

**Н. А. Слажнев, К. С. Богдан**

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, Киев

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ЗАЛИВКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ ИЗ МАГНИТОВОСОВОЙ УСТАНОВКИ В ЛИТЕЙНЫЕ ФОРМЫ\***

*Представлена структурно-функциональная схема магнитовесовой литейной установки с микропроцессорным блоком измерения массы и управления процессом дозированной заливки алюминиевых расплавов в литейные формы. Приведены результаты экспериментальных исследований по определению влияния некоторых дестабилизирующих факторов на точность дозирования расплава, выполненных на опытной установке. Предложены новые технические решения и алгоритмы управления для уменьшения динамической погрешности дозирования расплава.*

**Ключевые слова:** магнитовесовая установка, микропроцессор, индуктор, электромагнит, металлический расплав, дозирование, отливка.

*Представлена структурно-функціональна схема магнітовагової ливарної установки з мікропроцесорним блоком вимірювання маси і управління процесом дозованого заливання алюмінієвих розплавів у ливарні форми. Наведено результати експериментальних досліджень по визначенню впливу деяких дестабілізуючих факторів на точність дозування розплаву, виконаних на дослідному зразку установки. Запропоновано нові технічні рішення і алгоритми управління, які сприяють зменшенню динамічної похибки дозування.*

**Ключові слова:** магнітовагова установка, мікропроцесор, індуктор, електромагніт, металевий розплав, дозування, виливок.

*The structural-functional diagram of the magneto-weight casting installation with the microprocessor block for measuring of mass and controlling of the aluminium alloys dosed pouring into the casting moulds is presented. The results of experimental researches about determination of some destabilizing factors action on accuracy of melt dosing are given, which performed by the pre-production model of installation. New technical solutions and algorithms of management for reduction of dynamic error of melt dosage are offered.*

**Keywords:** magneto-weighting installation, microprocessor, inductor, electromagnet, metallic melt, dosage, casting.

**В** литейных цехах отечественных и зарубежных машиностроительных заводов для заливки металлических расплавов в литейные формы применяют оборудование с различными заливочными устройствами [1]. Практика показала, что наиболее технологичными являются магнитодинамические установки (МДУ), обеспечивающие поддержание заданной температуры расплава, корректировку его химического состава и перемешивание, управление массовым расходом жидкого металла расплава путем изменения магнитного поля в рабочей зоне МДУ [2].

Учитывая то обстоятельство, что среди различных методов дозирования расплавов наиболее точным является весовой, эффективным представляется совмещение процесса подачи расплава в литейные формы с помощью МДУ и непрерывного контроля его переменной массы в процессе заливки [3, 4]. Это позволяет реализовать способ дискретного дозирования расплава с отсоединением массы непосредственно из МДУ в литейную форму.

\* В работе принимали участие А. А. Санкин, А. О. Горшков, В. С. Лопата, С. В. Горюк

Результаты проведенных ранее экспериментальных исследований показали, что наличие тех или иных дестабилизирующих факторов, имеющих место при эксплуатации заливочного оборудования в условиях литейных цехов, отрицательно влияет на точность дискретного дозирования расплава [4].

К внешним дестабилизирующим факторам относятся: колебания напряжения питающей сети и, как следствие, колебания расхода расплава, поступающего из МДУ в литейную форму; сетевые помехи различной частоты и амплитуды, которые имеют случайный характер; систематические либо случайные вибрационные и ударные возмущения, действующие на силоизмерительную систему; электромагнитные воздействия от работающего оборудования, находящегося вблизи МДУ, а также другие возможные помехи неустраненного характера.

Внутренние дестабилизирующие факторы обусловлены конструктивными особенностями МДУ, преимущественно влияют на стабильность расхода расплава, что особенно нежелательно в выходной фазе дозирования.

Важным фактором, влияющим на точность дозирования, является температура расплава, от величины которой зависят его вязкость, а, следовательно, и расходные характеристики МДУ. По данным, приведенным в работе [5], построены зависимости вязкости  $\eta$  расплава от его температуры  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) для некоторых сплавов на основе алюминия (рис. 1).

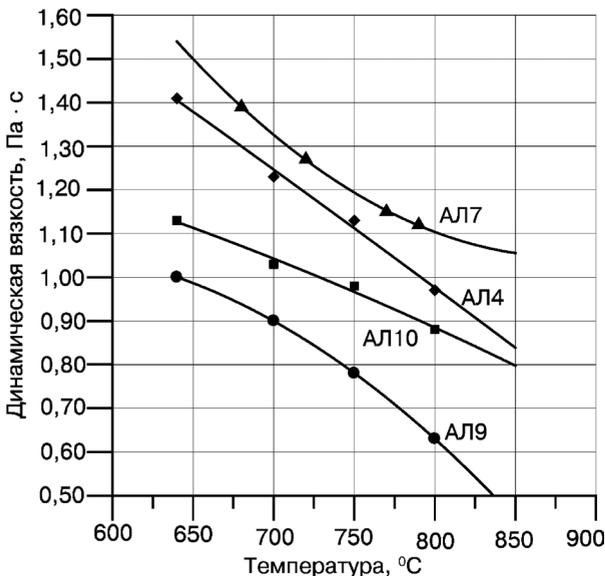


Рис. 1. Зависимости  $\eta = f(T)$  для некоторых сплавов на основе алюминия [5]

Эти данные показывают, что вязкость алюминиевых сплавов зависит от их температуры и химического состава, поэтому температурный режим в МДУ необходимо устанавливать в зависимости от вязкости дозируемого сплава при определенной температуре [5].

Для определения рациональных параметров магнитовесовой установки и микропроцессорной системы управления, а также оптимальных режимов дискретного дозирования расплавов в условиях действия дестабилизирующих факторов были проведены экспериментальные исследования на технологическом участке Физико-технологического института металлов и сплавов НАН Украины.

Структурно-функциональная схема опытной магнитовесовой установки приведена на рис. 2. В корпусе 7, снабженном двумя колесными парами 12, размещены индуктор 2, электромагнит 1, тигель 3 с металлопроводом, сливной желоб 5. Корпус 7 с двумя колесными парами 12 установлен на рельсах, закрепленных на грузоприемной весовой платформе 8, опирающейся на четыре силоизмерительных тензорезисторных датчика 9 с консольными упругими элементами двойного изгиба. Суммарная номинальная нагрузка датчиков 9 составляет 8 т. Датчики 9 закреплены на жестком основании 10, в котором предусмотрена возможность перемещения в горизонтальной плоскости по оси, перпендикулярной продольной оси, колесных пар 12 корпуса 7. Такая конструкция магнитовесовой установки обеспечивает заливку расплава при любом расположении заливочного отверстия литейной формы 6 за счет перемещения установки в горизонтальной плоскости по двум координатам.

Выходы датчиков 9 через коммутационный блок (на схеме не показан) подключены

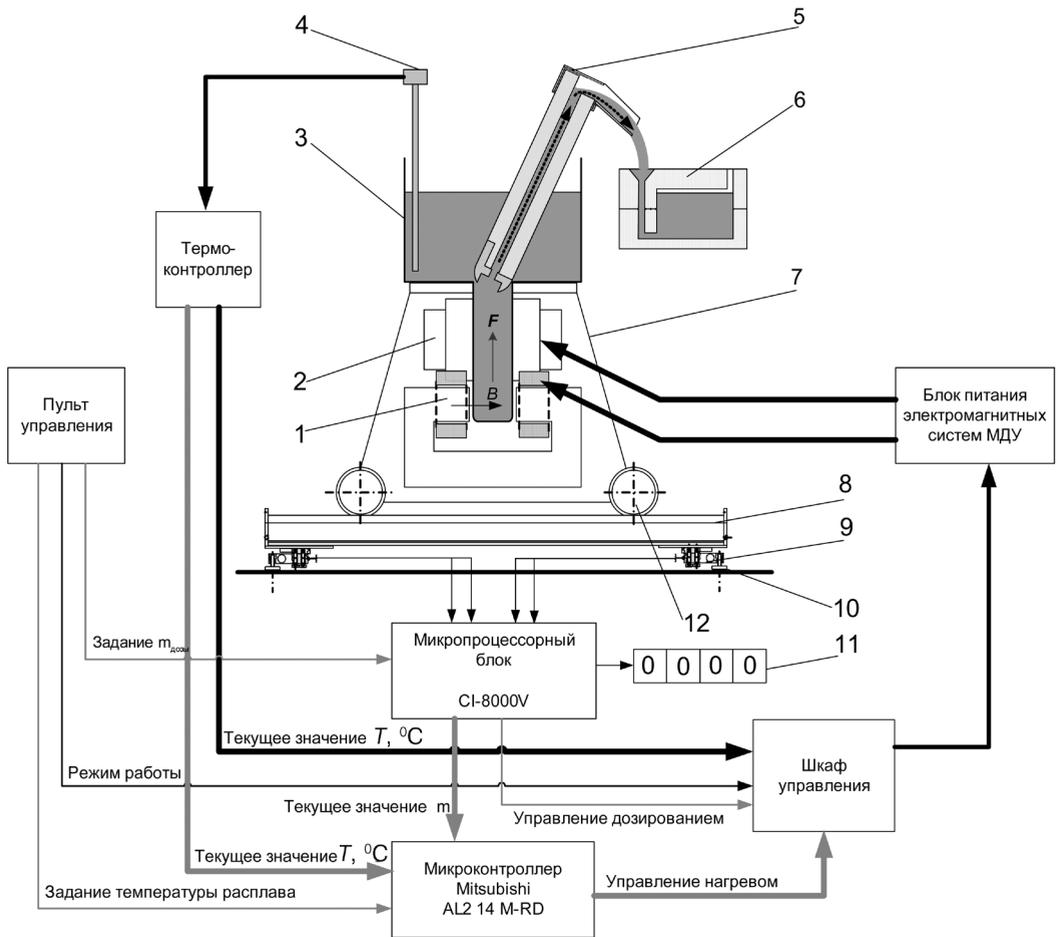


Рис. 2. Структурно-функциональная схема магнитовесовой установки для дискретного дозирования и заливки расплава алюминия в литейные формы

к микропроцессорному блоку, выходы которого связаны с микроконтроллером, цифровым индикатором массы *11* и шкафом управления, выходы которого подключены к блоку питания электромагнитных систем МДУ (электромагнита *1* и индуктора *2*). Контроль температуры расплава в тигле *3* осуществляется с помощью термопары *4*, подключенной к термоконтроллеру, выходы которого связаны с микроконтроллером и шкафом управления. Выходы пульта управления подключены к микропроцессорному блоку, микроконтроллеру и шкафу управления.

Процесс дискретного дозирования и заливки алюминиевого расплава в литейную форму *6* происходит следующим образом. В исходном состоянии тигель *3* магнитодинамического насоса заполнен расплавом алюминия, масса  $m_{\Sigma}$  которого отображается на цифровом индикаторе *11*. Температура ( $T$ ) расплава в тигле *3* измеряется термопарой *4*, выходной сигнал которой поступает в термоконтроллер, связанный с микроконтроллером, управляющим нагревом расплава до заданной температуры  $T_H$  путем регулирования тока индуктора *2*. Это позволяет стабилизировать температуру расплава в тигле *3* при изменении массы расплава в нем от максимальной до минимальной, что обеспечивает постоянство вязкости расплава в процессе дозирования. По команде с пульта управления включается электромагнит *1*, в рабочей зоне насоса создается электромагнитное давление и расплав начинает поступать по металлопроводу *5* в литейную форму *6* с заданным массовым расходом  $\Theta_H$ . При достижении массы слитого расплава в форму *6*  $(0,7-0,8)m_d$  из микропроцессорного блока поступает команда на уменьшение расхода расплава до величины  $(0,1 \div 0,2)\Theta_H$

## Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

и реализуется режим «доливки» в выходной фазе дозирования. В момент достижения заданной массы дозы  $m_d$  электромагнит 1 отключается. Последующие циклы заливки проходят аналогично.

Экспериментальные исследования опытной магнитовесовой установки были направлены на определение влияния некоторых дестабилизирующих факторов, указанных выше, на точность дозирования алюминиевого расплава методом отсоединения массы при различных режимах управления расходом расплава. Для проведения исследований была разработана специальная методика, позволяющая получить данные о метрологических параметрах процесса дискретного дозирования расплава при наличии дестабилизирующих факторов и определить рациональные режимы работы установки.

С помощью магнитовесовой установки могут быть реализованы следующие режимы заливки в литейные формы (рис. 3):

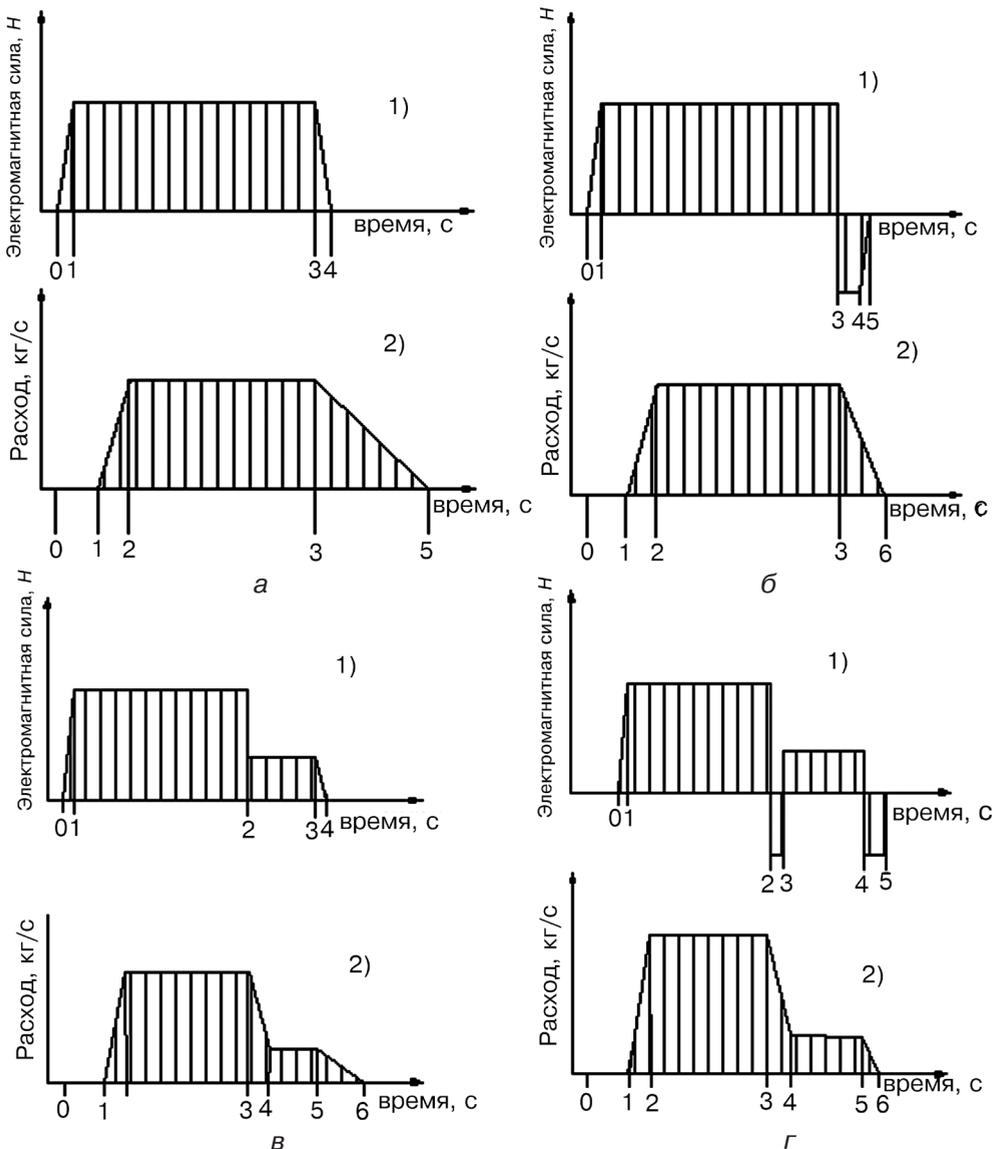


Рис. 3. Зависимости  $F_{\text{э}} = f(t)$  и  $\Theta = f(t)$  для различных режимов дозирования: а – традиционный режим с вводом упреждения в программу дозирования; б – режим дозирования с торможением; в – режим дозирования с доливкой при пониженном расходе расплава; г – режим дозирования с доливкой и торможением

## **Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья**

- традиционный режим заливки при постоянном расходе расплава с вводом упреждения в программу дозирования;
- двустадийный режим заливки с доливкой расплава при уменьшенном расходе в выходной фазе дозирования;
- режим дозирования и заливки при постоянном расходе расплава с торможением в выходной фазе дозирования;
- режим дозирования и заливки с доливкой расплава при уменьшенном расходе и торможении в выходной фазе дозирования.

Если первые два режима достаточно хорошо изучены и широко применяются в практике литейного производства, то третий и четвертый являются сравнительно новыми и изучены недостаточно, особенно в условиях действия дестабилизирующих факторов.

Ранее было установлено [3], что на точность весового дозирования расплава из МДУ основное влияние имеют следующие факторы:

- колебания (нестабильность) расходных характеристик расплава, заливаемого в литейную форму;
- непостоянство остаточного количества расплава в конце цикла заливки (по достижении заданной массы дозы), так называемый инерционный слив.

Возникновение первого фактора, а именно нестability расходных характеристик сливаемого расплава, обусловлено рядом как независимых друг от друга причин, так и взаимосвязанных. Колебания напряжения промышленной электросети в условиях литейного цеха могут достигать 10-15 %, что вызывает колебания создаваемой в рабочей зоне МДУ электромагнитной силы, а, следовательно, и давления в металлопроводе до 20-25 %.

На расходные характеристики расплава в процессе его дозирования существенное влияние оказывает также температура расплава в МДУ. При изменении температуры расплава меняются его физико-механические свойства, в частности, вязкость, а следовательно, и жидкотекучесть [5]. Так, например, для широко применяемого в литейном производстве силумина АК7 в технологическом интервале температур заливаемого расплава от 690 до 750 °С вязкость расплава изменяется более чем на 60 % в сторону уменьшения, что приводит к изменению гидродинамических характеристик движения расплава в системах металлопровода, каналах индукционной единицы и тигле МДУ. Если не учитывать изменение вязкости расплава в процессе его дискретного дозирования, может увеличиться нестability расходных характеристик на 20-30 %, в результате снижается прогнозируемость остатка инерционного слива и невозможно поддерживать технологически заданный расход расплава в процессе заливки литейных форм.

Первопричиной возникновения и действия второго фактора, основанного на непостоянстве остатка расплава, сливаемого по инерции из МДУ после отключения электромагнита при достижении заданного значения массы дозы, является быстрое действие электроаппаратуры, применяемой в системе управления. Так, магнитные пускатели, которые переключают основные режимы работы электромагнитных систем МДУ (индукторов и электромагнита), имеют паспортное время срабатывания от 0,25 до 0,5 с. Это время может изменяться в указанном диапазоне в зависимости от фактического значения напряжения питания, температуры окружающей среды и т. п.

В процессе заливки формы весоизмерительное устройство, на котором установлена МДУ, осуществляет непрерывный контроль ее массы и по достижении заданного значения отсоединенной массы (фактической массы дозы  $m_d$  расплава) с помощью своего исполнительного реле подает команду в шкаф управления МДУ на отключение режима заливки и переключение электромагнитной системы в режим хранения. Расплава, который сливался под действием электромагнитных

## **Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья**

сил из металлопровода, начиная с этого момента, продолжает сливаться под действием инерционных сил с убывающей скоростью при воздействии сил трения и гравитации. Количество расплава, сливаемого под действием сил инерции, прямо пропорционально массовому расходу в момент прекращения действия электромагнитных сил.

Исследования показали, что после кратковременного отключения питания электромагнитных систем включается режим хранения, в результате чего в рабочей зоне МДУ происходит гидродинамический процесс перестройки вихревых структур, сформированных в процессе заливки, в другой вид, соответствующий режиму хранения расплава. Эти два процесса оказывают весьма существенное воздействие на столб расплава, движущегося по системе трубопроводов из тигля МДУ к сливному носку металлопровода. Так, например, при  $m_d = 5,0$  кг и  $\Theta = 1,0$  кг/с наблюдается превышение массы дозы  $\Delta m_d = 0,3-0,7$  кг, то есть  $m_d = 5,3-5,7$  кг. На основании изложенного можно сделать вывод, что для повышения точности дозирования необходимо применять принудительные меры, позволяющие осуществлять автоматический контроль и управление процессом инерционного слива расплава:

- для уменьшения негативного влияния перестройки вихревых структур, формируемых в рабочей зоне МДУ при переходе от режима заливки в режим хранения, необходимо осуществлять технологическую паузу (1-2 с), во время которой все электромагнитные системы МДУ обесточены;

- для уменьшения влияния массы расплава в течение времени инерционного слива необходимо переключать МДУ при 70-80 %  $m_d$  на пониженный расход  $\Theta'_H = (0,2-0,6) \Theta_H$  в выходной фазе дозирования;

- для осуществления контроля и управления расходом расплава в период инерционного слива целесообразно проводить торможение струи расплава с помощью электромагнитных сил с возможностью изменения направления их действия.

Процесс торможения струи расплава в выходной фазе дозирования реализован с помощью безынерционных электромагнитных средств воздействия. При этом, как показали результаты экспериментальных исследований, может быть достигнуто уменьшение массы расплава за время его инерционного слива в 2-3 раза, а также улучшены показатели управляемости и стабильности этого процесса. Практически такой прием осуществляется путем реверсирования действия электромагнитной силы в выходной фазе дозирования, однако на ограниченное время (1-3 с), во избежание всасывания расплава в металлопровод до рабочей зоны МДУ. Прием торможения струи расплава из МДУ вполне приемлем и дает существенный результат при определенных параметрах процесса заливки: для расходов расплава  $\Theta_H \leq 3,0$  кг/с и времени заливки  $t_3 \geq 5$  с. Однако, если требуется заливка расплава с расходом  $\Theta_H > 3,0$  кг/с в том же временном интервале ( $t_3 \geq 5$  с), существенное влияние на точность дозирования оказывает скорость срабатывания электроаппаратуры, осуществляющей переключение питания электромагнита в режим реверса.

Для реализации режима торможения достаточно отключить электромагнит МДУ, не переключая ее режимы. Далее, спустя 1-3 с, необходимо переключить ее в режим хранения. Такой метод оправдан с точки зрения максимально возможного сокращения времени отработки процесса реверсирования направления действия электромагнитной силы и сводится к отключению только одного пускателя питания электромагнита.

В результате проведенных исследований на опытных установках МДН6-0,16 и МДН6-0,25 была установлена эффективность данного метода. Так, время инерционного слива расплава в выходной фазе дозирования уменьшилось в 2 раза при стабилизации процесса в целом. По данным экспериментов при  $m_d = 5,0$  кг

**Режимы дозированной разливки алюминиевых расплавов, реализуемых магнитовесовой системой**

Режимы разливки	Специфика технической реализации	Достижимые результаты	Рекомендуемая область применения
<p><b>Торможение</b> струи металла в конце процесса порционной разливки</p>	<p>осуществляется путем отключения питания электромагнита и не требует дополнительного времени для реализации коммутаций и переключений электроаппаратуры и режимов работы МДУ</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– сокращает до 50 % массу остатка металла, соответствующую инерционному сливу;</li> <li>– обеспечивает воспроизводимость и повторяемость ее величины;</li> <li>– осуществляет учет избытка расплава в каждом цикле заливки и ввод этой величины в программу дозирования;</li> <li>– на основании статистических данных позволяет уменьшить допустимую погрешность дозирования до 1%</li> </ul>	<p>технологии электромагнитной разливки алюминиевых сплавов с использованием магнитовесовых устройств открытой струей при расходах свыше 1 кг/с</p>
<p><b>Доливка</b> в выходной фазе электромагнитной разливки</p>	<p>осуществляется путем понижения расхода алюминиевого расплава до 20-60 % от номинального значения при достижении массы заливаемой дозы металла 70-80 %</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– существенно сокращает массу остатка металла, соответствующую инерционному сливу;</li> <li>– обеспечивает воспроизводимость и повторяемость ее величины;</li> <li>– обеспечивает возможность осуществления учета избытка расплава в каждом цикле заливки и введение этой величины в программу дозирования;</li> <li>– на основании статистических данных уменьшает допустимую погрешность дозирования до 0,5-1,0 %</li> </ul>	<p>технологии электромагнитной разливки алюминиевых сплавов открытой струей с использованием магнитовесовых устройств открытой струей в широком диапазоне расходов, где требуется высокая точность заливаемой порции металла и не требуется обеспечение постоянной заданной величины расхода на протяжении всего цикла заливки</p>
<p><b>Доливка</b> в выходной фазе электромагнитной разливки и <b>торможение</b> струи металла в конце цикла заливки и при переходе в режим доливки путем понижения расхода алюминиевого расплава до 20-60 %</p>	<p>осуществляется путем понижения расхода алюминиевого расплава до 20-60 % от номинального значения при достижении массы заливаемой порции металла 70-80 %; торможение струи металла осуществляется путем отключения питания электромагнита</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– сокращает диапазон выходной фазы заливки с 30-20 до 10-15 %;</li> <li>– существенно снижает нестабильность переходных процессов при переходе от основного режима заливки в режим доливки и в конце цикла заливки;</li> <li>– сокращает массу остатка металла, соответствующую инерционному сливу до 50-70 %;</li> <li>– обеспечивает возможность осуществления учета избытка расплава в каждом цикле заливки и введение этой величины в программу дозирования;</li> <li>– на основании статистических данных уменьшает допустимую погрешность дозирования до 0,5 %</li> </ul>	<p>технологии электромагнитной разливки алюминиевых сплавов открытой струей с использованием магнитовесовых устройств в широком диапазоне расходов, где требуется высокая точность заливаемой дозы металла, в том числе и обеспечение постоянной заданной величины расхода на протяжении всего цикла заливки</p>

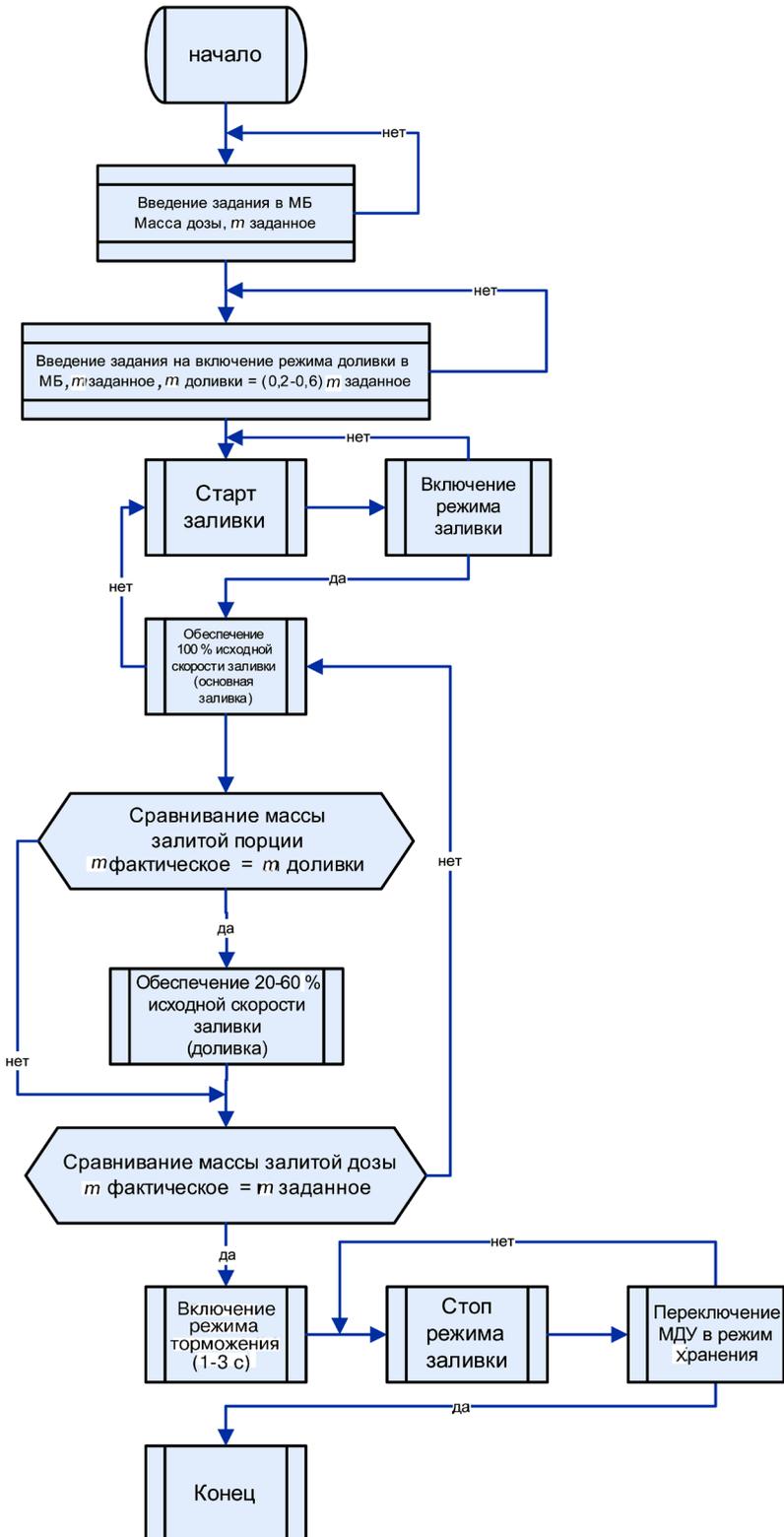


Рис. 4. Алгоритм работы системы управления, реализующий режим доливки с торможением в выходной фазе дозирования

## Проблемы автоматизации, механизации и компьютеризации процессов литья

и  $\Theta = 0,9-1,1$  кг/с масса  $m_{ис}$ , соответствующая инерционному сливу расплава, составила 0,36 - 0,38 кг, а колебания массы  $\Delta m_{ис} = \pm 10$  г, также была улучшена воспроизводимость результатов дозирования. Поэтому стало возможным осуществить учет избытка расплава в каждом цикле заливки, ввести упреждение в программу дозирования на основании статистических данных и уменьшить допустимую погрешность дозирования до 0,5-1,0 % от величины дозы.

Алгоритм работы магнитовесовой установки для дискретного дозирования и заливки алюминиевых расплавов в литейные формы, реализующий режимы доливки и торможения расплава в выходной фазе дозирования, приведен на рис. 4 и в таблице.

Данный алгоритм реализован программно и заложен в микропроцессорный блок измерения массы и управления процессом дозирования, удобен в эксплуатации и сравнительно просто может быть откорректирован при изменении технологического процесса заливки.

### **Выводы**

- Анализ влияния внешних и внутренних дестабилизирующих факторов на погрешность дискретного дозирования расплава из магнитовесовой установки показал, что основными причинами возникновения погрешности являются нестабильность расхода в выходной фазе дозирования, температура расплава и связанная с ней вязкость, а также величина инерционного слива после отключения электромагнита установки.

- Установлено, что для снижения негативного влияния гидродинамических процессов перестройки вихревых структур в рабочей зоне МДУ при переходе от режима заливки расплава в режим хранения необходимо вводить технологическую паузу (1-2 с), во время которой электромагнитные системы МДУ обесточены.

- Для уменьшения массы расплава за время инерционного слива необходимо переключать МДУ при 70-80 %  $m_d$  на пониженный расход  $\Theta'_H = (0,2-0,6) \Theta_H$  в зависимости от величины дозы.

- Для осуществления контроля и электромагнитного управления расходом расплава в период инерционного слива целесообразно проводить торможение струи расплава с помощью электромагнитных сил с возможностью изменения направления их действия в выходной фазе дозирования.

- В результате проведенных экспериментальных исследований была установлена эффективность режима торможения струи расплава в выходной фазе дозирования при заливке форм.



### **Список литературы**

1. Средства и системы автоматизации литейного производства / К. С. Богдан, В. Н. Горбенко, В. М. Денисенко, Ю. П. Каширин. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
2. Магнитодинамические насосы для жидких металлов / В. П. Полищук, М. Р. Цин, Р. К. Горн и др. – Киев: Наук. думка, 1989. – 256 с.
3. Магнитодинамический дозатор для жидкого чугуна / В. П. Полищук, К. С. Богдан, В. К. Погорский и др. // Литейн. пр-во. – 1976. – № 4. – С. 33-34.
4. Дубоделов В. И., Богдан К. С., Фикссен В. Н. Дискретное дозирование металлических расплавов магнитовесовым методом // Заготовительные производства в машиностроении. – 2009. – № 5. – С. 8-13.
5. Альтман М. Б., Стромская Н. П. Повышение свойств стандартных литейных алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1984. – С. 68-69.

Поступила 24.09.2010