



There are carried out the computer calculations of the speed fields and time characteristics of the aluminium melt stream in the three-dimensional form, received on the basis of the sand-clay mixtures. There are presented the experimental results of the time characteristics of the moving melt, received with the help of micro-controller timing device. There is carried out the comparative analysis of the experimental and design data for different variants of the space network of the computer system "ProLit1".

В. Ф. СОБОЛЕВ, С. Г. ЛИХОУЗОВ, Ф. С. ЛУКАШЕВИЧ, О. И. ЧИЧКО, БНТУ

УДК 669.27:519

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕЧЕНИЯ РАСПЛАВОВ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ «ПРОЛИТ-1»

Одной из сложнейших проблем моделирования движения расплава в сложной форме является экспериментальная верификация результатов, получаемых при компьютерном моделировании. Анализ литературных данных, посвященных движению расплавов, показал, что вопрос экспериментальной оценки моделируемых характеристик течения кристаллизующихся расплавов слабо изучен. В первую очередь это связано с тем, что приборы, позволяющие определять значения скоростей и их направления в пространстве высокотемпературного расплава, практически не разработаны. Необходимость экспериментальной оцен-

ки движения расплава связана с компьютерными системами моделирования течения расплавов и, в частности, с разработкой и промышленной апробацией программного продукта «ПроЛит-1» [1, 2].

Для решения этой задачи была разработана экспериментальная методика определения скоростных режимов и временных характеристик движения расплавов. В качестве измеряемых характеристик течения расплава использовали времена перемещения расплава из одной заданной точки в другую. На рис. 1 показана принципиальная схема прибора, использованного для определения времен движения металла в выделенных точках

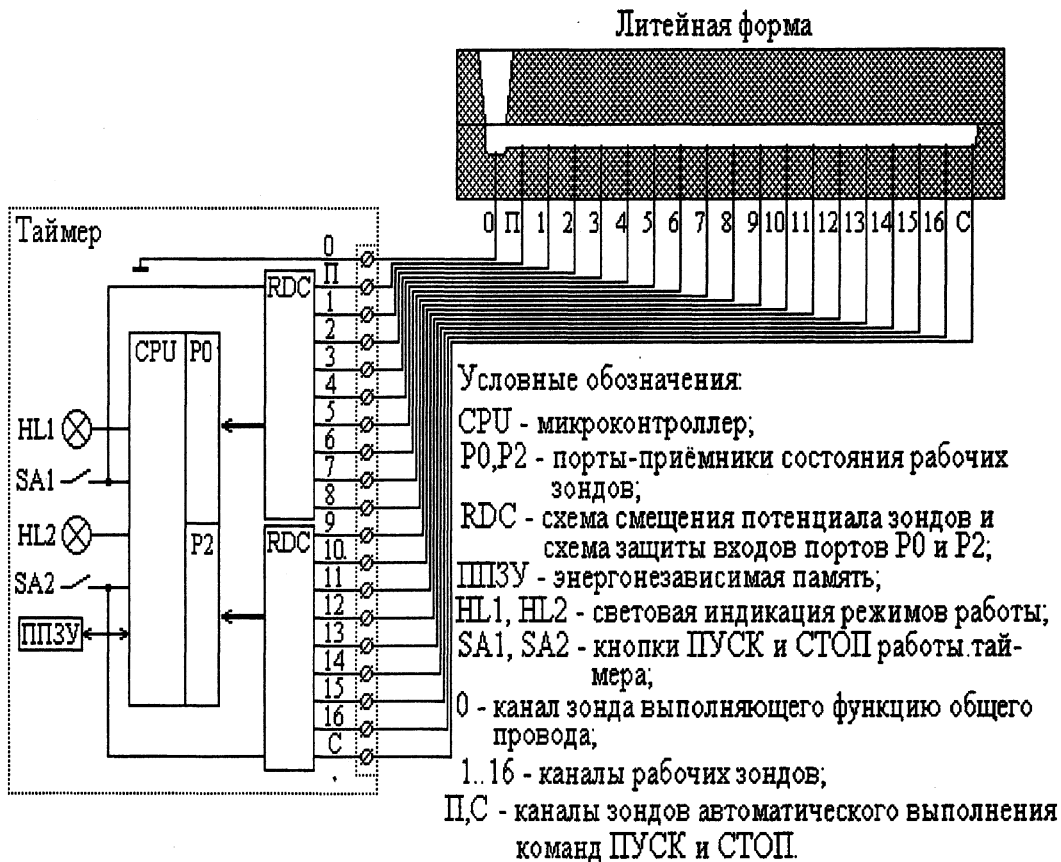


Рис. 1. Схема прибора для определения временных характеристик текущего расплава в форме

формы. Сущность этой методики сводится к определению с помощью микроконтроллера относительных временных промежутков, последовательно закороченной сети контактных металлических элементов. Положение контактных элементов может быть любым в пространстве и устанавливается в выделенных местах формы. Расплавом служил технический алюминий. В качестве формы использовали змеевидную вертикально меняющуюся структуру, выполненную из песчано-глинистой смеси. Используемая форма (рис. 2) была получена методом формообразования и представляла собой систему последовательно соединенных пространственных каналов, по которым двигался металл, заливаемый в чашу (А). Положение контактных элементов, в которых измерялось относительное время движения металла, обозначено цифрами 1–7. В качестве основной точки, от которой производится отсчет относительного времени, была выбрана точка 1.

На первом этапе исследований проведены три экспериментальные заливки расплава в форму, среднее сечение которой и размеры представлены на рис. 2. Варианты В1–В3 соответствуют одинаковым температурам заливки $720 \pm 5^\circ\text{C}$ и поддерживаемой постоянно температурой формы $50 \pm 5^\circ\text{C}$. На втором этапе исследований трехмерное изображение формы было построено в компьютерной системе «ПроЛит-1». На третьем этапе пространственная структура змеевидной формы (рис. 2) была разбита сеткой различной степени дискретности. При этом были использованы пять пространственных конфигураций, каждая из которых отличалась между собой числом элементов, на которые разбивалась вся структура. Например, варианту В5 соответствует расчетный шаг по пространству $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 30\text{ мм}$ (общее число элементов 480), а варианту В9 – шаг по пространству $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 3\text{ мм}$ (общее число элементов 112 931). Введение различных шагов по пространству позволило варьировать числом элементов и степенью погрешности результатов моделирования.

На рис. 3 показано расчетное поле скоростей заполнения алюминиевым расплавом формы, изображенной на рис. 2 (вариант расчета В8), полученное с помощью компьютерной системы «ПроЛит». Из рисунка видно, что поле скоростей является неоднородным, о чем свидетельствуют черно-белые переходы и шкала, размерность которой дана в м/с. На рис. 4 представлены зависимости скоростей для двух направлений в трех выделенных точках формы, из которых можно видеть сложный характер изменения скорости на всем временном промежутке времени. Как видно из рисунка, скорость меняет свой знак от времени. По рисунку можно определить время, когда металл попадает в область выделенной точки.

В табл. 1 приведены экспериментальные и расчетные данные по относительным временам

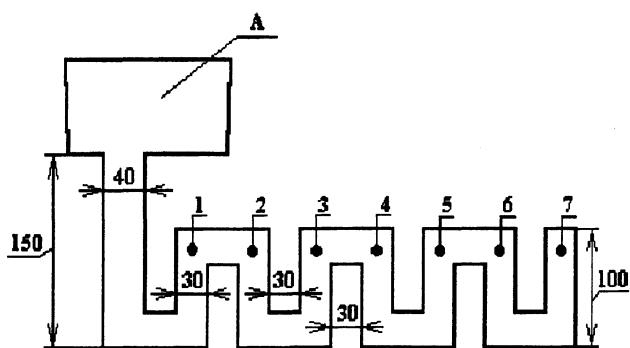


Рис. 2. Положения контактов (1–7) микроконтроллера в схеме центрального сечения формы, использованной для проведения экспериментальных исследований

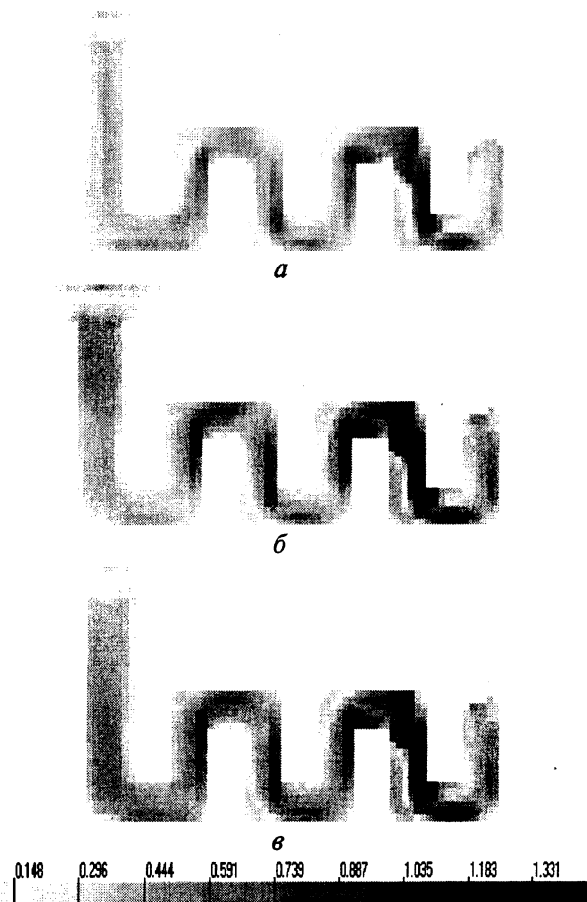


Рис. 3. Распределение скоростей течения расплава в выделенных сечениях формы ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5\text{ мм}$): а – центральное сечение; б – сечение между центром и формой; в – сечение возле формы

течения расплава, полученные при выполнении работы. По трем экспериментальным вариантам был получен усредненный вариант В4, который также использовали для сравнительной оценки течения расплава. Цифры «1–2» в графе «Интервал» обозначают относительное время перемещения расплава из точки 1 в точку 2. Аналогично рассмотрены интервалы для всех семи точек. Как видно из таблицы, для интервала 1–2 время перемещения расплава изменяется от 0,09 до 0,12 с для трех испытаний. Расчетное время для

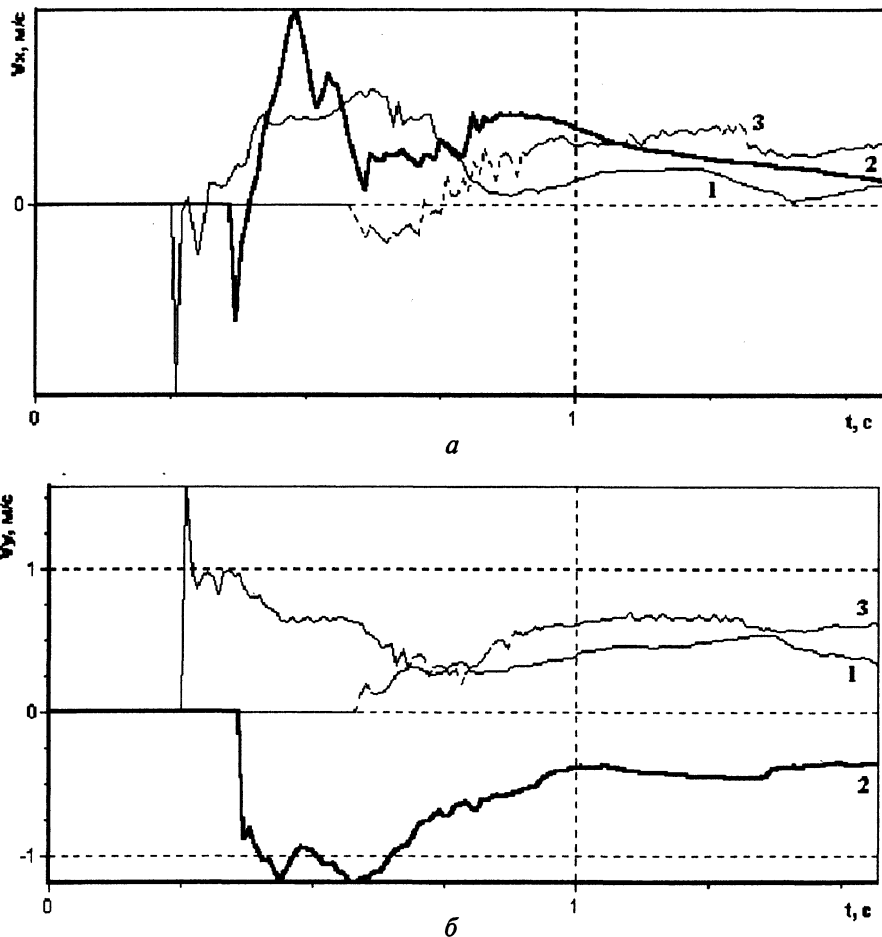


Рис. 4. Распределение скорости течения расплава от времени в измеряемых точках 1–3 формы ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 3$ мм): а – проекция скорости на ось X; б – проекция скорости на ось Y

Таблица 1. Относительное время движения металла по системе каналов для различных вариантов испытаний (В1–В3) и расчетов (В5–В9)

Интервал	Время по экспериментальным данным, с			Среднее время, с	Время для различных вариантов расчета, с				
	В1	В2	В3		В4	В5 (30мм)	В6 (15мм)	В7 (10мм)	В8 (5мм)
1-2	0,09	0,11	0,12	0,11	0,08	0,09	0,10	0,12	0,10
1-3	0,28	0,34	0,32	0,31	0,34	0,38	0,31	0,35	0,34
1-4	0,52	0,51	0,55	0,53	0,53	0,56	0,48	0,53	0,55
1-5	0,85	0,81	0,86	0,84	0,81	0,92	0,77	0,80	0,79
1-6	1,04	1,01	1,05	1,03	0,99	1,16	0,98	1,06	1,14
1-7	1,51	1,4	1,48	1,46	1,41	1,54	1,39	1,47	1,55

варианта В5 равно 0,08 с и немного выходит за интервал 0,09–0,12 с. Для вариантов В6 и В9 относительные расчетные времена находятся в интервале 0,09–0,12 с. Для интервала 1–3 имеется небольшое превышение относительного времени для варианта В6 – 0,38 с по сравнению с относительным временным интервалом 0,28–0,34 с. Это превышение не достигает 12% от крайнего значения времени варианта 2. Подобные изменения относительных времен наблюдаются и для контактных пар 1–4, 1–5, 1–6 и 1–7. По-видимому, больший пространственный шаг приводит к большим различиям экспериментальных и расчетных данных. Однако изменение простран-

ственного шага неоднозначно влияет на точность расчета, что, по-видимому, связано с колебаниями плотности расплава при решении уравнений Навье–Стокса в компьютерной системе «ПроЛит-1». В целом картина изменения относительных времен по данным эксперимента и расчетным данным КС «ПроЛит-1» удовлетворительная, что свидетельствует об адекватности используемых моделей в модуле течения «ПроЛит-1».

В табл. 2 представлены сравнительные данные относительных времен течения для контактов 1–2 – 1–7, полученные с помощью экспериментов и на основе различных временных шагов компьютерной системы «ПроЛит-1». Из таблицы видно,

Таблица 2. Относительное время движения металла по системе каналов для различных вариантов испытаний (В1–В3) и расчетов (В5–В9) при пространственном шаге разбиения 15мм и различных шагах по времени

Интервал	Время по экспериментальным данным, с			Среднее время, с	Время для различных вариантов расчета, с				
	В1	В2	В3		В4	В5 (0,001с)	В6 (0,0005с)	В7 (0,0001с)	В8 (0,00001с)
1-2	0,09	0,11	0,12	0,11	0,12	0,13	0,14	0,12	0,15
1-3	0,28	0,34	0,32	0,31	0,41	0,42	0,43	0,43	0,43
1-4	0,52	0,51	0,55	0,53	0,60	0,61	0,63	0,58	0,66
1-5	0,85	0,81	0,86	0,84	0,95	0,98	0,99	0,98	1,00
1-6	1,04	1,01	1,05	1,03	1,17	1,23	1,26	1,21	1,27
1-7	1,51	1,4	1,48	1,46	1,65	1,69	1,71	1,73	1,69

что величина временного шага практически не влияет на виртуальное движение расплава. По-видимому, это связано с тем, что выбранный шаг в расчете соответствует области устойчивого решения уравнений Навье – Стокса.

Таким образом, представленные расчетные и экспериментальные результаты свидетельствуют об адекватности математических моделей, численных схем решения уравнений Навье – Стокса и

уравнения неразрывности, реализованных в компьютерной системе «ПроЛит-1».

Литература

1. Чичко А. Н., Соболев В. Ф., Лихоузов С. Г. Комплекс программных средств «ПРОЛИТ» для моделирования процессов течения и охлаждения расплавов // Программные продукты и системы. 2002. № 4. С. 47–48.
2. Чичко А. Н., Соболев В. Ф., Лихоузов С. Г. Компьютерная система «ПроЛит» – инструмент для повышения качества // ТЭО. 2001. № 6. С. 30–31.