



*In the article there are given the results of investigations, fulfilled for conditions of vacuum aspiration casting, which can be extended on casting under low pressure. The offered schema of optimal control of mould filling at casting under controllable pressure is taken for using at several production plants.*

Б. С. ЧУРКИН, А. Б. ЧУРКИН, Э. Б. ГОФМАН, Ю. И. КАТЕГОРЕНКО,  
Российский государственный профессиональный педагогический университет, г. Екатеринбург (Россия)

## ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЗАЛИВКОЙ ФОРМ ПРИ ЛИТЬЕ ПОД РЕГУЛИРУЕМЫМ ДАВЛЕНИЕМ

УДК 621.74.047

При всех разновидностях литья под регулируемым давлением (ЛРД) заполнение форм сплавом осуществляется под действием нарастающего по некоторому закону перепада давлений на расплав  $\Delta P(t)$ . При литье под низким давлением (ЛНД) в существующих установках с помощью автоматических устройств обеспечивается линейный закон изменения избыточного давления

$$\Delta P(t) = P_k - P_a = mt, \quad (1)$$

где  $P_k$  — давление в камере машины;  $P_a$  — атмосферное давление;  $m$  — темп изменения избыточного давления, Па/с.

При литье вакуумным всасыванием (ЛВВ) управление заливкой форм осуществляется с помощью дросселирующего устройства, установленного в вакуумной сети между камерой и ресивером. При этом реализуется близкий к линейному апериодический закон изменения разрежения в камере машины

$$\Delta P(t) = P_a - \bar{P}_k = (P_a - P_p)(1 - \exp(-\beta t)), \quad (2)$$

где  $P_p$  — давление в ресивере;  $\beta$  — газодинамический коэффициент, зависящий от площади проходного сечения дросселирующего устройства  $\omega_a$ , объема камеры  $V_k$  и разрежения в ресивере  $(P_a - P_p)$ .

Так как  $\beta \ll 1$ , зависимость (2) можно приблизительно выразить уравнением

$$\Delta P(t) \approx (P_a - P_p)\beta t. \quad (3)$$

Сравнивая уравнения (1) и (3), можно заключить, что гидродинамические процессы при ЛВВ и ЛНД при прочих равных условиях будут подобны, если принять

$$m = (P_a - P_p)\beta t. \quad (4)$$

Это позволяет выполнить анализ гидродинамических процессов при ЛВВ и ЛНД с общих позиций. В данной статье приведены результаты исследований, выполненных для условий ЛВВ, которые с использованием выражения (4) легко могут быть распространены на ЛНД.

Сущность метода ЛРД заключается в том, что возможно не только обеспечивать заполнение формы за заданное оптимальное время, но и

целенаправленно управлять кинетикой и характером движения сплава на разных ее участках с учетом конфигурации отливки. Для этого необходимо обеспечивать изменение перепада давлений на расплав по более сложному, оптимальному закону, отличающемуся от зависимостей (1)–(3), при которых металлопровод и все участки полости формы заполняются при постоянном изменении перепада давлений.

Для определения указанного оптимального закона изменения  $\Delta P$  следует сформулировать критерии оптимальности гидродинамического режима заливки форм при ЛРД.

При заполнении формы при ЛРД на расплав действуют направленный вверх перепад давлений  $\Delta P(t)$  и направленное вниз гидростатическое давление столба жидкого сплава. Это вызывает колебания скорости  $v$  и уровня  $h$  сплава относительно соответствующих равновесных значений  $\tilde{v}$  и  $\tilde{h}$ , определенных из условий гидростатического равновесия [1]. При этом

$$\tilde{v} = \frac{\partial(\Delta P(t))}{\partial t} \frac{1}{\rho g} \quad \text{и} \quad \tilde{h} = \frac{\Delta P(t)}{\rho g},$$

где  $\rho$  — плотность сплава.

Как показали расчеты и эксперименты [1], в конце заполнения металлопровода колебания практически затухают и расплав строго следует за перепадом давлений. Однако в месте перехода расплава в полость формы и во всех участках резкого сужения и расширения потока возникают отклонения уровня сплава от соответствующих равновесных значений. Это приводит к фонтанированию сплава под затопленный уровень, возмущению свободной поверхности потока, а при сужении сечения отливки — к возникновению колебаний уровня сплава [1, 2]. Такой характер движения сплава при изготовлении отливок сложных конфигураций со значительными перепадами толщин стенок вызывает появление дефектов в виде спаев, оксидных плен и газовых несплошностей.

На рис. 1 приведены расчетные данные по кинетике изменения скорости сплава АК7ч при заполнении металлопровода и полости формы,

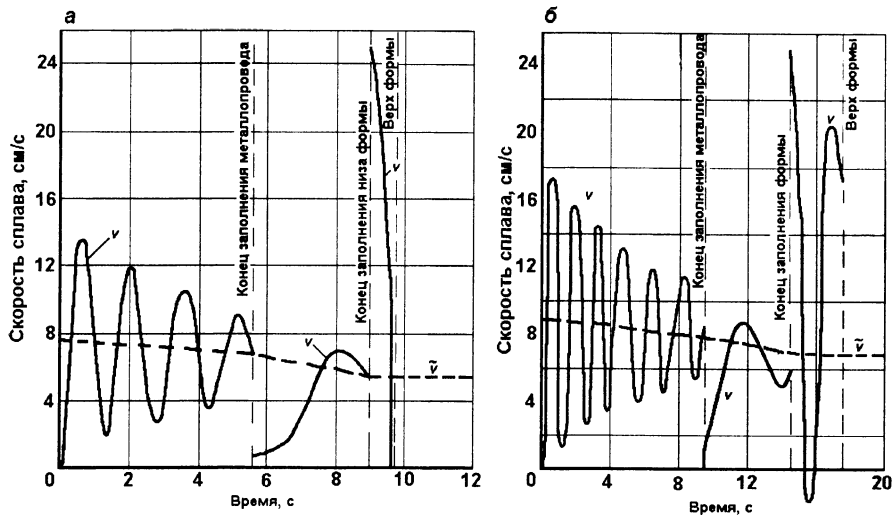


Рис. 1. Расчетные данные по кинетике изменения скорости сплава АК7ч при заполнении металлопровода и полости формы при ЛВВ при  $\omega_n/\omega_m = 8$ ,  $\omega_n/\omega_n = 0,2$ ,  $H_n = 150$  мм,  $H_b = 100$  мм: а —  $\beta = 0,025$  с<sup>-1</sup>; б —  $\beta = 0,015$  с<sup>-1</sup>

включающей в себя нижний участок с площадью поперечного сечения  $\omega_n$  и высотой  $H_n$  и верхний участок с площадью сечения  $\omega_b < \omega_n$  и высотой  $H_b$ . На графиках даны значения скорости, рассчитанные при численном решении на ЭВМ нестационарных уравнений Бернулли, полученных для заполнения металлопровода, нижнего и верхнего участков полости формы [1], а также соответствующие равновесные значения скорости  $\tilde{v}$ . Расчеты выполнены при отношении площадей  $\omega_n/\omega_m = 8$  и  $\omega_n/\omega_n = 0,2$ .

Как видно из рисунка, в начале заполнения нижнего и верхнего участков полости формы происходит резкое изменение скорости сплава пропорционально отношениям площадей  $\omega_m/\omega_n$  и  $\omega_n/\omega_b$ . Так как равновесные значения скорости  $\tilde{v}$  при постоянных значениях  $\beta$  (ЛВВ) или  $m$  (ЛНД) практически постоянны, в местах сужения или расширения потока усиливаются отклонения уровня сплава  $h$  от соответствующих равновесных значений  $\tilde{h}$ . При этом при движении сплава после сужения потока скорости сплава могут принимать отрицательные значения, что приводит к недопустимым колебаниям уровня сплава в форме.

Анализ расчетных и экспериментальных данных показал четкую зависимость качества заполнения форм и получаемых отливок со степенью отклонений уровня сплава при заливке формы от соответствующих равновесных значений  $\epsilon = |h - \tilde{h}| \cdot 100\% / \tilde{h}$ .

С увеличением  $\epsilon$  повышается интенсивность фонтанирования сплава, усиливаются возмущение свободной поверхности потока, растет вероятность возникновения колебаний уровня сплава.

Поэтому в качестве критерия оптимальности гидродинамического режима заполнения форм при ЛВВ можно принять величину  $\epsilon$ . Как показали исследования, качественное заполнение форм обеспечивается при  $\epsilon \leq 10-15\%$  [1, 3]. При этом повышается точность и надежность расчетов заполнения форм.

При существующих методах управления заливкой форм при ЛРД значения коэффициентов  $\beta$  или  $m$  постоянны в процессе заполнения формы и не связаны с конфигурацией отливки. В этих условиях степень отклонения  $\epsilon$  увеличивается с повышением скорости заливки и отношений площадей  $\omega_n/\omega_m$  и  $\omega_{i+1}/\omega_i$ , где  $\omega_{i+1}$  и  $\omega_i$  — площади вышележащего и нижележащего сечений полости формы.

В работе [4] установлено, что при существующих методах управления заливкой качественное заполнение форм обеспечивается при выполнении условий  $0,6 \leq \omega_{i+1}/\omega_i \leq 6$  при  $\beta \leq 0,03$  с<sup>-1</sup> или  $m \leq 2000$  Па/с.

При  $\omega_{i+1}/\omega_i < 0,6$  качественные отливки невозможно получить при любых скоростях заливки. Поэтому можно признать, что реализуемые в существующих установках законы изменения перепада давления на расплав (1)–(3) не являются оптимальными и обеспечивают соблюдение сформулированного выше критерия оптимальности лишь для ограниченной номенклатуры отливок.

Как видно из рис. 1, основная причина больших значений  $\epsilon$  состоит в значительном отклонении начальных скоростей сплава после сужения или расширения потока от соответствующих равновесных значений.

Рассмотрим условия перехода сплава из металлопровода в полость формы. Скорость сплава в момент окончания заполнения металлопровода:

$$v_m \approx \tilde{v}_m = \frac{(P_a - P_p)\beta_m \exp(-\beta_m t_m)}{\rho g}$$

где  $\beta_m$  — значение газодинамического коэффициента при заполнении металлопровода;  $t_m$  — время заполнения металлопровода.

Начальная скорость заполнения сплава в нижней части полости формы:

$$v_1(t=0) = \frac{v_m \omega_m}{\omega_n} = \frac{(P_a - P_p)\beta_n \exp(-\beta_m t_m) \omega_m}{\omega_n \rho g}$$

Начальная равновесная скорость сплава:

$$\tilde{v}_1(t=0) = \frac{(P_a - P_p)\beta_n \exp(-\beta_m t_m)}{\rho g},$$

где  $\beta_n$  — значение газодинамического коэффициента при заполнении формы,

$$\tilde{v}_1(t=0) - v_1(t=0) = \frac{(P_a - P_p) \exp(-\beta_m t_m)}{\rho g} \left( \beta_n - \beta_m \frac{\omega_m}{\omega_n} \right)$$

Очевидно, что при  $\beta_n = \beta_m$ , т. е. при существующем методе управления заливкой, величина  $(\tilde{v}_1(t=0) - v_1(t=0))$  зависит от  $\omega_m/\omega_n$  и повышается с увеличением отношения  $\omega_n/\omega_m$ .

Для того чтобы минимизировать  $\epsilon$ , необходимо обеспечить равенство  $\tilde{v}_1(t=0)$  и  $v_1(t=0)$ . Для этого следует выполнить условие

$$\left( \beta_n - \beta_m \frac{\omega_m}{\omega_n} \right) = 0 \text{ или } \beta_m = \beta_n \frac{\omega_n}{\omega_m}. \quad (5)$$

Это означает, что металлопровод и нижний участок полости формы нужно заполнять при разных значениях коэффициента  $\beta$ , связанных между собой зависимостью (5).

Учитывая приближенный характер вывода уравнения (5), был введен поправочный коэффициент  $K_1$ :

$$\beta_m = \beta_n \frac{\omega_n}{\omega_m K_1}. \quad (6)$$

С целью определения коэффициента  $K_1$  были выполнены машинные эксперименты по исследованию математической модели гидродинамических процессов. В основу математической модели были положены интегральные уравнения изменения компонент импульса и неразрывности потока, полученные для элементарных ячеек, на которые разбивали пространство, занятое расплавом в металлопроводе и нижней части полости формы [4]. Для решения уравнений применяли метод потоков [4].

В машинных экспериментах варьировали величины  $\beta_n$ ,  $H_n$  и  $\omega_n/\omega_m$ . Значение  $\beta_m$  вычисляли по формуле (6). При этом значение  $K_1$  изменяли от 0,5 до 3,0 и определяли в каждом варианте расчетов значение  $K_1$ , при котором обеспечивалось выполнение сформулированного выше критерия оптимальности ( $\epsilon \leq 10\%$ ).

В результате обработки расчетных данных получено следующее уравнение для расчета  $K_1$ :

$$K_1 = 1,17 - 0,01X_1 - 0,11X_2 - 0,03X_3 + 0,07X_1X_2 - 0,08X_1X_3 + 0,03X_2X_3, \quad (7)$$

где  $X_1 = (\beta_n - 0,007)/0,003$ ;  $X_2 = (H_n - 70)/40$ ;  $X_3 = (\omega_n/\omega_m - 6)/4$ .

При заполнении верхней части формы при сужении потока начальная скорость сплава увеличивается и превышает равновесное значение. Поэтому для минимизации отклонений  $h$  от  $\tilde{h}$

необходимо заполнение верхней части формы осуществлять при значении  $\beta = \beta_n$ , большем, чем  $\beta_n$ , по формуле:

$$\beta_n = \beta_b \frac{\omega_b}{\omega_n K_2}. \quad (8)$$

Как показали результаты машинных экспериментов по решению нестационарных уравнений Бернулли [3], значение  $K_2$  практически не зависит от параметров процесса и может быть принято равным 1.

Сущность оптимального управления заливкой состоит в следующем. По оптимальной продолжительности заливки верхнего тонкостенного элемента отливки  $t_{\text{опт}}$  определяли необходимые значения  $\beta_n$ . Для этого применяли формулу, полученную исходя из соблюдения условия  $h \approx \tilde{h}$ :

$$\beta_b = -\frac{1}{t_{\text{опт}}} \ln \left( 1 - \frac{\rho g H_b}{P_a - P_p - \rho g (Z_m - l_0) - \rho g H_n} \right) \quad (9)$$

где  $Z_m$  — длина металлопровода;  $l_0$  — начальное заглубление металлопровода в расплав в тигле.

Далее по формулам (6) и (8) находили значения  $\beta_m$  и  $\beta_n$  для заполнения металлопровода нижней и верхней частей полости формы. При этом реализуется кусочно-линейный закон изменения перепада давлений на расплав. На рис. 2 приведены данные по кинетике изменения скорости сплава при заполнении металлопровода и полости формы сплавом АК7ч для условий рис. 1, а.

В расчете было принято  $\beta_b = 0,025 \text{ с}^{-1}$ . В результате расчета получены значения  $\beta_n = 0,006 \text{ с}^{-1}$  и  $\beta_m = 0,018 \text{ с}^{-1}$ .

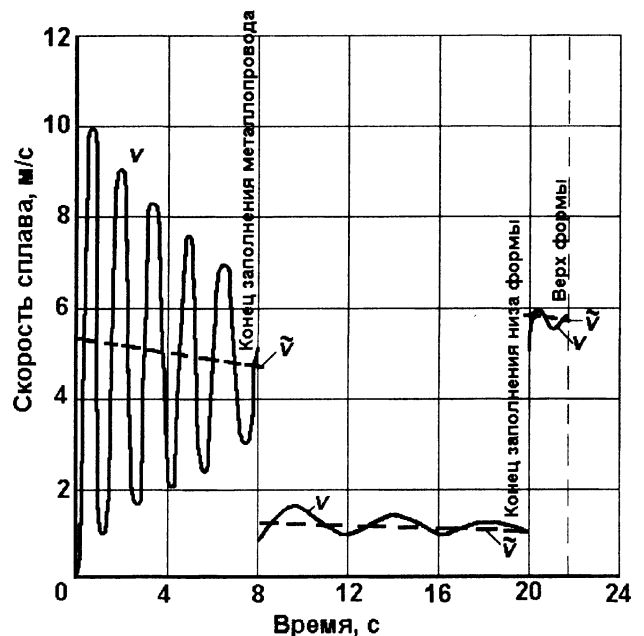


Рис. 2. Данные по кинетике изменения скорости сплава при заполнении металлопровода и полости формы сплавом АК7ч при ЛВВ при оптимальном управлении ( $\beta_b = 0,025 \text{ с}^{-1}$ ;  $\beta_n = 0,006 \text{ с}^{-1}$ ;  $\beta_m = 0,018 \text{ с}^{-1}$ )

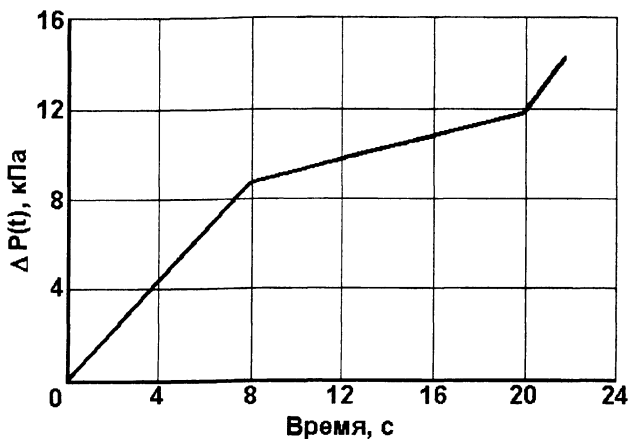


Рис. 3. Кусочно-линейный оптимальный закон изменения перепада давлений при заполнении металлопровода, нижнего и верхнего участков полости формы сплавом АК7ч

На рис. 3 показана кусочно-линейная зависимость  $\Delta P(t)$  при заданных значениях  $\beta$ .

При ЛНД сначала находили темп изменения избыточного давления  $m_\beta$  при заполнении верхнего участка полости формы:

$$m_\beta = \beta \cdot 66640, \quad (10)$$

где  $\beta_\beta$  — рассчитывали по формуле (9); 66640 — принятое значение разрежения в ресивере при ЛВВ.

Далее определяли значение темпа изменения избыточного давления при заполнении нижнего участка  $m_n$  и металлопровода  $m_m$ :

$$m_n = m_\beta \frac{\omega_\beta}{\omega_n}, \quad (11)$$

$$m_m = m_n \frac{\omega_n}{\omega_m}. \quad (12)$$

Автоматическое управление заливкой форм при ЛВВ осуществляется путем дискретного изменения площади проходного сечения дросселирующего устройства в моменты прохождения расплава через участки резкого сужения или расширения потока. Проще всего это реализовать, предусмотрев в вакуумной сети ряд параллельно включенных диафрагм с разными проходными сечениями, и обеспечив их переключение в соответствующие моменты времени с помощью реле времени.

В результате машинных экспериментов по исследованию закономерностей истечения воздуха из камеры машины в данных условиях с использованием нестационарного уравнения Бернулли для газового потока получено уравнение для расчета площадей диафрагм для реализации заданных значений коэффициента  $\beta$ :

$$\omega_{di} = \frac{\beta_i V_k \Delta P_{pi}^{0,79}}{1,33}, \quad (13)$$

где  $\omega_{di}$  — площадь диафрагмы, обеспечивающая значение  $\beta_i$ , мм<sup>2</sup>;  $\Delta P_{pi} = P_{k_{0i}} - P_p$ , Па;  $P_{k_{0i}}$  — значение

разрежения в камере машины в момент включения  $i$ -й диафрагмы, Па.

При ЛРД автоматическое управление производится с помощью быстрой перенастройки автоматического устройства на соответствующие значения темпа нарастания избыточного давления  $m_i$ .

При организации заполнения формы необходимо изучить конструкцию отливки и выделить в ней участки, для которых отношение площадей  $\omega/\omega_{r-1} < 0,6$ . Если таких участков нет, то отливка рассматривается как единый участок, заполняемый при  $\beta = \beta_\phi$ . При ЛНД  $m_\phi = 66640\beta_\phi$ . Величину  $\beta_\phi$  по заданной оптимальной продолжительности заливки находим по формуле:

$$\beta_\phi = -\frac{1}{t_{\text{опт}}} \ln \left( 1 - \frac{\rho g H_{\text{отл}}}{P_a - P_p - \rho g (Z_m - l_0)} \right) \quad (14)$$

Как показала статистическая обработка данных по  $t_{\text{опт}}$ , для основных типовых промышленных отливок массой от 1 до 10 кг с толщиной стенки от 10 до 30 мм  $t_{\text{опт}}$  можно рассчитывать по формуле:

$$t_{\text{опт}} = (2,9 \pm 0,25) \sqrt[3]{\delta G}, \quad (15)$$

где  $\delta$  — преобладающая толщина стенок отливки, мм;  $G$  — масса отливки, кг.

Анализ расчетных и экспериментальных данных показал, что при существующем методе управления заливкой ( $\beta = \text{const}$  или  $m = \text{const}$ ) качественное заполнение формы обеспечивается, если

$$\beta_\phi < \beta_{\text{max}} = 0,037 - 0,013X_1 - 0,012X_1X_2, \quad (16)$$

где  $X_1 = (\omega_n/\omega_m - 5)/3$ ;  $X_2 = (H_n - 125)/75$ .

Если условие (16) выполняется, то  $\beta_m = \beta_\phi$  или  $m_m = m_\phi$ .

При несоблюдении условия (16) применяется оптимальное управление, при котором заполнение металлопровода происходит при  $\beta_n \neq \beta_\phi$  или  $m_n \neq m_\phi$ . Значения  $\beta_n$  и  $m_n$  рассчитывали по формулам (6) и (11).

В случае если в отливке есть участки с  $\omega_i/\omega_{i-1} < 0,6$ , то эти участки рассматриваются отдельно. При технологических конструкциях для ЛРД тонкостенные элементы, как правило, располагаютсяверху. В данном случае применяется оптимальное управление заливкой и значения  $\beta_n$ ,  $\beta_\phi$  и  $\beta_m$  (или  $m_n$ ,  $m_\phi$  и  $m_m$ ) определяются по описанной выше методике.

Предложенная схема автоматического оптимального управления заливкой при ЛРД опробована на большом числе промышленных отливок. Проверка эффективности системы показала, что она обеспечивает получение качественных отливок в широком диапазоне отношений площадей сечений отливки (от 0,1 до 10) и скоростей заливки (от 0,5 до 25 см/с).

Для иллюстрации приведем пример определения параметров оптимального заполнения формы для отливки "Рабочее колесо гидромолоты" (рис. 4) сплавом АК7ч при ЛВВ.

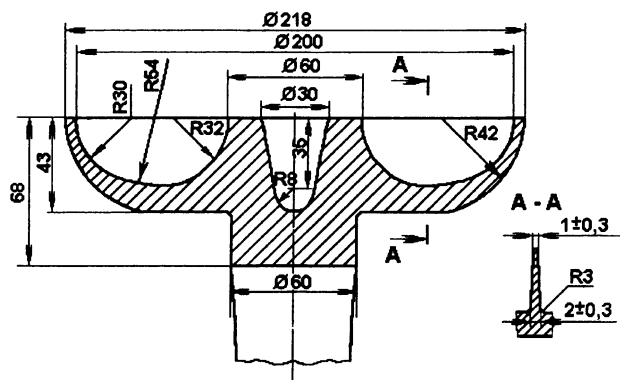


Рис. 4. Конструкция отливки "Рабочее колесо гидромолоты"

В отливке можно выделить нижнюю, горизонтально расположенную часть и верхнюю тонкостенную часть — лопатки. Максимальная площадь нижней части  $\omega_n = 154 \text{ см}^2$ . Высота нижней части  $H_n = 36 \text{ мм}$ , верхней  $H_v = 32 \text{ мм}$ . Суммарная площадь сечения лопаток  $\omega_v = 30 \text{ см}^2$ . Средняя толщина стенки лопатки  $\delta = 1,8 \text{ мм}$ . Масса отливки  $G = 1,2 \text{ кг}$ . Диаметр металлопровода 60 мм,  $\omega_m = 28,3 \text{ см}^2$ ,  $t_{\text{отп}} = 0,5 \text{ с}$ . Расчет по формуле (9) позволяет получить значение  $\beta_v = 0,025 \text{ с}^{-1}$ . Отношение  $\omega_v / \omega_n \approx 0,2 < 0,6$ , поэтому при существующем методе управления ( $\beta_m = \beta_n = \beta_v$ ) качественную отливку получить не удалось ни при каких значениях  $\beta$ . Для получения качественных отливок пришлось в 2,5 раза увеличить толщину стенки лопаток.

При оптимальном управлении заполнение металлопровода, нижнего и верхнего участка следует

проводить при разных значениях  $\beta$ , рассчитанных по формулам (6) и (8):  $\beta_v = 0,025 \text{ с}^{-1}$ ;  $\beta_n = 0,0053 \text{ с}^{-1}$  и  $\beta_m = 0,0082 \text{ с}^{-1}$ .

Для реализации приведенных значений  $\beta$  в автоматической системе предусмотрено последовательное включение трех диафрагм с площадями проходного сечения 2,83, 1,76 и 7,54 мм<sup>2</sup>. Первая диафрагма включается с начала процесса, вторая — через 17 с и третья — через 19,4 с.

Оптимальное управление при приведенных выше параметрах позволило получить качественные отливки без применения технологических напусков на лопатках.

Предложенная схема оптимального управления заполнением форм при ЛРД принята к использованию на ряде промышленных предприятий.

### Литература

1. Теория и технология методов литья под регулируемым газовым давлением: Учеб. пособие / Б. С. Чуркин, Э. Б. Гофман, Н. В. Шестаков и др. Свердлов. инж.-пед. ин-т. Свердловск, 1990. 207 с.
2. Борисов Г. П. Давление в управлении литейными процессами. Киев: Наукова думка, 1988.
3. Условия получения качественного заполнения форм при литье под регулируемым давлением при изготовлении отливок со значительными перепадами толщин стенок / А. Б. Чуркин, Ю. И. Категоренко, Э. Б. Гофман // Прогрессивные технологические процессы и подготовка кадров для литейного производства: Сб. науч. тр. Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 2001. Вып. 4. С. 29—36.
4. Чуркин Б. С., Чуркин А. Б. Гидродинамические закономерности заполнения форм при литье под регулируемым давлением // Прогрессивные технологические процессы и подготовка кадров для литейного производства: Сб. науч. тр. Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. проф.-пед. ун-та, 2001. Вып. 4. С. 19—29.