

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_x и в зазоре с металлопроводом P_ϕ равно атмосферному P_a . В дальнейшем давление в вакуумной камере уменьшается из-за истечения воздуха в ресивер через установленную в вакуумпровод диафрагму. Давление P_ϕ 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.

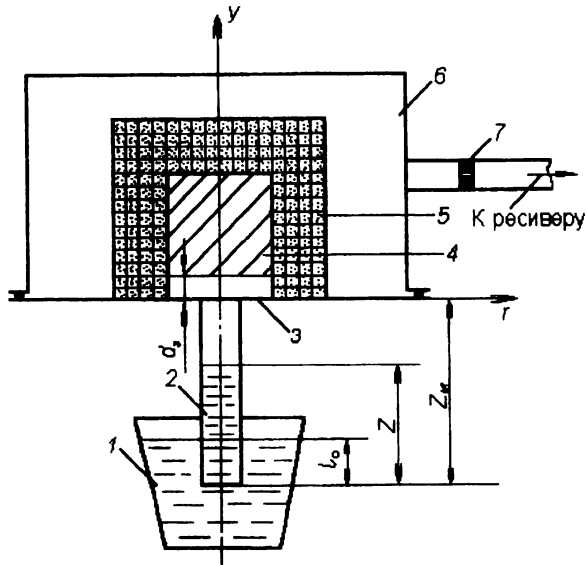


Рис. 1. Схема установки:

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 Π – пористость слоя песка в стенке формы;

ρ – 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;

μ – 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:

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

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

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

где R – радиус модели;

δ_ϕ – 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_ϕ :

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

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

где S_{ϕ} – площадь поверхности контакта стенки формы с зазором;
 v_{ϕ} – скорость фильтрации газа на границе зазора и стенки формы;
 v_{κ} – скорость сплава в металлопроводе.
 ω_{κ} – площадь сечения металлопровода;
 Z – уровень сплава в металлопроводе относительно его нижнего торца;
 ω_{ϕ} – площадь поперечного сечения полости формы;
 ω_{δ} – площадь проходного сечения диафрагмы;
 P_p – давление в ресивере;
 V_{κ} – объем камеры;
 T_{κ} и T_{ϕ} – 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_{ϕ} , V_{κ} , GP и δ_{ϕ} .

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 β_k и β_ϕ – 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 ρ_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 %.

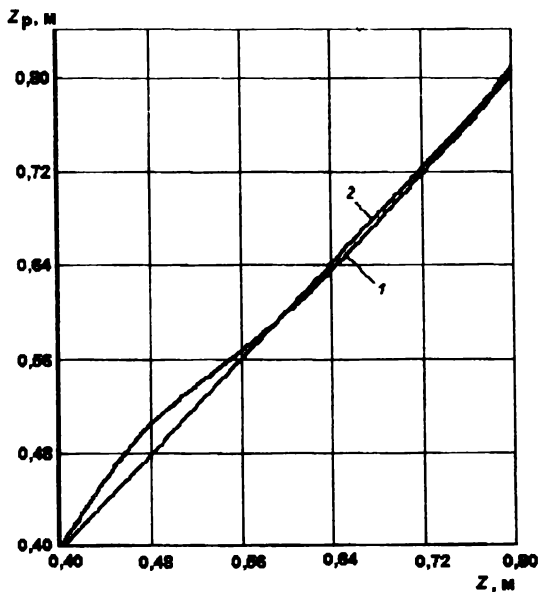


Рис. 2. Соотношение уровней сплава в металлопроводе по данным машинного расчета (Z) и расчета по формуле (17):

1 – $d_s=0,01$ м; $\omega_\delta=78,5$ мм²; $V_x=0,15$ м³; $GP=300$; $\delta_{cp}=0,1$ м; $\beta_k=0,092$ с⁻¹; $\beta_\phi=1,76$ с⁻¹; 2 – $d_s=0,004$ м; $\omega_\delta=7,07$ мм²; $V_x=0,15$ м³; $GP=100$; $\delta_{cp}=0,1$ м; $\beta_k=0,43$ с⁻¹; $\beta_\phi=0,0124$ с⁻¹

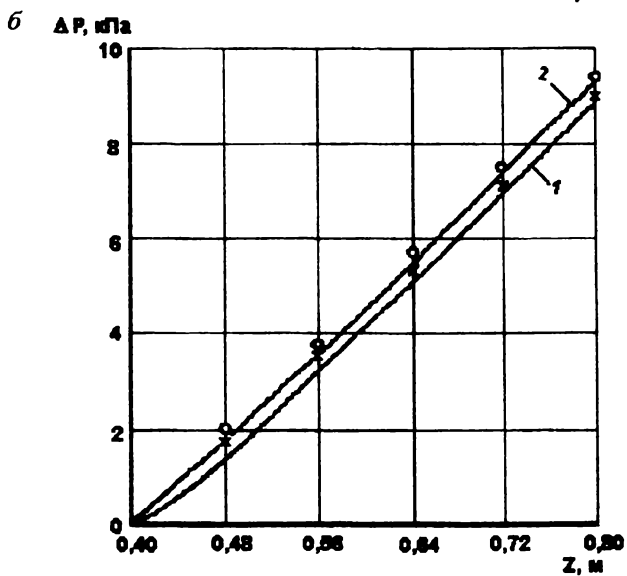
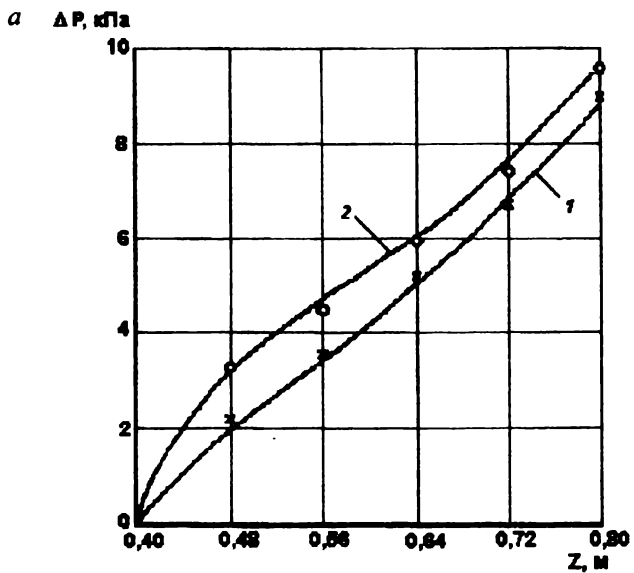


Рис. 3. Кинетика изменения разрежения ΔP в камере (а) и в полости формы (б):
 1 и 2 – расчет по формулам (15) и (16); x, o – данные машинного расчета