## УДК 621.744.532.546

#### В. М. Карпенко, канд. техн. наук, доц.

# РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС И МЕХАНИЗМ УПЛОТНЕНИЯ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ В ВОЗДУШНО-ИМПУЛЬСНЫХ ФОРМОВОЧНЫХ МАШИНАХ

В статье проанализированы принцип воздушно-импульсного процесса уплотнения формовочных смесей и характер распределения плотности песчано-глинистой смеси по объему формы. При импульсном воздействии на формовочную смесь потоком воздуха в ней возникают напряжения. Изменение этих напряжений по высоте опоки зависит от перепада давления, воздействующего на смесь воздуха (статическая составляющая); силы вязкого взаимодействия смеси и фильтрующегося через ее поры воздуха; сил инерции смеси; сил внешнего трения. В статье приведена реологическая модель формовочной смеси при импульсных методах уплотнения и обоснована математическая модель рабочего процесса в воздушно-импульсной головке.

#### Введение

В последнее десятилетие широкое распространение получили импульсные формовочные машины. По сравнению с широкоизвестным встряхивающе-прессовым методом импульсное уплотнение получение чрезвычайно обеспечивает сложных форм, в том числе с глубокими карманами в оснастке, минимальными расстояниями между моделями, а также между моделями и стенками опоки. Это позволяет не только улучшить геометрическую точность отливок, но и существенно снизить припуски на механическую обработку.

В настоящее время в промышленности применяются воздушно-импульсные (ВИФ) и – реже – газоимпульсные (ГИФ) формовочные установки. Воздушно-импульсные формовочные установки подразделяются на два типа: ВИФ высокого давления (5–8 МПа) и ВИФ низкого давления (0,5–0,6 МПа).

Воздушно импульсные формовочные установки высокого давления широкого распространения не получили по ряду причин (в частности, эти установки требуют специального компрессора высокого давления, имеют уровень шума выше допустимых норм, а также наличие вент в модельной оснастке).

Воздушно импульсные формовочные установки низкого давления лишены этих недостатков. Поэтому далее рассматрива-

ются именно такие установки.

Основной целью исследования являлось изучение рабочего процесса и механизма уплотнения формовочных смесей в воздушно-импульсных формовочных машинах, в ходе которого были установлены факторы, влияющие на напряжения в формовочной смеси, на длительность импульса в различных импульсных установках, на силу инерции смеси как основного фактора уплотняющего воздействия.

# Принцип импульсного уплотнения и характер распределения плотности смеси по объему формы

Принцип воздушно-импульсного процесса уплотнения формовочной смеси (рис. 1): при открытии клапана 2 поток сжатого воздуха из ресивера 1 через отверстие 3, подклапанную полость 4 мгновенно воздействует на смесь 5, находящуюся в наполнительной рамке 6 и опоке 7, разгоняет ее по направлению к модели 8 и модельной плите 9, где смесь резко тормозится и под действием сил инерции уплотняется. Отработанный сжатый воздух через специальный клапан сброса давления или через венты в модельной оснастке, а частично через неплотности соединений оснастки и машины, уходит в атмосферу. За время импульса ( $t_u = 0,01-0,02$  с) смесь уплотняется до технологически необходимой плотности ( $\delta = 1,45-1,65$  г/см<sup>3</sup>) и твер-

## дости (T = 80-90 ед.).

На рис. 1 показана схема воздушно-импульсной установки низкого давления ВИФ/НД. Ресивер 1 имеет значительно больший объем по отношению к объему уплотняемой смеси (в 3–4 раза), а давление воздуха в ресивере составляет 0,5–0,6 МПа. Воздушно-импульсная установка высокого давления ВИФ/ВД по самой сути не отличается от установок низкого давления. Но объем ресивера у последних меньше или равен объему уплотняемой смеси, а давление, как уже отмечалось выше, составляет 5–6 МПа.



Рис. 1. Схема воздушно-импульсного процесса

За счет быстродействия привода<sup>\*</sup> клапана длительность импульса в установках ВИФ/НД  $t_u = 0,01-0,02$  с, а в установках ВИФ/ВД  $t_u = 0,1-0,2$  с. Поскольку в ВИФ/ВД давление очень высокое, то при открытии клапана в смеси от воздействия потока воздуха образуется кратер. Чтобы избежать образования кратера, над смесью устанавливают рассекатель (плита с множеством перфорированных отверстий).

Эпюра распределения плотности по высоте опоки показана на рис. 1: внизу по ладу – максимальная плотность, верхний слой – неуплотненный; обычно этот слой ( $\Delta = 20-50$  мм) либо срезают, либо допрессовывают.

Распределение плотности по объему формы также неравномерное: в карманах оснастки плотность ниже, чем в надмодельной области. Однако эта неравномерность существенно ниже при импульсном уплотнении, чем при других способах формовки.

Как средняя плотность, так и неравномерность плотности по объему формы зависят от величины градиента давления dp/dt, воздействующего на смесь.

В общем случае при импульсном воздействии на формовочную смесь потоком воздуха в ней возникают напряжения. Изменение этих напряжений по высоте опоки зависит от перепада давления, воздействующего на смесь воздуха (статическая составляющая); силы вязкого взаимодействия смеси и фильтрующегося через ее поры воздуха; сил инерции смеси; сил внешнего трения.

Зависимость напряжений от этих сил в элементарном слое *dy* выражается уравнением [4]

$$\frac{d\sigma}{dy} = -(1-m) \cdot \frac{dp}{dy - \rho \cdot m \cdot R_{\phi}} - (a-g) \cdot \delta - \xi \cdot f \cdot \frac{\Pi_0}{F_0} \cdot \sigma, \qquad (1)$$

где  $\sigma$  – сжимающее напряжение в смеси; *m* – пористость смеси; *p* – давление воздуха, действующее на слой смеси;  $\rho$  – плотность воздуха;  $R_{\phi}$  – сила взаимодействия смеси с потоком фильтрующегося воздуха; *a* – ускорение сил инерции смеси; *g* – ускорение силы тяжести;  $\delta$  – текущее значение плотности смеси; *f* – коэффициент внешнего трения;  $\xi$  – коэффициент бокового давления;  $\Pi_0, F_0$  – периметр и площадь опоки соответственно.

Влияние первого и второго члена уравнения существенно для работы воздушно-импульсных установок высокого давления. Второй член характеризует силы инерции и имеет существенное влияние в установках низкого давления. Третий член уравнения характеризует силу внутреннего трения.

Параметр dp/dt в импульсных машинах является определяющим, так как чем больше dp/dt, тем выше скорость и ускорение движения смеси, тем выше сила инерции и плотность смеси.

Значение этого параметра в современных импульсных установках низкого воздушного давления колеблется в пределах от 60–100 до 150–200 МПа.

Длительность импульса  $t_u$  в различных импульсных установках сокращают по-разному. Первый путь – повышение быстродействия привода клапана, второй – увеличение суммарной площади выпускных отверстий. Возможно применение этих двух способов вместе. Чем больше площадь сечения выпускных отверстий и меньше время срабатывания клапана, тем  $t_u$  меньше и эффективность процесса уплотнения выше.

Таким образом, параметр dp/dt зависит от конструктивных параметров

#### машины и давления воздуха в ресивере.

Сила инерции смеси – основной фактор уплотняющего воздействия. Она прямо пропорциональна величине градиента давления dp/dt. Градиент давления является суммарным конструктивно-технологическим фактором, поскольку на его величину влияют несколько других конструктивно-технологических факторов; объем ресивера, давление сжатого воздуха в ресивера, объем подклапанной полости (полость, находящаяся между смесью и днищем ресивера), площадь выпускного отверстия клапана и время открытия клапана.

Из рис. 2 видно, что при увеличении длительности импульса всего лишь на 0,005 с (кривая 1) до 0,01 с (кривая 2) градиент давления уменьшается более чем в 2 раза [1–3].

# Реологическая модель формовочной смеси при импульсных методах уплотнения

Механизм уплотнения смеси при импульсных методах формообразования существенно отличается от уплотнения статическими методами [5–8]. Импульсное уплотнение сжатым воздухом или продуктами сгорания горючих газов происходит следующим образом.

Передний фронт волны сжатия, проникая в смесь, последовательно, слой за слоем, разрушает первоначальную структуру. Происходит разрыв когезионных связей между частицами смеси, образующими объемную вязкость. Скорость деформации настолько велика, что вязкие оболочки связующего ведут себя практически как твердые тела. Структурный воздух, заключенный в смеси, сжимается непосредственно волной сжатия. Таким образом, сопротивление уплотнению оказывает лишь тело *H*<sub>0</sub>, характеризующее кулоново трение в смеси при объемном уплотнении. По окончании процесса активного уплотнения связи частиц смеси вновь восстанавливаются. Исходя из этих представлений может быть предложена реологическая модель при импульсном уплотнении (рис. 3, в).

Дифференциальное уравнение движения для данной реологической модели может быть записано в виде [4]

$$M_0 \frac{d^2 \varepsilon}{dt^2} = -3K_{H_0^*} \varepsilon, \qquad (2)$$

где  $M_0$  – масса смеси;  $K_{H^*_a}$  – модуль уп-

ругости песчаной основы смеси; є – относительная деформация.

Характеристическое уравнение имеет вид:

$$K + q = 0 , \qquad (3)$$

reka chiera а его корни  $K_1 = \beta \cdot i$  и  $K_2 = -\beta \cdot i$ , где  $\beta = \sqrt{q}$ .



Рис. 2. Влияние длительности импульса на величину градиента давления



Рис. 3. Реологические модели формовочной смеси: а – для динамических способов (сжатие); б – на сдвиг (модель Бингама); в – для импульсных способов

Общее решение

$$y = C_1 \cdot \cos\beta \cdot t + C_2 \cdot \sin\beta \cdot t . \qquad (4)$$

#### В начальный момент времени

$$y_{(t=0)} = C_1 \cdot \cos \beta_{(t=0)} + C_2 \cdot \sin \beta_{(t=0)},$$
 (5)

откуда

$$C_{1} = 0; \quad y'_{(t=0)} = C_{2} \cdot \cos \beta_{(t=0)}; \quad \frac{1}{t_{u}} = C_{2}\beta;$$
$$C_{2} = \frac{1}{t_{u}} \cdot \frac{1}{\beta} = \frac{1}{t_{u}} \cdot \frac{1}{\sqrt{q}} = \frac{1}{t_{u}} \cdot \sqrt{\frac{M_{0}}{3 \cdot K_{H}^{*}}}$$

И

$$A = \sqrt{\frac{M_0}{3 \cdot K_H^*}}; \qquad \varphi = 0.$$
 (6)

Таким образом,

$$\varepsilon = \frac{1}{t_u} \cdot \sqrt{\frac{M_0}{3 \cdot K_H^*}} \cdot \sin \sqrt{\frac{3 \cdot K_H^*}{M_0}} t .$$
 (7)

Проходя последовательно, слой за слоем, передний фронт волны сжатия запаздывает относительно начального момента нагружения каждый раз на промежуток времени  $t_o$  и изменяет свою амплитуду  $\frac{1}{t_{u_0}} < \frac{1}{t_u}$ . В рассуждениях принима-

ем, что на характер уплотнения не влияет трение о боковые стенки опоки и уменьшение столба смеси по высоте.

Расчеты по формуле (7) воздушноимпульсного уплотнения формовочной смеси с начальной плотностью  $\delta_0 = 1,0$  г/см<sup>3</sup> в опоках 400×500×340 показывают удовлетворительное совпадение с результатами опытов.

## Рабочий процесс и механизм уплотнения

Пусть имеется импульсная головка, состоящая из ресивера объемом  $V_p$  и воздушного клапана массой  $m_{\kappa}$  с площадью поперечного сечения  $F_{\kappa}$ . Ресивер сообщается через выпускное отверстие площадью  $f_e$  с полостью рассекателя объемом  $V_{pc}$ . Рассекатель представляет собой пластину с отверстиями, суммарная площадь сечения которых равна  $f_{pc}$ . Коэффициент расхода для выпускного отверстия обозначим  $\mu_e$ , для плиты рассекателя –  $\mu_{pc}$ .

К импульсной головке герметично прижата технологическая емкость (опо-

ка), заполненная формовочной смесью с массой  $m_{pc}$  и начальной плотностью  $\delta_o$ . Объем пор в формовочной смеси обозначим через  $V_n$ . Модельная плита снабжена вентами. Суммарная площадь их сечений равна  $f_{en}$ , а коэффициент расхода обозначим через  $\mu_{en}$ .

Рабочий процесс головки заключается в истечении сжатого воздуха из ресивера с последующим удалением через венты в атмосферу. По аналогии с пескодувным процессом воздушный поток можно разделить на три последовательные ступени [4]:

1) ступень  $p - p_c$ : истечение сжатого воздуха из ресивера p в полость рассекателя  $p_c$  через впускное отверстие;

2) ступень  $p_c - H$ : течение воздуха из полости рассекателя  $p_c$  в надопочное пространство H (полость прессования);

 ступень *H*−*a*: фильтрация воздуха через формовочную смесь и истечение через венты в атмосферу *a*.

При этом ресивер и полость рассекателя имеют постоянный объем, объем надопочного пространства в течение процесса растет за счет осадки смеси, а атмосфера имеет неограниченно большой объем.

Первую ступень процесса можно рассматривать как опорожнение полости постоянного объема. Поскольку объем ограниченный, параметры истекающего воздуха будут переменными во времени. Уравнение энергетического баланса в этом случае можно записать в следующем виде (считаем процесс адиабатическим, теплообмена с окружающей средой нет):

$$-k \cdot R \cdot T_n \cdot G_n \cdot d\tau = V_n \cdot dp_n, \quad (8)$$

где k — показатель адиабаты, для воздуха k = 1,405; R — газовая постоянная;  $T_p$ ,  $p_p$  — текущие температура и давление воздуха

в ресивере;  $G_p$  – секундный весовой расход воздуха из ресивера,

$$G_p = \mu_{\scriptscriptstyle 6} \cdot f_{\scriptscriptstyle 6} \cdot \psi_{\scriptscriptstyle 6} \cdot \frac{P_p}{\sqrt{R \cdot T_p}}, \qquad (9)$$

где  $\psi_e$  – функция расхода для выпускного отверстия,

$$\psi_{g} = \sqrt{\frac{2g \cdot k}{k-1}} \left( \left(\frac{P_{pc}}{P_{p}}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_{pc}}{P_{p}}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right).$$
(10)

При 
$$0 < \frac{P_{pc}}{P_p} < 0,528$$
 воздух из реси-

вера будет истекать с постоянной скоростью, близкой или равной скорости звука. Расход при этом будет постоянным и максимальным, а  $\psi = 2615$  ( $\psi$  – коэффициент истечения воздуха).

При 
$$0,528 < \frac{P_{pc}}{P_p} < 1$$
 скорость истече-

ния воздуха будет меньше скорости звука, а расход будет переменным, постоянно уменьшающимся.

Поскольку при расширении 
$$T_p$$
 сильно падает, то пользоваться при ана-  
литических расчетах текущим ее значени-  
ем неудобно. Выразим температуру через  
начальное значение температуры воздуха  
 $T_0$  в ресивере до начала процесса, считая  
процесс адиабатическим.

Процесс в рассекателе можно рассматривать как одновременное заполнение и опорожнение полости постоянного объема. Уравнение энергобаланса имеет вид:

$$K \cdot R \cdot T_{pc} \cdot (G_p - G_{pc}) \cdot d\tau = V_{pc} \cdot dP_{pc}, \quad (11)$$

где  $P_{pc}$  – индекс, показывающий принадлежность соответствующих параметров рассекателю.

Расход воздуха в полости рассекателя

$$dG_{pc} = \left(G_p - G_{pc}\right) \cdot d\tau \,. \tag{12}$$

Изменение удельного объема возду-

ха при этом

$$dV_{pc} = \frac{G_{pc} \cdot dV_{pc} - V_{pc} \cdot dG_{pc}}{G_{pc}^{2}} = \frac{dV_{pc} - V_{pc} \cdot dG_{pc}}{G_{pc}}.$$
 (13)

Поскольку объем полости рассекателей постоянный, то

$$dV_{pc} = -V_{pc} \cdot \frac{dG_{pc}}{G_{pc}}; \qquad (14)$$
$$dP_{pc} = k \cdot P_{pc} \cdot \frac{dG_{pc}}{G_{pc}} = k \cdot \frac{P_{pc}}{V_{pc}} \cdot V_{pc} \cdot dG_{pc} \cdot (15)$$

Процесс в полости прессования более сложный. Во-первых, объем не постоянный, а увеличивается по мере осадки формовочной смеси при уплотнении. Во-вторых, идет фильтрация, которой нельзя пренебрегать, так как из-за малой вязкости расширившегося воздуха она протекает более активно. Втретьих, идет теплообмен между фильтрующимся воздухом и формовочной смесью, в результате чего их температура выравнивается. Поскольку масса смеси много больше массы воздуха и теплоемкость смеси велика, то фактически фильтрат принимает температуру окружающей среды. В-четвертых, фильтрация лимитируется вентами. К тому же пористость смеси в течение процесса меняется и в конце процесса достигает минимума.

Учесть все это при расчете в настоящее время невозможно. Примем ряд допущений.

1. Коэффициент проницаемости смеси в течение процесса не меняется и не зависит от площади вент. Влияние же эффективной площади вент и изменение пористости учтем специальным коэффициентом  $K_{ev}$ .

2. Примем линейный закон изменения гидравлического напора по высоте формы.

Как известно, закон Дарси гласит, что количество фильтрата, прошедшего

через пористую среду, зависит от гидравлического напора. С учетом вышеизложенного можно записать

$$G_{\phi} = \frac{K_{_{GH}} \cdot k \cdot \gamma \cdot F_{_{OI}} \cdot P_{_{H}}}{\eta \cdot H_{_{OI}}}, \qquad (16)$$

где  $G_{\phi}$  – секундный расход фильтрующегося воздуха;  $K_{\scriptscriptstyle en}$  – коэффициент, учитывающий степень вентиляции и непостоянность пористости формы, определяется экспериментально; k – коэффициент проницаемости;  $\gamma$  – объемный вес воздуха;  $\eta$  – вязкость воздуха;  $F_{on}, H_{on}$  – площадь и высота опоки.

Расход воздуха в полости прессования

$$dG_H = \left(G_{pc} - G_{\phi}\right) \cdot d\tau . \qquad (17)$$

Изменение удельного объема воздуха в полости прессования (аналогично)

$$dV_{H} = \frac{dV_{H} - V_{H} \cdot dG_{H}}{G_{H}}.$$

Изменение давления

$$G_{H}$$
  
Изменение давления  
$$\frac{dP_{H}}{d\tau} = \frac{k \cdot P_{H} \cdot V_{H}}{V_{H}} \times \left( \mu_{pc} \cdot f_{pc} \cdot \psi_{pc} \cdot \frac{P_{pc}}{\sqrt{R \cdot T_{pc}}} - \frac{K_{eu} \cdot k \cdot F_{on} \cdot P_{u}}{\eta \cdot V_{H} \cdot H_{on}} \right) - \frac{k \cdot P_{H} \cdot dV_{H}}{V_{H} \cdot d\tau}.$$
(19)

Последний член выражения (19) учитывает изменение объема надопочного пространства. Оно зависит от скорости перемещения V<sub>bc</sub> свободной поверхности верхнего слоя формовочной смеси. Действительно,

$$\frac{k \cdot P_{H} \cdot dV_{H}}{V_{H} \cdot d\tau} = \frac{k \cdot P_{H} \cdot F_{H} \cdot dH_{H}}{F_{H} \cdot H_{H} \cdot d\tau} = \frac{k \cdot P_{H} \cdot V_{\phi c} \cdot d\tau}{H_{H} \cdot d\tau} = \frac{k \cdot P_{H} \cdot V_{\phi c}}{H_{H} \cdot d\tau}, \quad (20)$$

где  $H_H, F_H$  – начальная высота и площадь надопочного пространства.

Скорость перемещения слоя смеси зависит от начальной насыпной плотности и других свойств самой смеси. По практическим данным, при импульсных способах наибольшая скорость верхнего слоя составляет 10-12 м/с. Ее и следует брать для расчетов. Таким образом, рабочий процесс в воздушно-импульсной головке в первом приближении можно описать следующей системой уравнений:

$$\frac{dP_{p}}{d\tau} = -\frac{k \cdot \mu_{s} \cdot f_{s} \cdot \psi_{s}}{V_{p}} \cdot \sqrt{R \cdot T_{p}} \cdot P_{p} \cdot \sqrt{\left(\frac{P_{p}}{P_{0}}\right)^{\frac{k-1}{k}}}; (21)$$

$$\frac{dP_{pc}}{d\tau} = \frac{k \cdot \sqrt{R \cdot T_{o}}}{V_{pc}} \cdot \sqrt{\left(\frac{P_{pc}}{P_{o}}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \cdot P_{pc} \times$$

$$\times \left(\mu_{s} \cdot f_{s} \cdot \psi_{s} \cdot \sqrt{\left(\frac{P_{p}}{P_{pc}}\right)^{\frac{k+1}{k}}} - \mu_{pc} \cdot f_{pc} \cdot \psi_{pc}\right); (22)$$

$$\frac{dP_{H}}{d\tau} = \frac{k}{V_{H}} \times$$

$$\times \left(\sqrt{\left(\frac{R \cdot T_{o}}{P_{o}}\right)^{\frac{k+1}{k}}} - \frac{K_{sH} \cdot k \cdot F_{on}}{\eta \cdot H_{on}} \cdot P_{H}^{2}\right) - \frac{k \cdot P_{H}}{H_{H}} \cdot V_{\phi c}.$$

$$(23)$$

Решать систему можно любым численным методом. Моделируя процесс для конкретной отливки и смеси, можно оценить оптимальные размеры импульсной головки или подобрать рациональный режим работы.

Недостатком предлагаемой методики является то, что эффективная площадь выпускного отверстия считается неизменной в ходе процесса. На самом деле оно зависит от перемещения клапана. В начальной стадии истечение определяется площадью кольцевого зазора  $\mu_3 \cdot f_3$  между клапаном и седлом. До тех пор, пока эффективные площади зазора и выпускного отверстия не сравняются, перемещение клапана будет влиять на процесс: оно прекратится, когда станет выполняться условие

$$X_{\kappa} \leq \frac{\underline{\mathcal{I}}_{s}}{4}, \qquad (24)$$

где  $X_{\kappa}$  – ход клапана;  $\mathcal{I}_{e}$  – диаметр выпускного отверстия.

Определить перемещение клапана можно по второму закону Ньютона. В случае поршневого клапана уравнение движения примет вид:

$$m_{\kappa} \cdot \frac{d^{2}X}{d\tau^{2}} = P_{p} \cdot F_{\kappa} + P_{pc} \cdot f_{g} - P_{\mu\kappa} \cdot F_{\mu\kappa} - m_{\kappa} \cdot g - T, \qquad (25)$$

где  $m_{\kappa}$  – масса подвижных частей клапана;  $F_{\kappa}$  – активная площадь клапана, на которую действует давление в ресивере;  $P_{\mu\kappa}$  – давление надклапанной полости;  $F_{\mu\kappa}$  – площадь сечения клапана в надклапанной полости; T – сила трения в поршневой паре.

Таким образом, до выполнения условия (24) систему (21)–(23) надо решать совместно со следующей системой:

$$\mu_{e} \cdot f_{e} = \mu_{s} \cdot \pi \cdot \mathcal{A}_{e} \cdot X_{\kappa}; \quad (26)$$

$$\frac{dX_{\kappa}}{d\tau} = v_{\kappa}; \quad (27)$$

$$\frac{dv_{\kappa}}{d\tau} = \frac{1}{m_{\kappa}} \cdot \left(P_{p} \cdot F_{\kappa} + P_{pc} \cdot f_{e} - P_{\mu\kappa} \cdot F_{\mu\kappa} - m_{\kappa} \cdot g - T\right). \quad (28)$$

Точность решения при этом повышается. Основой импульсных методов формовки является быстрое, за сотые и тысячные доли секунды, повышение давления газовой среды над формовочной смесью.

Образуется высокоскоростной газовый поток, воздействующий на формовочную смесь. При очень большом повышении давления, за время порядка нескольких миллисекунд, возможно образование ударной волны. Под действием потока газа и ударной волны (если она есть) смесь, начиная с верхних слоев, приходит в движение.

Поскольку при импульсной формовке применяется предварительно аэрированная смесь с большой пористостью, сопротивление движению в начальный момент мало. Поэтому ускорение смеси очень быстро нарастает до больших величин порядка десятков g. По этой же причине идет интенсивная турбулентная фильтрация газа по порам смеси. Благодаря ей весь массив смесиактивизируется, переходя в псевдоожиженное состояние.

Внутреннее трение и сцепление конгломератов формовочной смеси и отдельных песчинок уменьшается, и нижележащие слои тоже начинают двигаться. Причем ускорение их такое же или даже больше, чем у верхних слоев, но максимальная скорость меньше, так как они проходят меньшее расстояние до встречи с преградой – модельной плитой и моделями. При соударении с ними и последующем резком торможении происходит уплотнение смеси под действием инерционных сил.

Кинетическая энергия частиц смеси переходит в работу уплотнения. Чем больше градиент давления и чем быстрее нарастает давление над смесью, тем эффект уплотнения выше. При этом массив смеси уплотняется не весь сразу, а последовательными слоями снизу вверх, что способствует выходу из смеси ранее профильтровавшихся внутрипоровых газов.

Уплотнение каждого слоя происходит под воздействием суммарной массы вышележащих слоев. Поэтому эффект уплотнения тем выше, чем выше начальная высота столба смеси. Плотность на ладе формы может быть до  $1,75-1,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Но независимо от высоты конечная плотность смеси снижается по мере удаления от модельной плиты, верхний слой практически неуплотнен, и он срезается или доуплотняется. В целом, распределение плотности по высоте опоки соответствует технологически необходимому. Конечная плотность и твердость на ладе формы зависит от скорости нагружения, начальной насыпной плотности и свойств формовочной смеси. До недавнего времени считалось, что для достижения нужного эффекта уплотнения достаточно изменить один из этих параметров, желательно первый.

Существует оптимум свойств смеси при импульсном уплотнении, как и оптимальный градиент повышения давления над смесью, выраженный зависимостью

$$\dot{\sigma} = \frac{2 \cdot \sigma}{\pi \cdot \sqrt{\frac{M \cdot H}{K_{H_o^*} \cdot S}}},$$
(29)

где  $\dot{\sigma}, \sigma$  – скорость нарастания и максимальное значение давления над смесью; M, H, S – масса, начальная высота и площадь уплотняемого объема смеси;  $K_{H_o^*}$  – модуль упругости песчаной основы смеси.

ВИФ высокого и низкого давления принципиально не различаются по своей сути, но отличаются по конструктивным устройствам головки и быстродействиям клапана.

# Выводы

В общем случае при импульсном воздействии на формовочную смесь потоком воздуха в ней возникают напряжения. Изменение этих напряжений по высоте опоки зависит от перепада давления, воздействующего на смесь воздуха (статическая составляющая), силы вязкого взаимодействия смеси и фильтрующегося через ее поры воздуха, сил инерции смеси, сил внешнего трения.

Длительность импульса  $t_u$  в различных импульсных установках сокращают по-разному. Первый путь – повышение быстродействия привода клапана, второй – увеличение суммарной площади выпускных отверстий. Возможно применение

этих двух способов вместе. Чем больше площадь сечения выпускных отверстий и меньше время срабатывания клапана, тем  $t_u$  меньше и эффективность процесса уплотнения выше. Таким образом, параметр dp/dt зависит от конструктивных параметров машины и давления воздуха в ресивере.

Сила инерции смеси – основной фактор уплотняющего воздействия. Она прямо пропорциональна величине градиента давления dp/dt. Градиент давления является суммарным конструктивно-технологическим фактором, поскольку на его величину влияют несколько других конструктивно-технологических факторов: объем ресивера, давление сжатого воздуха в ресивера, объем подклапанной полости (полость, находящаяся между смесью и днищем ресивера), площадь выпускного отверстия клапана и время открытия клапана.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голуб, Д. М. Разработка теоретических основ технологии уплотнения песчаноглинистых смесей пневмопотоком : дис. ... канд. техн. наук. – Минск, 2004.

 Гуляев, Б. Б. Формовочные процессы /
 Б. Б. Гуляев, О. А. Корнюшкин, А. В. Кузин. – М. : Машиностроение, 1987.

3. Жуковский, С. С. Формовочные материалы и технология литейной формы / С. С. Жуковский. – М. : Машиностроение, 1993.

4. Матвеенко, И. В. Динамические и импульсные процессы и машины для уплотнения литейных форм / И. В. Матвеенко, А. З. Исагулов, А. А. Дайкер. – Алма-Аты : Наука, 1998.

5. Карпенко, В. М. Использование методов реологии в системах управления смесеприготовлением / В. М. Карпенко // Литье и металлургия. – 2004. – № 2. – С. 71–74.

6. **Карпенко, В. М.** Концепция АСУ ТП формообразования на базе реологических критериев / В. М. Карпенко // Наукові праці Донец. нац. техн. ун-та. – 2007. – Вип. 9. – С. 113–121.

7. Карпенко, В. М. Управление качеством смесеприготовления и формообразования на основе реологических моделей / В. М. Карпенко // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. – 2007. – № 8. – С. 73–77.

8. **Карпенко, В. М.** Функциональная схема автоматизированной системы управления

технологическим процессом формообразования на основе реологических параметров / В. М. Карпен-ко, И. В. Матвеенко // Труды 8 съезда литейщиков

России, 23–27 апр. 2007 г. – Ростов н/Д, 2007. – Т. 2. – С. 272–278.

Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого Материал поступил 16.04.2009

#### V. M. Karpenko Working process and the mechanism of condensation of air-pulse moulding machines

The paper gives the analysis of the principle of the air-pulse condensation process of moulding sand and the character of density distribution of sand and clay mixture on the mould volume. Under the pulse influence on the moulding mixture by the flow of air there originate pressures in it. Changing of these pressures on the height of the moulding box depends on the following forces: pressure difference affecting the air mixture (static component), forces of viscous mixture interaction with the air filtering through its pores, mixture inertia forces, external friction forces. A reological model of moulding mixture by pulse condensation methods is presented. Also,