

Рис. 4. Кинетика плавления модели при  $T_s=750\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $DS=3\text{ мм}$ :  
1 – поверхность модели; 2 – центр модели

**Б.С. Чуркин, Э.Б. Гофман,  
А.А. Горшков, В.В. Карпов,  
Е.А. Шука**

### **КИНЕТИКА ЗАПОЛНЕНИЯ МЕТАЛЛОПРОВОДА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОТЛИВОК ВАКУУМНЫМ ВСАСЫВАНИЕМ ПО ПЕНОПОЛИСТИРОЛОВЫМ МОДЕЛЯМ\***

Заполнение металлопровода является первой стадией заливки формы при литье вакуумным всасыванием. При этом в нижней части полости формы оформляется зазор толщиной  $d_z$  (рис. 1).

В начале процесса давление воздуха в вакуумной камере  $P_k$  и в зазоре с металлопроводом  $P_\phi$  равно атмосферному  $P_a$ . В дальнейшем давление в вакуумной камере уменьшается из-за истечения воздуха в ресивер через установленную в вакуумпровод диафрагму. Давление  $P_\phi$  при этом уменьшается за счет фильтрации воздуха через стенку песчаной формы в вакуумную камеру.

\* Исследования проведены при финансовой поддержке Министерства образования Российской Федерации в форме гранта.

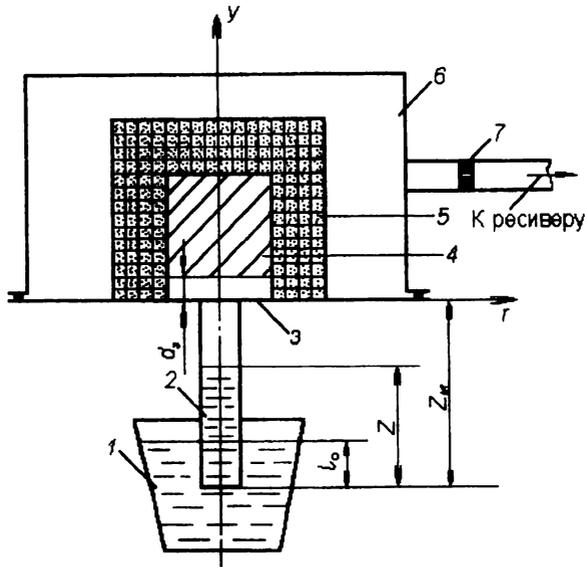


Рис. 1. Схема установки:

1 – тигель с расплавом; 2 – металлопровод; 3 – зазор; 4 – пенополистироловая модель; 5 – стенка формы; 6 – вакуумная камера; 7 – диафрагма

Выведем уравнение для описания фильтрации воздуха через стенку формы. Уравнение неразрывности газового потока имеет вид

$$\Pi \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\text{div}(\vec{v} \cdot \rho), \quad (1)$$

где  $\Pi$  – пористость слоя песка в стенке формы;

$\rho$  – плотность воздуха в порах слоя;

$\vec{v}$  – вектор скорости фильтрации;

$\text{div}(\vec{v} \cdot \rho)$  – дивергенция величины  $(\vec{v} \cdot \rho)$ .

В цилиндрических координатах

$$\text{div}(\vec{v} \cdot \rho) = \frac{\partial(v_r \cdot \rho)}{\partial r} + \frac{\partial(v_y \cdot \rho)}{\partial y} + \frac{v_r \cdot \rho}{r}. \quad (2)$$

В соответствии с законом Дарси

$$v_r = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial r} \quad \text{и} \quad v_y = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial y}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент проницаемости слоя;

$\mu$  – динамический коэффициент вязкости воздуха;

$P$  – давление в данной точке слоя.

Приняв в соответствии с уравнением Клапейрона–Менделеева  $\rho = \frac{P}{RT}$ , где  $R$  – универсальная газовая постоянная, после преобразований уравнения (1) с учетом (2) и (3) получаем

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{k}{\mu \Pi} \left( \left( \frac{dP}{dr} \right)^2 + P \frac{d^2 P}{dr^2} + \left( \frac{dP}{dy} \right)^2 + P \frac{d^2 P}{dy^2} + P \frac{dP}{dr} / r \right). \quad (4)$$

Данное уравнение решали методом конечных разностей при следующих краевых условиях:

$$P(r, y, t = 0) = P_a; \quad (5) \quad P(r = R, y \leq d_3, t) = P_\phi; \quad (8)$$

$$\left( \frac{dP}{dr} \right)_{(r=R, y > d_3, t)} = 0; \quad (6) \quad \left( \frac{dP}{dy} \right)_{y=0} = 0; \quad (9)$$

$$P(r = R + \delta_\phi, y, t) = P_r; \quad (7) \quad P(r, y = H_0, t) = P_r, \quad (10)$$

где  $R$  – радиус модели;

$\delta_\phi$  – толщина стенки формы;

$H_0$  – высота формы.

После дифференцирования уравнений Клапейрона–Менделеева для воздуха в камере и объеме зазора и незаполненной части металлопровода получаем следующие уравнения для расчета давлений в камере  $P_x$  и металлопроводе  $P_\phi$ :

$$\frac{dP_\phi}{dt} = (-S_x P_\phi v_\phi + P_\phi \omega_m v_m) / ((Z_m - Z) \omega_m + \omega_\phi d_s); \quad (11)$$

$$\frac{dP_{\kappa}}{dt} = (S_{\phi} P_{\phi} v_{\phi} T_{\kappa} / T_{\phi} - \omega_{\phi} P_{\kappa} 0,61 \sqrt{7(\xi^{1,423} - \xi^{1,714}) RT_{\kappa}}) / V_{\kappa}, \quad (12)$$

где  $S_{\phi}$  – площадь поверхности контакта стенки формы с зазором;  
 $v_{\phi}$  – скорость фильтрации газа на границе зазора и стенки формы;  
 $v_{\kappa}$  – скорость сплава в металлопроводе.  
 $\omega_{\kappa}$  – площадь сечения металлопровода;  
 $Z$  – уровень сплава в металлопроводе относительно его нижнего торца;  
 $\omega_{\phi}$  – площадь поперечного сечения полости формы;  
 $\omega_{\delta}$  – площадь проходного сечения диафрагмы;  
 $P_p$  – давление в ресивере;  
 $V_{\kappa}$  – объем камеры;  
 $T_{\kappa}$  и  $T_{\phi}$  – температура воздуха в камере и зазоре.

$$\xi = 0,59 P_{\phi} / P_{\kappa} + 0,41.$$

Уравнение (12) написано в адиабатическом приближении.

$$v_{\phi} = -\frac{\kappa}{\mu} \left( \frac{\partial P}{\partial r} \right)_{r=R}. \quad (13)$$

Скорость сплава в металлопроводе рассчитывали с применением нестационарного уравнения Бернулли

$$\frac{dv_{\kappa}}{dt} = \frac{P_a - P_{\phi}}{\rho Z} - \frac{v_{\kappa}^2}{Z} - \frac{g(Z - l_0)}{Z}; \quad (14) \quad v_{\kappa} = \frac{dZ}{dt}. \quad (15)$$

Систему уравнений (4)–(15) решали на ПЭВМ при следующих исходных данных:  $R=0,06$  м; диаметр металлопровода  $D_m=0,06$  м;  $R=287,14$  Дж/(кг·К);  $\mu=0,0000185$  Па·с;  $T_{\kappa}=293$  К;  $T_{\phi}=533$  К;  $P_a - P_p=66640$  Па;  $Z_m=0,8$  м;  $l_0=0,4$  м;  $H_0=0,2$  м;  $K=32 \cdot 10^{-14}$  GP, где GP – газопроницаемость слоя песка по ГОСТ 23409.6–78. В расчетах варьировали величины  $S_{\phi}$ ,  $V_{\kappa}$ , GP и  $\delta_{\phi}$ .

Как показала обработка расчетных данных, кинетику изменения величин разрежений в камере и металлопроводе можно аппроксимировать формулами:

$$P_a - P_{\kappa} = (P_a - P_p)(1 - \exp(-\beta_{\kappa} t)); \quad (16)$$

$$P_a - P_{\phi} = (P_a - P_{\kappa})(1 - \exp(-\beta_{\phi} t)), \quad (17)$$

где  $\beta_\kappa$  и  $\beta_\phi$  – газодинамические коэффициенты, зависящие от указанных варьируемых величин.

Кинетика заполнения металлопровода с достаточной точностью может быть описана формулой

$$Z \approx Z_p = l_0 + \frac{P_a - P_p}{\rho_c g}, \quad (18)$$

где  $\rho_c$  – плотность сплава.

На рис. 2 и 3 приведены примеры кинетики изменения разрежения в камере и зазоре и уровня сплава в металлопроводе по данным машинного расчета и по уравнениям (16)–(18) при некоторых условиях. Из графиков видно, что погрешность применения формул (16)–(18) не превышает 10 %.

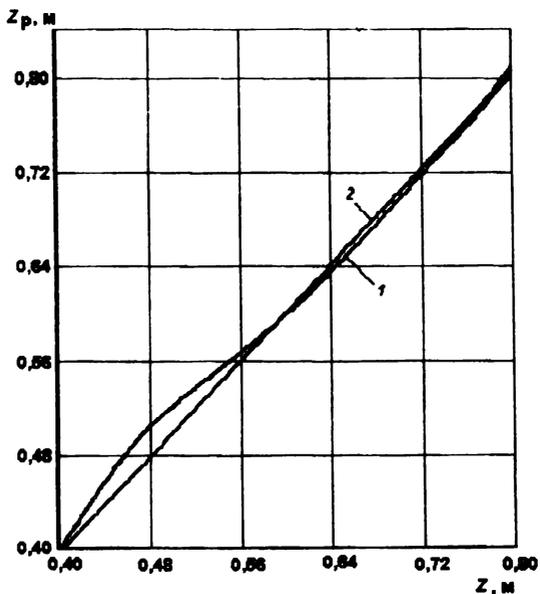


Рис. 2. Соотношение уровней сплава в металлопроводе по данным машинного расчета ( $Z$ ) и расчета по формуле (17):

1 –  $d_s=0,01$  м;  $\omega_\delta=78,5$  мм<sup>2</sup>;  $V_\kappa=0,15$  м<sup>3</sup>;  $GP=300$ ;  $\delta_{cp}=0,1$  м;  $\beta_\kappa=0,092$  с<sup>-1</sup>;  $\beta_\phi=1,76$  с<sup>-1</sup>; 2 –  $d_s=0,004$  м;  $\omega_\delta=7,07$  мм<sup>2</sup>;  $V_\kappa=0,15$  м<sup>3</sup>;  $GP=100$ ;  $\delta_{cp}=0,1$  м;  $\beta_\kappa=0,43$  с<sup>-1</sup>;  $\beta_\phi=0,0124$  с<sup>-1</sup>

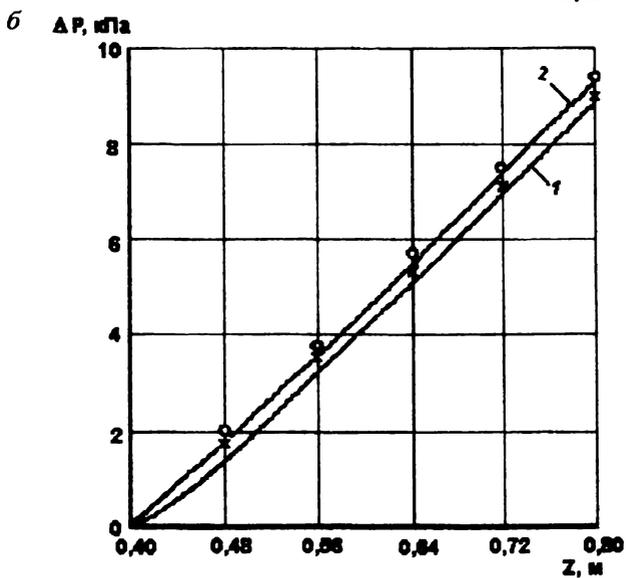
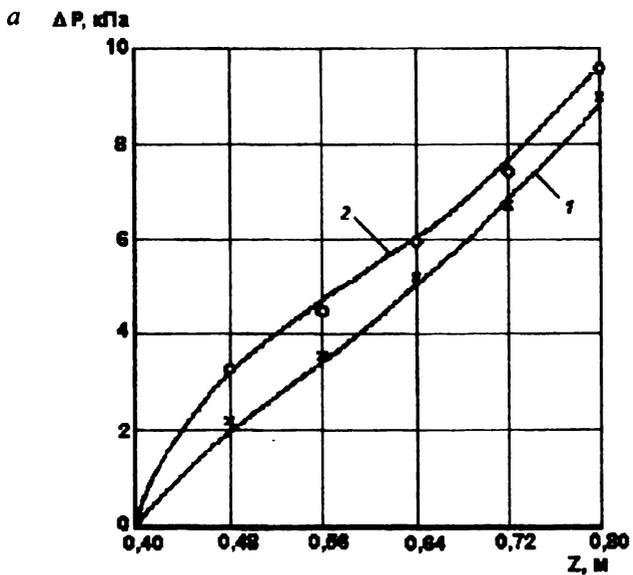


Рис. 3. Кинетика изменения разрежения  $\Delta P$  в камере (а) и в полости формы (б):  
1 и 2 – расчет по формулам (15) и (16); x, o – данные машинного расчета