшие. Ташкент: Фан, 1987. С. 18; Бородин А.И., Бугай А.С. Выдающиеся математики: Биографический словарь-справочник. Киев: Рад. шк., 1988. С. 24; Памяти Ивана Семеновича Аржаных // Изв. АН УзССР. Сер. физ.-мат. наук. 1989. № 2. С. 100 – 102; Иван Семенович Аржаных / Отв. ред. чл.-кор. АН РУз Джурасов Т.Д. Ташкент: Фан, 1989. – 36 с.

УСМОНХЎЖАЕВ ҲАЛИМ ҲАЙДАРОВИЧ (1919 – 1993)

Таниқли механик олим, Ўзбекистонда ҳозирги замон механизм ва машиналар назариясининг асосчиси. У 1919 йил 20 ноябрда Тошкент шаҳрида таваллуд топган. 1937 йилда Енгил саноат билим юртининг ишчи факультетини тамомлаган. 1942-1949 йилларда Тошкент самалётсозлик заводида, Тошкент шаҳар ва вилоят савдо тизими корхоналарида турли лавозимларда ишлаган.

1950 йилда Тошкент Тўқимачилик институтини тамомлаган. 1950-1952 йилларда шу институтнинг “Машиналар ва механизмлар назарияси, тўқимачилик машиналарини лойиҳалаш” кафедрасининг ассисенти, илмий текшириш бўлимининг бошлиғи бўлиб ишлаган; 1952-1954 йилларда собиқ СССР (ҳозирги Россия) ФА Машинасозлик институти аспиранти; 1954 йилда “Автоматик тўқув дастгоҳлари кинематикаси ва динамикасининг баъзи масалалари” мавзусида техника фанлари номзоди илмий даражасини олиш учун диссертация ёклаган, 1965 йилда “Машина ва механизмлар назарияси” мавзуси бўйича докторлик диссертациясини ҳимоя қилган. 1961 йилдан ЎзР ФА М.Т.Ўрозбоев номидаги Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институтининг “Машина ва механизмлар назарияси” лабораторияси мудири, 1989 йилдан шу институтнинг “Пахта териш машиналари назарияси” лабораторияси мудири бўлиб ишлаган. 1967 йилда “Профессор” илмий унвони берилган, 1968 йилда ЎзР ФА мухбир-аъзоси, 1984 йилда ҳақиқий аъзоси қилиб сайланган.

Илмий ишлари, асосан, машина агрегатининг динамикаси, пахта териш ва тозалаш машиналари, тўқимачилик машиналари назариясига доир. Унинг раҳбарлигида пахта териш машиналарининг иш унумини оширувчи ва пахтанинг тўкилишини камайтирувчи таркибий шпиндель яратилган ва ишлаб чиқаришга жорий қилинган. У шпиндель тишлари траекториясига қараб тезлик режимини аниқлашга имкон берувчи «Универсал эпигипоциклограф» асбобни яратган, пахта териш машинаси унумдорлигини олдиндан аниқлаш формуласини ишлаб чиққан. У газлама тўқиш автомат станогини мокиси найча-ларини алмаштиришдаги энергияни аниқлаш асбоби ва б. ихтиролар муал-лифи.

Олим 1969 йил собиқ СССР (ҳозирги Россия) ФА “Машиналар тизими ва назарияси” Илмий кенгашининг аъзоси, 1972 йил “Машиналар назарияси” Халқаро уюшмасининг миллий қўмита аъзоси этиб сайланган. 1962 йилда ўзбек тилида биринчи марта техника олий ўқув юртлари талабалари учун “Механизмлар ва машиналар назарияси” дарслигини ёзди ва у уч марта (1962, 1970, 1981) қайта ишланиб, нашр этилган. Сермаҳсул олим 3 та монография, 88 та кашфиёт, 300 дан ортиқ илмий мақолалар ёзган, 20 дан ортиқ адабиётларга масъул муҳаррирлик қилган. Фанимиз ривожини учун 40 дан ортиқ фан доктори ва номзодларни тайёрлаб берган.



Олимнинг самарли меҳнати давлатимиз томонидан муносиб баҳоланиб, 1982 йилда “Ўзбекистонда хизмат кўрсатган фан арбоби” фахрий унвони берилган. 1989 йилда пахта териш машиналари соҳасидаги тадқиқоти ва уни ишлаб чиқаришга тадбиқ қилгани учун фан ва техника соҳасидаги Абу Райҳон Беруний номидаги давлат мукофоти совриндори бўлган. 1976 йилда “Хурмат белгиси” ордени, 1982 йилда “Фахрли ихтирочи” кўкрак нишони, Ўзбекистон қасаба уюшмалари кенгаши, Олий ва ўрта махсус таълим вазирлигининг “Фахрий ёрлиқ”лари билан тақдирланган. У 1993 йилда вафот этган.

Асосий асарлари:

1. Кинематика и динамика механизмов и машин. Ташкент: Фан, 1969. – 203 с.
2. Механизм ва машиналар назарияси. Дарслик. Тошкент: Ўқитувчи, 1962. – 419 б., 1970 – 576 б., 1981 – 520 б.
3. Справочник-атлас для проектирования, расчета и исследования кривошипно-ползунных механизмов. Ташкент: Фан, 1980. – 263 с.
4. Теория механизмов и производительность хлопкоуборочных машин, Ташкент: Фан, 1990.
5. Механика ва техника инсон хизматида. Тошкент: Фан, 1971. – 48 б.
6. Пахта сирлари ва сеҳрли механизмлар. Тошкент: Фан, 1975. – 72 б.
7. Ўзгарувчан структуралли механизмлар. Тошкент: Фан, 1979. – 72 б.

У ҳақида адабиётлар:

Боголюбов А.Н. Советская школа механики машин. М.: Наука, 1975. – 167 с.; Абдуазимов У., Мухсимов М. Алломалар. Тошкент: Ёш гвардия, 1977. 78 – 95 б.; Академик Ҳалим Ҳайдарович Усмонхўжаев. Хотиралар. Тошкент: ЎзР ФТДҚ, МИСМИ, 1999. – 65 б.; Раҳимжонов Н. Нур – боқийликдир. Эссе. Тошкент: Адолат, 2004. – 100 б.; Усмонхўжаев Ҳ.Ҳ. Ўз МЭ, 2005. 9-том. – 141 б.; Кабулов В.К. М.Т.Уразбаев и механика в Узбекистане. Ташкент: Фан, 1992. С. 54 – 56.

ҚОБУЛОВ ВОСИЛ ҚОБУЛОВИЧ (1921–2010)



Таниқли механик олим. Қобулов Восил Қобулович 1921 йил 5 сентябрда Тошкентда туғилган. 1949 йилларда Тошкент темир йўл муҳандислари институтини тугатган. 1949-50 йилларда Чоржўй – Қўнғирот темир йўл қурилишида ишлаган. 1950-57 йилларда Ўзбекистон ФА Иншоотлар институтида аспирант, илмий ходим бўлган.

1952 йилда “Тўғри тўртбурчак пластинканинг ясси кучланганлик ҳолатини ҳисоблашнинг баъзи усуллари тўғрисида” мавзуси бўйича номзодлик диссертациясини ҳимоя қилиб, Ўзбекистонда илк бор механикани алгоритмлаштириш йўналишини бошлаб берган. 1957 – 1963 йилларда Ўзбекистон ФА Математика институтининг ҳисоблаш техникаси бўлими мудири бўлиб ишлаган.

1961 йилда “Эластиклик ва пластиклик динамик назариясининг баъзи бир ўлчовли ва икки ўлчовли масалалари” мавзусида диссертация ҳимоя қилиб, физика-математика фанлари доктори бўлган, шу йили Ўзбекистон ФА муҳбир-аъзолигига сайланган. 1963 – 1966 йилларда Ўзбекистон ФА Механика институти ва ҳисоблаш маркази директори лавозимида ишлаган. У Ўзбекистонда янги ва истиқболли соҳа – туташ муҳитлар механикасини алгоритмлаштиришни бошлаб берган. 1964 йилда профессор унвони берилган. 1966 йилда Ўзбекистон ФА академиклигига сайланган.

1966 – 1977 йилларда Ўзбекистон ФА Кибернетика институти директори бўлиб ишлаган. 1971 йилда “Эластиклик ва пластиклик назарияси масалаларини ечишни алгоритмлаш бўйича қатор ишлари учун” Беруний номидаги Ўзбекистон давлат мукофоти совриндори бўлган. 1977 йилда “Ўзбекистонда хизмат кўрсатган фан ва техника арбоби” фахрий унвони берилган. 1978 – 1992 йилларда институт Ўзбекистон ФА нинг «Кибернетика» илмий ишлаб чиқариш бирлашмасига айлантирилгач, унинг бош директори лавозимида ишлаган.

Қобулов Восил Қобулович сермахсул олим сифатида 30 га яқин монография, 450 дан ортиқ илмий мақалолар муаллифидир. У республикамиз илм-фани учун 45 та фан доктори, 76 та фан номзоди тайёрлаб берган, 50 дан ортиқ монография ва ўқув қўлланмаларига масъул муҳаррирлик қилган. Олимнинг хизматлари давлатимиз томонидан муносиб баҳоланган. Собиқ Иттифоқнинг “Октябрь революцияси”, “Қизил юлдуз” ва 1998 йилда Ўзбекистон Республикасининг «Эл-юрт хурмати» орденлари ҳамда 12 та медаллари билан мукофотланган.

Илмий ишлари ҳисоблаш техникасини фан, техника ва халқ хўжалигининг турли соҳаларига жорий этиш билан боғлиқ. 2010 йил 21 январда вафот этган.

Асосий илмий ишлари:

1. Интегральные уравнения типа баланса и их применение к динамическому расчету стержней и балок. Ташкент: Изд-во АН УзССР. 1961. – 185 с.

2. Алгоритмизация в теории упругости и деформационной теории пластичности. Ташкент: Фан, 1966. – 394 с.
3. Автоматизированная система проектирования мостовых переходов на ЭВМ / Рахманов У.К. Ташкент: Фан, 1973. – 379 с.
4. Функционал анализ ва ҳисоблаш математикаси. Тошкент: Ўқитувчи, 1976. – 436 б.
5. Методологические основы РАСУ / Ирматов М. И. Ташкент: Фан, 1976. – 173 с.
6. Алгоритмизация в механике сплошных сред. Ташкент: Фан, 1979. – 304 с.
7. Рақамли автоматлар алгоритмалар. Тошкент: Ўқитувчи, 1980. – 192 б.
8. Алгоритмизация в социально-экономических системах / АН УзССР. Узб. науч.-произв. об-ние «Кибернетика», Ин-т кибернетики с ВЦ. Ташкент: Фан, 1989. – 318 с.
9. Олий математика. Тошкент: Ўқитувчи, 1992. – 496 б.
10. Хужайра кибернетикаси. Нанотехнологиялар / Қобулов В.Қ., Қобулов А.В., Қосимова С.С. Халқаро муҳандислар акад., Ўзбекистон муҳандислар федерацияси. Тошкент: Fan va technology, 2011. – 286 б.
11. Арифметические, логические и алгоритмические основы ЭВМ / Кабулов В.К., Кабулов А.В. Международная инженерная академия, Инженерная федерация Узбекистана. Ташкент: Fan va technology, 2011. – 300 с.

У ҳақида адабиётлар:

Қобулов Восил Қобулович // Ўз МЭ. Т. 11. 2005. – 32 б.; Жизнь, посвящённая науке. К 90-летию академика АН РУз В.К. Кабулова. Ташкент, 2011. С. 262.; Академики // Интернет маълумоти: <http://instmech.uz/wp-content/uploads/2014/03/kabulov>.

2021 йилда академик Восил Қобуловнинг 100 йиллигини нишонлаймиз. Шу муносабат билан домланинг 90 йиллигида ёзилган, ҳамкасби ва шогирди, академик Т.Р.Рашидовнинг хотираларини қайта ишлаб, тўлдириб эътиборингизга ҳавола этмоқдамиз – ред.

«ЗАМОНАМИЗ АЛ-ХОРАЗМИЙСИ»

(Устоз Восил Қобуловни эслаб)

Мен ўз ҳаётимда кўпроқ олижаноб, ҳурмат-эътиборга сазовор, ўта захматкаш, мавлоно инсонлар билан учрашганман, улардан сабоқ олганман. Улар қаторидан муҳим ўрин эгаллаган, устоз академик Восил Қобуловдир. Мен илк бор устоз Восил Қобулов билан домлам Мухаммад Тошевич Ўрозбоев тавсиялари билан учрашганман.

М.Т.Ўрозбоев – техника фанлари доктори, профессор, ЎзР ФА академиги, шу пайтлар (1956 й.) Ўзбекистон Фан ва Техника давлат қўмитаси раиси, менинг аспирантура бўйича илмий раҳбарим эдилар. Менинг диссертация мавзуим ер ости қувурларининг зилзилабардошлиги масаласига бағишланган эди. Кейинчалик билсам, устозим 1948 йилдаги Ашхобод зилзиласида айрим қувурларнинг шикастланганлигини кузатиб, Тошкент темир йўллар институти ўқитувчиси Р.М.Мукурдумовга шу масалани ўрганишни топширган эканлар. Рубен Михайлович Мукурдумов айрим ер ости қувурларини, шу жумладан Ашхобод ва Япония зилзилаларида шикастланганлигини таҳлил қилиб, ер ости қувурлари зилзилабардошлиги бўйича изланишлар олиб бориб, номзодлик диссертациясини ёклаган (1953 й.).

У ўз ишида стерженда бўйлама тўлқин тарқалиши назариясини қўллаб, яъни қувур-гурунт тизими зилзила юз берганда биргаликда ҳаракат қилади, деб ҳисоб-китоб қилиб, сўнгра айрим фаразларни илгари сурганлар. Асосий ғоя шуки, у киши қувурлар фақат унинг ўқи бўйича тўлқин тарқалганда шикастланади, деган фикрга келганлар.

Бу масала кейинчалик Грузия профессори Шио Германович Напетваридзеннинг “Гидротехник иншоотлар зилзилабардошлиги” номли докторлик диссертацияси ва монографиясида қайд қилинади (1959 й.). Мен кейинчалик улар бажарган ишларга баҳо бериб, бу натижалар фақат тоғлик шароитларда, гурунтнинг механик хоссалари қувур хоссалари билан яқин бўлганда қўлланиши мумкин, деган фикрни билдирдим. Мен ҳам ўзимнинг биринчи илмий мақоламда (буни техника фанлари номзоди, доцент Юлий Робертович Лейдерман ёрдамида бажарганман) бу фикрни эсга олдим, ер қимирлаганда қувур ва гурунт ҳар хил ҳаракатда бўлишини исботладим.

Юқоридаги ифодалар мен чиқарган назарий ҳулосалардан хусусий ҳолда келиб чиқишини исботладим. Р.М.Мукурдумов ва Ш.Г.Напетваридзе изланишлари натижаларига, динамик зилзилабардошлик назариясига асосланиб, ер ости қувурларининг статик зилзилабардошлик назарияси деб ном бердим.

Шу кезлар устозим М.Т. Ўрозбоев давлат ишлари билан жуда банд бўлар эдилар. Мен эса университетни шу соҳа бўйича ёзилган диплом иши билан тугатган бўлишимга қарамай, илмий йўналишим бўйича адабиётлар қидирав эдим. Ер ости иншоотлари – қувурлари зилзилалар вақтида кам учраганлиги

(ҳозирда бу соҳада адабиётларнинг сон-саногига етиб бўлмайди), мени ҳайратга солар эди, кўп ўйлардим. Нима қилсам экан, домланинг олдига олиб борадиган натижаларим ўзимни қаноатлантирмасди. Қарасам, вақт ўтиб бормоқда, яна оилавий ахволим жуда яхши эмас, оиламиз таянчи бувамлар вафот этдилар, янги оила қурганман, умр йўлдошим оғир касал бўлиб қолганди.

Қандайдир куч топиб, домлам қабулларига бордим, у киши мени куттирмасдан, қабул қилар эдилар. Домламга қўйилган мавзудан бироз норози эканлигимни, адабиёт йўқлигини, зилзилалар пайтида ер ости қувурлари ҳақида гап камлигини айтдим. Ёрдам сўрадим. У киши менга: “Восил акага бор, у сенга ёрдам қилади”, дедилар. Восил Қобулов шу кезлар пластина кўринишидаги иморатлар зилзилабардошлиги масалалари бўйича яхши илмий ишлар бажарган, эластиклик назариясини мукаммал ўрганган ва шу йўналишда докторлик диссертациясини тайёрлаётган эдилар. Йилдан-йилга ўсаётган, кўзга ташланиб қолган ёш олим эдилар. Сал ўтмай фан доктори бўлдилар, диплом олмасдан олдин Ўзбекистон Фанлар академиясининг мухбир аъзолигига сайландилар (1962 й.). Ўзбекистонда ҳисоблаш машиналарининг қўлланиши билан боғлиқ ишлар тақдир у кишига ишониб топширилди. Бу йўналишнинг бошида М.Т.Ўрозбоев ва В.А.Бугаевлар турсада, Математика институти қошида “Ҳисоблаш Маркази”ни ташкил қилишда (1956 й.), Ўзбекистонда биринчи ЭҲМ “Урал-1” ни ишга туширишда (1959 й.) Восил Қобуловнинг ташкилотчилиги, фидойилиги, илмий салоҳияти ҳамда мақсад сари интилувчанлиги ётади.

Ахборот технологиялари жадал ривожланаётган ҳозирги кунда бу соҳанинг алифбосини яратиш, уни ривожлантириш, ЭҲМ ларнинг фанда ҳам, ишлаб чиқаришда ҳам кенг қўлланишини таъминлаш, ҳозирги мустақиллик даврида компьютер техникасидан қийналмай мукаммал фойдалана оладиган мутахассисларни тайёрлашда, халқнинг техник маданиятини юксалтиришда Восил Қобуловнинг ҳиссаси жуда катта эканлигини нафақат соҳа мутахассислари, балки бутун жамоачилик эътирофи ётади.

Ҳаёт шуни кўрсатди-ки, М.Т.Ўрозбоев томонидан Восил Қобуловнинг ахборот технологиялари соҳасига йўналтирилиши (ихтисослашуви) республика, қолаверса собиқ иттифоқ учун ҳам ўта долзарб масаладир, нақадар чуқур ўйланиб қилинган ишдир. Республикада ахборот технологияларининг ривожланиши, фан ва ишлаб чиқаришда ЭҲМ ларнинг қўлланилиши, Кибернетика институтининг ташкил топиши, АСУ (автоматлаштирилган бошқарув тизимлари) нинг жорий қилиниши у кишининг номи билан боғлиқ. Бу соҳада Восил Қобуловнинг ҳиссаси бекиёсдир. У киши Ўзбекистонда кибернетика фанининг асосчиси, ҳаётимизни алгоритмлаштириш соҳасининг кашшофи бўлди. Восил Қобуловнинг илмий салоҳияти, ватанпарварлиги ва ташкилотчилик қобилияти бу соҳани собиқ иттифоқда олдингилар қаторига олиб чиқди, жаҳон эътирофига сазовор бўлди.

Бу ерда Восил Қобуловнинг илмий ва ижтимоий фаолиятини ҳар жиҳатдан қўллаб-қувватлаб турган Фанлар академиясининг Президенти Ҳ.М.Абдуллаев ва Марказкомнинг биринчи котиби, доно раҳбар Ш.Р.Рашидовни алоҳида эслатиб ўтиш жоиздир. Ҳ.М.Абдуллаев Восил аканинг бошлаган ишларига катта умид билан қаради, Фанлар академияси доирасида барча шарт-шароитларни яратиб берди, айниқса, ахборот технологиялари соҳасида миллий кадрлар тайёрлаш масаласига жиддий эътибор берди. Иқтидорли ёшларни Марказдаги таниқли олимларга бириктириб, докторлик диссертацияларини ҳимоя қилишига амалий ёрдам бердилар. Ш.Р.Рашидов эса республиканинг ижтимоий-иқтисодий ва маданий ривожланишининг келажагини ўйлаб, бу соҳага кенг йўл очиб берди, институтни ҳамда кадрларни моддий ва маънавий қўллаб турди. Натижада халқнинг турмуш тарзи ўзгарди, республика ЭҲМ ларни қўллаш бўйича собиқ иттифоқда олдинги ўринга кўтарилди.

Бугун мухтарам Президентимиз Ш.М.Мирзиёев ҳурматли устозларимиз бошлаган ишларни янги мазмун билан бойитиб, сифат жиҳатдан янги юксак босқичга олиб чиққанлиги кишида келажакка умид уйғотади. Илм-фанга, маънавиятга эътиборнинг кучайиши, инновацион ривожланиш вазирлигининг жорий қилиниши, “Обод маҳалла”, “Обод қишлоқ” дастурининг амалда бажарилиши, коррупцияга қарши курашнинг изчил олиб борилиши устозларимиз орзуларининг рўёбга чиқиши эмасми! Зеро, улуғларнинг руҳини шод этган – кам бўлмас. Бугун “Султон – суягин хўрламас”, деган доно халқимизнинг ҳикматиға амал қилиб, сиёсат олиб бораётган Президент атрофида жипслашиб она Ватан равнақи йўлида хизмат қилиш ҳар бир олимнинг муқаддас бурчидир. Бу бизга устозлардан қолган ўғитдир.

Ўрни келганда шуни айтиш жоизки, биз Восил Қобулович билан (мен академиянинг бўлим мудири муовини эдим) 1983 йилда Хоразмда ал-Хоразмийга бағишланган халқаро илмий анжуман ўтказдик (унга ЎзР ФА вице-президенти, жаҳон эътироф этган математик олим, академик С.Сирожиiddинов раислик қилган эдилар). Шу анжумандан бошлаб, ал-Хоразмийнинг математика фанига қўшган ҳиссаси яна бир бор тан олинди, Восил Қобулов эса “Замонамиз ал-Хоразмийси” деган таърифга сазовор бўлдилар. Ҳақли эътироф! Чунки, алгоритмлаштириш жараёнини бошлаб бериб, ал-Хоразмийнинг номини ҳисоблаш техникаси орқали ҳар бир ханодонга олиб кирган Восил Қобуловичдир, буни тан олиш керак!

Мен ЎзР ФА бош илмий котиби, вице-президенти лавозимида ишлаганимда Восил Қобуловнинг ютуқлари, у кишининг қийинчиликлари, ўша йиллар бошига тушган тухматлар гувоҳи бўлганман. Лекин Восил Қобулов забардаст инсон эдилар, қилаётган ишларининг тўғрилигига ишонар эдилар. Ҳеч қачон тушқунликка тушганларини эслай олмайман, иродаси кучли инсон эди. Албатта, “беайб – парвардигор!”

деганларидек, айрим масалаларда кўпроқ таваккаллик ишлари ҳам бор эди, шунинг учун ҳам баъзан танбехлар эшитар, уни кўролмайдиганлар эса шундан фойдаланар эди.

Ўша кезлар биз – республика илмий-техника жамиятлари уюшмаси хайъати аъзолари, улар орасида биринчи Президент Ислом Каримов ҳам бор эдилар, шу кезлар ҳисоблаш техникасининг республикада қўлланишини ривожлантиришга, тегишли кадрлар тайёрлаш масаласига алоҳида аҳамият берар эдик. Ислом Каримовнинг давлат режалаштириш қўмитаси раиси (Госплан) сифатида ҳурмати юқори эди. Давлат томонидан ажратилган маблағларни у киши назорат қилар, қўлларидан келган ёрдамни аямас эди, Восил Қобуловга алоҳида ҳурмат билан мурожаат қилар эдилар.

Энди яна бироз орқага қайтиб, менинг Восил ака билан илк бор мулоқотимга қайтсам. У киши менинг илмий йўналишим ер ости қувурларининг зилзилабардошлиги масаласида эканини эшитиб, бирдан “сенинг бу йўналишингдан ҳеч нарса чиқмайди”, деб юборсалар бўладими (бу гапларни мен у киши тириклигида ҳам журнал саҳифаларида ёзганман). “Сен қалин қувурлар динамикаси устида иш олиб боргин. Эластиклик назариясини қўллайсан, Остроградский-Гамильтон усули билан тенгламалар чиқарасан. Ёчиш йўлларига ёрдам бераман, мана ҳисоблаш масалалари ҳам енгиллашмоқда”, дедилар. Бу ажойиб сўзлар эди. Ҳозир олинаятган натижалар Восил аканинг сўзларини исботламоқда.

Ўша вақтда Восил Қобулов шу йўналишда диссертация тайёрлаётган эдилар. Буни кейин тушундим. Шу тариқа, мен у киши фикрига қўшилдим, унинг гаплари менга оғир ботмади, ҳақиқатан ҳам ўша кезлар ер ости иншоотлари зилзила вақтларида шикастланиши ҳали яхши ўрганилмаган эди, ер ости иншоотларининг ўзи ҳам кам қўрилган эди.

Деярлик бир йил давомида домламнинг олдиларига бормадим. Восил ака қўйган масалада чуқур изланишлар олиб бордим, юзлаб бетлик дафтарлар тўлдирилди. Лекин ҳисоб-китоб масаласи анча олдинда эди. Афсус, бу натижалар ҳозир архивимда йўқолган.

Кунлардан бирида Алишер Навоий номидаги давлат кутубхонасида ишлаб ўтириб, россиялик мутахассислар Аронов ва Емельяновларнинг (улар Ленин мукофоти совриндори эдилар) ер ости қувурларининг кучланишлар тажриба усулида ўрганилган мақолаларига кўзим тушди. Қарасам, М.Т.Ўрозбоев билан мавзуим бўйича биринчи учрашувдаёқ “тенглама тузиб, ушбу қувур ва грунт тизимидаги ўзаро алоқадорликка тегишли қисмидаги коэффициентни ўргансанг, ишинг яхши амалга ошади” деган фикрлари ёдимга тушди. Ўша коэффициент ҳақидаги фикр ушбу тажрибада бироз ёритилган эди. Бу ер ости иншоотлари сейсmodинамика назариясининг бошланиши эди.

Кўчанинг нариги бетида домлам раҳбарлик қилаётган Давлат фан-техника қўмитаси жойлашган эди, дарров у кишининг қабулига кирдим. Қувончимни тушунтирдим. Шунда у киши хотиржам ҳолатда: “Яна қайтишингга ишонган эдим”, дедилар. Шундай қилиб, илмий фаолиятимнинг дастлабки даврларидаёқ менинг тақдирим ҳақида ўйлашган М.Т.Ўрозбоев ва В.Қобуловлардек устоз олимлар билан мулоқотда бўлган эдим.

Шу тариқа М.Т.Ўрозбоев раҳбарлигида номзодлик диссертацияси, сўнгра Москвалик замонамизнинг даҳо механик олими, Россия ФА муҳбир-аъзоси А.А.Ильюшин раҳбарлигида докторлик диссертациясини ёқладим. 1971 йил 9 май куни эрта саҳарда М.Т.Ўрозбоев оламдан ўтдилар, мен эрталаб Москвадан Тошкентга келиб, домламнинг уйларига бордим. Мендан сал сўнг Марказком биринчи секретари Шароф Рашидов ва Марказком секретари Оқил Салимов келдилар. Шунда кетиш олдида Оқил ака менга савол бердилар: “Қачон докторлик диссертациясини ёқлайсиз?”. Шунда мен: “Ёзга мўлжаллаган эдим, энди домлам маъракаларидан сўнг давом эттираман, кузда ёқлайман”, дедим. Оқил ака менга Шароф Рашидов бутун дафн маросимида сўзга чиқишимни ва тез Москвага кетиб, ёзда ёқлашимни тайинлаганларини айтдилар.

Шу куниёқ дафн маросимидан сўнг Москвага кетдим. 29 май куни Академиянинг бўлим бошлиғи Восил Қобуловга Москвадан қўнғироқ қилиб, ишим тайёрлигини айтдим, қайтмоқчи эканимни ҳам билдирдим. Мен айтмасданоқ етиб келишимни, ҳали вақт борлигини таъкидладилар. “Мана мен сенга оппонент бўламан”, деб ўзлари айтдилар. Хурсанд бўлдим. Москвадан проф. М.А.Колтунов ишим билан таниш эдилар, унинг ҳам оппонентликка розилигини олдим. Тошкентдан проф. Қозоқбоев ҳам оппонентликка рози бўлдилар. 1971 йил 2 июнь куни ишим кенгашга қабул қилинди, 2 июль куни Ўзбекистон ФА Хайъат конференция залида докторлик диссертациямни муваффақиятли ёқладим.

Шуни кези келганда алоҳида тилга олишим зарурки, мен диссертацияни тамомлаш учун Москвага кетмоқчи эканлигимни Фанлар академияси Президенти, академик Обид Содиковдан сўраганимда (мен ўша пайтда Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институтининг директори эдим), менга ҳеч йўқ демасдан қўллаб-қувватладилар, шароитлар яратиб бердилар. У кишининг олийжаноблиги ҳақида алоҳида ёзиш зарур ва лозим. У кишини Аллоҳ раҳмат қилган бўлсин!

Мен илк бор мураккаб ер ости иншоотлари сейсmodинамикаси назариясини яратдим ва бутун умримни шу назариянинг ривожига, ҳаётга кенг тадбиқ қилинишига бағишладим. Шогирдларимдан Ё.Н.Муборақов менинг назариямни ривожлантириб, қобиксимон ер ости иншоотларига тадбиқ қилди ва “Фазовий конструкцияли ер ости иншоотлари сейсmodинамик назарияси”ни кашф этди. Мен эришган

натижаларим билан нафакат жаҳонга танилдим, балки шогирдларимнинг ишлари ҳам жаҳонда эътироф этилди.

Албатта, номзодлик диссертациямда илк бор ҳисоблаш машинасини қўллаганман (1964 й.), докторлик диссертациямда авиация конструкциялари динамикасига оид масалалар ечилишида ҳисоблаш машинаси программасини Жуковский номи ЦАГИ да ишларимда илк бор қўллаганман. Бу ерда менга шогирдларимдан, кейинчалик республикамизнинг йирик олимлари даражасига кўтарилган, Ўзбекистон Республикаси давлат мукофоти совриндорлари: проф. Ғ.Хожметов, проф. А.Ишонхожаев, проф. Б.Мардонов, проф. В.А.Омельяненколар катта ёрдам қилдилар.

Шу боис Восил ака билан бирга ўтказган бошланғич кунларим зое кетмади. У киши устоз сифатида ишдаги муваффақиятларимни бошиданок тан олиб, мени қўллаб-қувватладилар. Умрларининг охиригача менга сидқи дилдан, чин юракдан ёрдам қўлини узатиб келдилар, доим сейсמודинамикага ривож тиладилар.

Ўша пайтда Восил ака билан илк бор учрашувда қўйилган масалалар устида ишлаганим менга бугун ҳам қўл келмоқда. Ўша мураккаб интеграллар, юзлаб ҳисобли варақлар бекорга кетмади. Юқори малакали илмий-педагогик кадрлар тайёрлашда, янги масалаларни ҳозирги замон талабларига жавоб берадиган даражада ҳал қилишда Восил Қобулов сабоқлари бугун менга куч бахш этмоқда. У кишининг порлок сиймоси олдида ҳамisha таъзимдаман.

Т.Р. Рашидов,

*ЎзР ФА академиги, ЎзР хизмат кўрсатган фан арбоби,
собиқ иттифоқ ва Ўзбекистон Республикаси давлат мукофоти совриндори*

ФАЙЗУЛЛАЕВ ЖОРУЛЛА ФАЙЗУЛЛАЕВИЧ (1924 – 1992)



Таниқли гидромеханик олим, Ўзбекистонда кўп фазали муҳитлар механикасининг асосчиси. У 1924 йил 11 февралда Тошкент шаҳрида таваллуд топган. 1948 йилда Ўрта Осиё давлат университетининг (ҳозирги Ўзбекистон МУ) физика-математика факультетини тамомлаган. 1947 – 1953 йилларда Тошкент тўқимачилик техникумида, 1953 – 1960 йилларда Тошкент ирригация ва қишлоқ хўжалигини механизациялаш муҳандислари институтида ўқитувчи, 1960 йилда ЎзР ФА М.Т.Ўрозбоев номидаги Механика ва иншоотларнинг сейсмик мустаҳкамлиги институтида катта илмий ходим, 1962 – 1963 йилларда шу институт директори, 1966 – 1970 йилларда директор ўринбосари, 1961 йилдан то умрининг охиригача “Гидродинамика” лабораторияси бошлиғи лавозимларида ишлаган.

1959 йилда “Сикилмайдиган ковушқоқ икки фазали муҳитнинг ўрнатилган ҳаракати ҳақида” мавзуси бўйича физика-математика фанлари номзоди, 1969 йилда “Қувурдаги аралашмалар гидродинамикаси” мавзуси бўйича физика-математика фанлари доктори илмий даражасини олиш учун диссертация ҳимоя қилган. 1971 йилда “Профессор” илмий унвони берилган. 1974 йилда ЎзР ФА мухбир-аъзолигига сайланган.

Илмий ишлари суюқлик ва кўп фазали муҳитлар механикаси, гидродинамика, қон гидродинамикаси, суғориш гидродинамикасига оид. Х.А. Рахматулиннинг кўп фазали муҳитлар ўзаро киришма ҳаракати моделига асосланиб, Файзуллаев аралашмалар ҳаракатига оид масалаларни назарий ва экспериментал ҳал қилди. Реологик хусусиятлари ҳар хил бўлган фазалардан иборат аралашмалар гидродинамикасига оид адабиётларда “Рахматулин — Файзуллаев модели” термини киритилди. Файзуллаев Ж. бир фазали гидродинамик моделларда Ньютон суюқлиги ва бошқа суюқликлар ҳаракатига оид қатор масалаларни, ёпишқоқ ва ёпишқоқ-пластик суюқ-ликлар (сув, нефть)нинг қувурлардаги оқимида бўлган қаршиликларни ка-майтириш тадбирини асослаб берди.

Ўзбекистонда кўп фазачиларнинг илмий мактабини яратган олим 10 та монография, 140 дан ортиқ илмий мақолалар ёзган, 20 дан ортиқ монография ва илмий тўпламларга масъул муҳаррирлик қилган. Фанмиз ривожини учун 10 га яқин фан доктори, 20 дан ортиқ фан номзоди тайёрлаб берган.

Олимнинг механика фанига қўшган ҳиссаси, малакали кадрлар тайёрлашдаги хизматлари давлатимиз томонидан муносиб тақдирланган. У 1981 йилда “Хурмат белгиси” ордени ва 1970 йилда Ўзбекистон ССР Халқ хўжалиги ютуқлари кўргазмасининг 1 даражали дипломи билан мукофотланган. У ЎзР ФА, Республика қасаба уюшмалари кенгаши, Ўзбекистон Ёшлар иттифоқининг Фахрий ёрлиқлари ва кўплаб кўкрак нишонлари билан тақдирланган эди. Олим 1992 йилда вафот этган.

Асосий асарлари:

1. Ламинарное движение многофазных сред в трубопроводах. Ташкент: Фан, 1966. – 220 с.
2. Laminar Motion of Multiphase Media in Conduits. Translated from Russian. New York, 1969. – 144 p.
3. Гидродинамические модели движения смесей. Ташкент: Фан, 1972. – 200 с.
4. Последовательные движения жидкостей. Ташкент: Фан, 1976. – 183 с.

5. Гидродинамика одно- и двухфазных сред и её практические приложения (в соавторстве). Ташкент: Фан, 1980. – 167 с.
6. Гидродинамика пульсирующих потоков (в соавторстве). Ташкент: Фан, 1986. – 215 с.

У ҳақида адабиётлар:

Ўз МЭ, 2005. 9-том. Б. 173; Ташкент. Энциклопедия. Ташкент: ЎзСЭ, 1983. С. 198; Нигматулин Р.И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978. С. 27; Кабулов В.К. Уразбаев и механика в Узбекистане. Ташкент: Фан, 1992. С. 36 – 37; Рашидов Т.Р. Развитие механики в Узбекистане. Ташкент: Фан, 1986. С. 9 – 10, 13; Устозларни ёдлаб. Хотиралар. Тошкент: МИСМИ, 2009. 16 – 21 б.

ГЛУЩЕНКО АЛЕКСЕЙ ДАНИЛОВИЧ (1934 – 2010)

Машинасозлик соҳасида таниқли олим, ихтирочи, техника фанлари доктори, профессор, ЎзР ФА академиги.

У 1934 йил 10 октябрда Ашхабод шаҳрида ишчи oilасида таваллуд топган. 1948 – 1953 йилларда Ашхабод темир йўл транспорти техникумида таҳсил олган. 1953 – 1958 йилларда Тошкент темир йўл транспорти муҳандислари институтида таҳсил олиб, Тошкент тепловоз ва вагонларни таъмирлаш заводида ишлаган. 1959 – 1960 йилларда ЎзР ФА М.Т.Ўрозбоев номидаги Механика ва иншоотларнинг сейсмик мустаҳкамлиги институтида илмий ходим, 1960 – 1963 йилларда Тошкент темир йўл транспорти муҳандислари институти аспиранти, 1964 – 1971 йилларда шу институтнинг доценти, катта илмий ходими, 1971 – 1979 йилларда “Ҳаракатланувчи таркиб” кафедраси мудири, 1979 – 1984 йилларда Механика факультети декани, 1984 – 1990 йилларда ЎзР ФА Президиуми аъзоси, механика ва бошқарув бўлимининг академик-котиби, 1990 – 1998 йилларда ЎзР ФА М.Т.Ўрозбоев номидаги Механика ва иншоотларнинг сейсмик мустаҳкамлиги институтининг “Пахта териш машиналари” бўлими раҳбари, 1998 – 2004 йилларда Тошкент темир йўл муҳандислари институтининг “Машиналарни лойиҳалаш асослари” кафедраси мудири лавозимларида ишлаган.



У 1964 йилда техника фанлари номзоди илмий даражасини олиш учун “Тик шпинделли пахта териш машинаси шпинделларидаги тебранишлар натижасида таянч нукталарга тушувчи кучлар таъсирини ўрганиш” мавзусида, 1971 йилда техника фанлари доктори илмий даражасини олиш учун “Пахта териш машиналаридаги шпинделлари тикишган териш апаратининг асосий қисмларида содир бўладиган динамик жараёнларни ўрганиш” мавзусида диссертация ҳимоя қилган. 1973 йилда “Профессор” илмий унвони берилган, 1984 йилда ЎзР ФА академиклигига сайланган. Илмий фаолияти пахта териш машиналарини такомиллаштиришга, транспорт машинасозлиги ва локомотив ҳўжалиги назариясига бағишланган.

У сермахсул олим сифатида 9 та монография, 210 дан ортиқ илмий мақолалар ёзган, ихтирочи сифатида 512 дан зиёд кашфиёт қилган, 11 та монографияга масъул муҳаррир бўлган. Машинасозлик илми учун 6 та фан доктори, 40 дан зиёд фан номзодларини етказиб берган. Олимнинг илмий-педагогик фаолияти давлатимиз томонидан муносиб баҳолиниб, 1994 йилда “Шухрат” медали билан тақдирланган. У 2011 йил 11 июнда вафот этган.

Асосий асарлари:

1. Динамика тяговых электродвигателей тепловозов. Ташкент: Фан, 1980. – 168 с.
2. Динамика механизмов привода шпинделей уборочных аппаратов хлопкоуборочных машин. Ташкент: Фан, 1985. – 153 с.
3. Динамика и оптимизация хлопкоуборочного аппарата многократной обработки растений хлопчатника. Ташкент: Фан, 1990. – 232 с.
4. Моделирование динамических взаимодействий долек хлопка и шпинделей в хлопкоуборочных аппаратах. Ташкент: Фан, 1995. – 132 с.
5. Исследование импульсного динамического и теплового нагружения материала колесных пар локомотивов. Ташкент: Фан, 2002. – 194 с.

У ҳақида адабиётлар:

ЎзР МЭ, 2002. Т.3. 42 б.; Алексей Данилович Глущенко – 70 лет. Ташкент: Фан, 2004. – 88 б.; Кабулов В.К. М.Т.Уразбаев и механика в Узбекистане. Ташкент: Фан, 1992. С. 56 – 57.; Рашидов Т.Р. Развитие механики в Узбекистане. Ташкент: Фан, 1986. С. 32 – 34.

БЎРИЕВ ТОЖИБОЙ (1938 – 2008)



Деформацияланувчи қаттиқ жисм механикаси мактабининг йирик вакили, эластиклик-пластикликнинг деформацион назариясини ривожлантиришга катта ҳисса қўшган таниқли олим, физика-математика фанлари доктори, профессор, ЎзР ФА академиги, Абу Райҳон Беруний номидаги Ўзбекистон давлат мукофоти совриндори.

У 1938 йил 12 майда Тошкент вилояти, Тошкент туманида таваллуд топган. 1961 йилда ҳозирги Ўзбекистон Миллий университетининг механика-математика факультетини аспирантурага кириш тавсияномаси билан битирган. 1961 – 63 йилларда ЎзР ФА Математика институти қошидаги Ҳисоблаш Маркази аспиранти, 1964 – 65 йилларда ЎзР ФА Механика институти қошидаги Ҳисоблаш Марказида кичик илмий ходим, 1966 – 71 йилларда ЎзР ФА Кибернетика институти Ҳисоблаш Марказида катта илмий ходим, 1972 – 75 йилларда Ҳисоблаш Маркази раҳбари ҳамда ЭҲМ математик таъминоти лабораторияси мудир, 1976 – 80 йилларда инфорацион изланиш тизимлари, 1981 – 2002 йилларда конструкцияларнинг автоматлаштирилган лойиҳалаш тизимлари лабораторияси мудир лавозимларида ишлаган.

Илмий ишлари қаттиқ жисм механикасига оид масалаларни алгоритмлашга, статик ва динамик юк таъсиридаги бир ўлчовли ва кўп ўлчовли конструкцияларнинг аниқ ҳисобларига, эластиклик назариясининг динамик ва статик масалаларига бағишланган. У сейсмик (8 – 9 балли) ва носейсмик (5–7 балли) минтақалар ва қорли-шамолли ҳудудлар учун фазовий стерженли конструкцияларни мустаҳкамлик, барқарорлик ва минимал оғирлик мезонлари асосида ишлаб чиқди. У янги техника, саноат, қурилиш объектлари конструкцияларига қўйилган ташқи кучнинг ортиши билан ривожланадиган пластик деформациянинг конструкция мустаҳкамлигига таъсирини эластик-пластик деформациялар тарихида биринчи бўлиб ЭҲМ да узил-кесил ҳал этди. Кўп ораликли фазовий конструкциялар тарихида биринчи бўлиб эластик устунлар ҳамкорлигини эътиборга олиш, статик, динамик, сейсмик кучлар қўйилганида тенг мустаҳкамлик мезони бўйича устуворлик ва минимал оғирлик шартларини қаноатлантириб оптималлаш назариялари ҳамда қўйилган муаммоларни ҳал этадиган янги усуллар, тежамкор алгоритмлар, тезкор дастурий мажмуалар ишлаб чиқди.

1965 йилда физика-математика фанлари номзоди илмий даражасини олиш учун “Эллиптик плиталарни ҳисоблашда ЭҲМ ни тадбиқ қилиш” мавзусида, 1974 йилда физика-математика фанлари доктори илмий даражасини олиш учун “Юпка деворли конструкциялар кўтарувчи элементлари ҳисобини алгоритмлаш” мавзусида диссертация ҳимоя қилган. Унга 1976 йилда “Профессор” илмий унвони берилган. 1989 йилда ЎзР ФА муҳбир-аъзолигига, 2000 йилда ҳақиқий аъзолигига сайланган.

Олим Ўзбекистонни жаҳонга фазовий конструкцияларда пластик деформацияларни тадқиқ этиш ва оптимал лойиҳалашга оид илмий ишлари билан танитди. У 4 та монография ва 380 га яқин кашфиёт, илмий мақолалар ёзган. Устоз сифатида 2 та фан доктори, 10 дан ортиқ фан номзодини тайёрлаб берган.

Унинг самарали илмий-педагогик фаолияти давлатимиз томонидан муносиб тақдирланган. 1971 йилда Абу Райҳон Беруний номидаги Ўзбекистон давлат мукофоти соҳиби бўлган. 1986 йилда “Ҳурмат белгиси” ордени, 1977 йилда “Фуқаро мудофааси аълоҳиси” медали, 1956 йилда Ўзбекистон Олий Кенгаши Президиуми Фахрий ёрлиғи билан мукофотланган. У 2008 йил 27 июлда вафот этган.

Асосий асарлари:

1. Расчет тонких плит на ЭВМ. Ташкент: Фан, 1976. С. 132.
2. Алгоритмизация расчета несущих элементов тонкостенных конструкций. Ташкент: Фан, 1986. – 244 с.
3. Разработка и реализация на ЭВМ экономических алгоритмов решения краевых и оптимизационных задач механики деформируемого твердого тела. (Препринт. – НПО «Кибернетика», Р-3-4), Ташкент, 1988. С. 44.
4. Алгоритмическая система расчета трехмерных упругих тел. Ташкент: НПО «Кибернетика» АН РУз, 1994. С. 147. (в соавторстве)
5. Обеспечение безопасности конструкций сложных объектов в экстремальных ситуациях. Ташкент: Fan va technology, 2009. С. 148.

У ҳақидаги адабиётлар:

Ўз МЭ. Т. 2. 2001. Б. 348; Замондошимиз Тожибой Бўриевнинг кашфиёти // “Совет Ўзбекистони” газетаси, 1990 йил 12 декабрь сони; Олимнинг ижод олами // “Тошкент окшоми” газетаси, 1988 йил 20 сентябрь сони; Тожибой Бўриев (Ўзбекистон олимларининг ҳаётига оид материаллар. Масъул муҳаррирлар: проф. Орипов М.М., проф. Худойбергенов Қ.). Тошкент: ЎзР ФА “Замонавий инфорацион технологиялари” илмий-техникавий маркази, Ўз МУ. 2018. Б. 88.

ЛЕБЕДЕВ ОЛЕГ ВЛАДИМИРОВИЧ (1940 – 2010)

Таниқли механик олим, техника фанлари доктори, профессор, ЎзР ФА академиги, Қорақалпоғистон Республикасида хизмат кўрсатган фан арбоби. У 1940 йил 25 январда Тошкент шаҳрида таваллуд топган. 1958 – 1962 йилларда Тошкент ирригация ва қишлоқ хўжалигини механизациялаш муҳандислари институтининг “Қишлоқ хўжалигини механизациялаш” факультетида таҳсил олиб, ўқишни тугатгач, ТИИИМСХ нинг “Автомобиллар ва тракторлар” кафедрасида ассистент бўлиб ишлаган.

1967 йилда техника фанлари номзоди илмий даражасини олиш учун “Юқори тезликдаги пахтачиликка мўлжалланган чопиқ трактори ҳаракати турғунлиги тидкиқи” мавзусида диссертация ҳимоя қилган. 1969 йилда “Автомобиллар ва тракторлар” кафедрасининг доценти, 1970 – 1971 йилларда ТИИИМСХ “Қишлоқ хўжалигини механизациялаш” факультети декан муовини, 1971 – 1981 йилларда шу институтнинг илмий ишлар бўйича проректори бўлиб ишлаган. 1976 – 1978 йилларда Н.Э.Бауман номидаги Москва олий техника билим юртининг сиртки докторантурасида таҳсил олган. 1979 йилда техника фанлари доктори илмий даражасини олиш учун “Ғилдиракли тракторлар руль бошқаруви илмий асосларини ишлаб чиқиш” мавзусида диссертация ҳимоя қилган. 1980 йили Тошкент автомобил йўллари институтининг “Автомобиллар ва тракторлар” кафедраси “Профессори” илмий унвони берилган.

1980 – 1987 йилларда ВАСХНИЛ Ўрта Осиё бўлими вице-президенти лавозимида, 1987 йилда ЎзР ФА академиклугига, шу йили Фанлар академиясининг вице-президенти лавозимида сайланган. У 1984 – 1994 йилларда собиқ СССР ОАК аъзоси эди, 1990 йилда физика бўйича Нобел мукофоти комитетининг эксперти, ЎзР ФА физика-математика бўлими раиси, 1994-2009 йилларда ЎзР ФА М.Т.Ўрозбоев номидаги Механика ва иншоотлар сейсмик мустаҳкамлиги институтининг “Юритмалар тизимлари динамикаси ва ишончлилиги” лабораторияси мудир бўлган эди. Унинг илмий ишлари ғилдиракли машиналарнинг руль бошқармалари ва бошқа механизмларнинг гидродинамика назарияси; истиқболли гидрокучайтиргичлар босими манбаларини лойиҳалаш ва ҳисоблаш; машина ва механизмларни техник талабларга асосан синтезлашга оид.

Сермаҳсул олим жаҳонга машҳур 10 монография, 80 дан ортиқ кашфиёт, 500 дан зиёд илмий мақолалар муаллифидир. Фақат тракторларнинг олдинги ғилдираги, гидропривод ва гидротизими, руль бошқаруви оид 80 та кашфиёти пахтага ишлов беришга мослашган тракторларда қўлланиб келинмоқда. Олимнинг раҳбарлигида 7 та фан доктори ва 20 дан ортиқ фан номзоди жаҳоннинг турли мамлакатларида фаол ишлаб келмоқдалар. У Италия, Куба, Россия, Малайзия, АҚШ, Ҳиндистон, Танзания, Сирия, Исроил, Тунис, Германия каби мамлакатларнинг нуфузли университетларида маърузалар ўқиган.

Олимнинг илмий-педагогик фаолияти давлатимиз томонидан муносиб баҳоланиб, 1981 йилда “Қорақалпоғистон Республикасида хизмат кўрсатган фан арбоби” фахрий унвони берилган. 1994 йилда “Мустақиллик” медали, 1999 йилда Тошкент автомобил йўллари институтининг “Хизмат кўрсатган профессор” дипломи ва бир неча вазирликларнинг “Фахрий ёрлик”лари билан тақдирланган. У 2010 йил 31 июлда вафот этган.

Асосий асарлари:

1. Технологические основы регенерации отработанных масел. Ташкент: Фан, 1998. – 155 с.
2. Научные основы эксплуатационной надежности гидропривода машин, применяемых в сельском хозяйстве Каракалпакии. Нукус: Каракалпакстан, 1983. – 156 с.
3. Машина деталларини тиклаш технологияси. Тошкент: Техника олий ўқув юртлари учун дарслик, 2001. – 282 б.
4. Теория, расчет и особенности специализированных тракторов. Ташкент: Фан, 2006. – 161 с.
5. САПР в машиностроении. Ташкент: Фан, 2004. – 111 с.
6. Предпосылки к дизайну легкового автомобиля класса С; Д; Е. Ташкент: Узбекистан, 2002. – 151 с.
7. Основы эксплуатации гидроприводов системы машин, применяемых в хлопководстве. Ташкент: Фан, 1982. – 143 с.
8. Подвески легковых автомобилей (теория и расчет методом имитационного моделирования). Ташкент: Фан, 2006. – 202 с.
9. Мехатронные системы машин. Ташкент: ИМиСС АН РУз, 2010. – 219 с.
10. Динамические режимы и хаотические движения элементов приводов машин. Ташкент: ИМиСС АН РУз, 2010. – 141с.

У ҳақида адабиётлар:

WhoisWho. Достижения ученых. Сборник Американского биографического института; Ўз МЭ. 2003. Т. 5. 241 б.; Олег Владимирович Лебедев. Ташкент: Фан, 2010. С. 79; Ташкентский автомобильно-дорожный институт – 30 лет. Ташкент: ТАДИ, 2002. С. 132 – 135, 196 – 199.



МУНДАРИЖА

А. Абдусаттаров, Н.Х. Собиров. Цистерна типдаги цилиндрик қобикни кучланганлик ва деформацияланганлик ҳолати тадқиқ қилиш.....	3
А.И. Адылходжаев, И.М. Махаматалиев, В.М. Цой, И.А. Кадыров. Маҳаллий зеолит таркибли тоғ жинслари билан цемент бетонларни тўлдириш самарадорлиги.....	9
А.М. Арифжанов, А.Р. Бабаев, Д. Абдураимова, Н.К. Латипов. Напорли қувурларда дарё чўкиндиларини тақсимотига доир тадқиқотлар.....	13
А.М. Каримов. Даврий тузилишли ёпишқоқ эластик аралаш муҳитнинг дисперсия тенгламаси.....	18
К.С. Лесов, А.Х. Мавланов. Темир йўллар контакт тармоғи анкерларини кумли грунтли ер полотносида ўрнатишдаги кўтариш қобилияти.....	21
Р.Х. Пирматов, А.В. Захаров, В.С. Чикматузянц. Бир қаватли тўсиқ конструкцияларни товуш изоляциясини график усулида ҳисоблаш.....	23
У. Раҳманов. Ўзаро таъсир этувчи “грунт-иншоот” тизимини жойлаштириш чуқурлиги ва сейсмик тўлқиннинг йўналишини ҳисобга олиб ташқи кучлар таъсиридаги кучланганлик ҳолатини ҳисоблаш.....	27
Я.О. Рузметов. Вагонларнинг тўқнашув вақтида юк ва қўғламанинг деформацияланган ҳолати тўғрисида.....	29
Ш.С. Файзибаев, М.Ш. Валиев, Н.А. Самборская. Гилдирак жуфтликлари бандажларининг гребени юзасида ёриқлар пайдо бўлиш шартлари.....	33
Н.А. Коршунова, М.И. Рузматов. Астероид орбитасини ўзгартириш учун янги вариант.....	38
Ф. Адилов, Ш. Махмудова, Д. Сағдуллаева, Р.А. Абилов. Мураккаб юксизланиш бўйича ўтказилган тажриба маълумотлари.....	41
А. Бегматов, Н.Т. Маматова. Ташқи муҳит билан ўзаро таъсирда бўлган эластик-пластик стерженнинг зарбавий таъсири масаласи.....	44
З.М. Маликов, Ф.Х. Назаров, Д.П. Наврузов. Марказдан қочма чанг туггич масалаларини k – ε модели орқали сонли ечиш.....	52
К.Д. Салямова, Х.Х. Турдикулов. Табiiй кузатиш натижаларини ҳисобга олган ҳолда грунтли баланд тўғонларни статик кучланганлик ҳолати.....	58
А.А. Шермухамедов, Г.К. Аннакулова, Б.Ж. Астанов. Юқори энергияли универсал чопиқ трактори гидравлик осма тизимининг динамик ҳисоби ва экспериментал натижалари таҳлили.....	62
О.Х. Эшкабилов, Г. Гулямов, Н.С. Абед, С.С. Негматов, М.Н. Тухташева. Пахта хом ашёси билан ўзаро таъсирдаги композицион антистатик-иссиқлик ўтказувчи полимер материалларнинг антифрикцион хоссаларини аниқлаш қурилмаси ва методикаси.....	66
Б.А. Кушимов, К.А. Каримов, А.Х. Аҳмедов. Ташқи физик майдонлар ёрдамида қуриштириш жараёнини математик моделларини яратиш ва уларнинг аналитик ечимларини топиш. 2 қисм.....	71
А.С. Садриддинов, А.Т. Мусурмонов. Боғ оралғида тупроққа ишлов берувчи машина ҳаракати динамикасини ўрганиш.....	75

Илмий ахборотлар

А.А. Абдурахимов. Реакторнинг иш ҳаракати тўғрисида.....	81
А. Абдусаттаров. Қовушқоқ эластик-пластик жисмларнинг мураккаб такрорий юкланишлар таъсирида деформацияланиши, емирилиши ва узок муддатли мустаҳкамлиги жараёнларини башорат қилиш.....	84
Х.А. Байбулатов, У.Ю. Хамдамов, Ж.Г. Гайилов. Темир бетон қўприкларнинг таянч қисимларидаги ва конструкцияларининг характерли нуқсонлари.....	91
Э. Гайбназаров. Колосникли панжара сиртида ҳаракатланаётган пахта хомашёсидан ифлосликларни ажратиш жараёнининг назарий таҳлили.....	94
Б.М. Мардонов, Р.Ш. Сулаймонов. Линтер машинасининг ишчи камерасида айланаётган валнинг деформацияланган ҳолатини ўрганиш учун донатор муҳит моделини қўллаш.....	98
К.С. Султанов, С.И. Исмоилова, Ш.Э. Туланов. Пахта ипининг мустаҳкамлигини баҳолашнинг тақрибий усули.....	101

Хроника

Г.Х. Хожметов. ҚМҚ 2.01.03-96 – “Зилзилавий ҳудудларда қурилиш” нинг IV “Ер ости иншоотлари ва муҳандислик тармоқлари” бўлимининг янги таҳрири учун.....	103
Шоумарова Мухайё 80 ёшда.....	105
Ўзбекистон механикалари.....	106

СОДЕРЖАНИЕ

А. Абдусаттаров, Н.Х. Собиров. Исследование НДС цилиндрической оболочки-котла цистерны по полубезмоментной теории.....	3
А.И. Адылходжаев, И.М. Махаматалиев, В.М. Цой, И.А. Кадыров. Об эффективности заполнения цементных бетонов местными цеолитсодержащими породами.....	9
А.М. Арифжанов, А.Р. Бабаев, Д. Абдураимова, Н.К. Латипов. Исследование распространения речных отложений по напорным трубопроводам.....	13
А.М. Каримов. Дисперсионное уравнение вязкоупругих композитов периодической структуры.....	18
К.С. Лесов, А.Х. Мавланов. Несущая способность анкеров контактной сети железных дорог при установке в земляном полотне из песчаных грунтов.....	21
Р.Х. Пирматов, А.В. Захаров, В.С. Чикматузянц. Графический метод расчета звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций.....	23
У. Рахманов. Расчет напряженного состояния взаимодействующей системы " грунт – сооружение" на действие внешних сил с учетом направления действия сейсмической волны и глубины заложения.....	27
Я.О. Рузметов. О деформированном состоянии груза и подкладок при маневровых соударениях вагонов.....	29
Ш.С. Файзибаев, М.Ш. Валиев, Н.А. Самборская. Условия возникновения трещин на поверхности гребней бандажей колесных пар.....	33
Н.А. Коршунова, М.И. Рузматов. Новый вариант изменения орбиты астероида.....	38
Ф. Адиллов, Ш. Махмудова, Д. Сагдуллаева, Р.А. Абиров. Некоторые экспериментальные данные по сложной разгрузке.....	41
А. Бегматов, Н.Т. Маматова. Задача о внезапном нагружении упругопластического стержня, взаимодействующего с окружающей внешней средой.....	44
З.М. Маликов, Ф.Х. Назаров, Д.П. Наврузов. Численные решения задачи центробежного пылеуловителя на основе модели $k - \varepsilon$	52
К.Д. Салямова, Х.Х. Турдикулов. Статическое напряженное состояние высокой грунтовой плотины с учетом данных натурных наблюдений.....	58
А.А. Шермухамедов, Г.К. Аннакулова, Б.Ж. Астанов. Анализ динамического расчета и экспериментальных результатов гидравлической навесной системы энергонасыщенного универсально-пропашного трактора.....	62
О.Х. Эшкабилов, Г. Гулямов, Н.С. Абед, С.С. Негматов, М.Н. Тухташева. Установка и методика определения антифрикционных свойств антистатически-теплопроводящих композиционных полимерных материалов, взаимодействующих с хлопком-сырцом.....	66
Б.А. Кушимов, К.А. Каримов, А.Х. Ахмедов. Разработка и аналитическая реализация математических моделей процесса сушки с помощью внешних физических полей (Часть 2).....	71
А.С. Садриддинов, А.Т. Мусурмонов. Изучение динамики движения садовой почвообрабатывающей машины.....	75

Научные сообщения

А.А. Абдурахимов. О режиме работы реактора.....	81
А. Абдусаттаров. К прогнозированию процессов деформирования, повреждаемости и длительной прочности вязкоупругопластических тел при сложных циклических нагружениях (обзор).....	84
Х.А. Байбулатов, У.Ю. Хамдамов, Ж.Г. Гайибов. Характерные дефекты и повреждения конструкций опорных частей железобетонных мостов.....	91
Э. Гайбназаров. Теоретический анализ процесса отделения сорных примесей от хлопка-сырца во время его движения по колосниковой решетке.....	94
Б.М. Мардонов, Р.Ш. Сулаймонов. Применение модели зернистой среды для изучения деформированного состояния вращающегося валика в рабочей камере линтерной машины.....	98
К.С. Султанов, С.И. Исмоилова, Ш.Э. Туланов. Приближенный метод оценки прочности хлопчатобумажной пряжи.....	101

Хроника

Г.Х. Хожметов. К новой редакции раздела IV «Подземные сооружения и инженерные сети» КМК 2.01.03-96 – «Строительство в сейсмических районах».....	103
Шоумаровой Мухайё – 80 лет.....	105
Механики Узбекистана.....	106

Редактор: Н.А. Нишонов
Технический редактор: Е.В. Ан

Журнал зарегистрирован Агентством по печати и информации Республики Узбекистан 22.12.2006 г.
Регистрационный номер 0050.

Сдано в набор 12.07.2019. Подписано в печать 15.08.2019.
Формат 60×84 ¹/₈. Гарнитура Times New Roman. Ризография.
Усл.-печ. л. 13.48. Уч.-изд. л. 9.06. Тираж 100. Заказ № 615.
Цена договорная.

Отпечатано в Минитипографии АН РУз:
100047, г. Ташкент, ул. акад. Я. Гулямова, 70.