

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. Н. Чичко, Ф. С. Лукашевич, С. Г. Лихоузов, О. И. Чичко, Расчетное и экспериментальное исследование характеристик движущегося расплава, *ТВТ*, 2006, том 44, выпуск 3, 472–477

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.89

9 февраля 2025 г., 04:31:51



УДК 669.27:519

РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИЖУЩЕГОСЯ РАСПЛАВА

© 2006 г. А. Н. Чичко, Ф. С. Лукашевич, С. Г. Лихоузов, О. И. Чичко

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Поступила в редакцию 03.08.2004 г.

Представлены результаты расчетов полей скоростей и временных характеристик течения алюминиевого расплава в песчано-глинистой промышленной форме. С помощью разработанного таймера микроконтроллера получены экспериментальные данные по временным характеристикам текущего (движущегося) расплава. Проведен сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных для различных вариантов пространственной сетки моделируемого движущегося расплава.

PACS: 07.05.Tr, 47.60.+i

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальная проверка результатов компьютерного моделирования движущихся потоков расплава является одной из сложных задач теплофизики высоких температур. Анализ многочисленных исследований, посвященных движению расплавов, показал, что вопрос опытной оценки моделируемых характеристик течения кристаллизующихся расплавов является еще недостаточно изученным. В первую очередь это связано с тем, что практически не разработаны приборы, позволяющие определять значения скоростей и их направления в пространстве высокотемпературного расплава. Необходимость экспериментального исследования движения расплава связана с развитием и применением компьютерных систем моделирования и, в частности, с разработкой и промышленной апробацией программного продукта “ПроЛит-1” [1, 2].

Целью настоящей работы является разработка экспериментального метода оценки скоростей движущегося в форме расплава и на этой основе верификация результатов численного моделирования временных характеристик скоростного потока алюминия.

СИСТЕМА УРАВНЕНИЙ

В качестве расчетных данных использовались поля скоростей и температур, полученные при моделировании движущегося и кристаллизующегося потока (“ПроЛит-1”). Задача описывалась системой уравнений Навье–Стокса и Фурье–Киргоффа, дополненных начальными и граничными условиями [3–6].

Уравнения движения Навье–Стокса для вязкой несжимаемой жидкости имеют вид

$$\left\{ \begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial V_x}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \right) &= \\ &= -\frac{\partial P}{\partial x} + \eta \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial V_y}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \right) &= \\ &= \rho g - \frac{\partial P}{\partial y} + \eta \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial V_z}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) &= \\ &= -\frac{\partial P}{\partial z} + \eta \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right), \end{aligned} \right. \quad (1)$$

уравнение неразрывности для несжимаемой жидкости –

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \rho \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) = 0, \quad (2)$$

уравнение теплообмена Фурье–Киргоффа –

$$\left\{ \begin{aligned} c\rho \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) &= \\ &= \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q(x, y, z, \tau). \end{aligned} \right. \quad (3)$$

В (1)–(3) V_x, V_y, V_z – проекции скорости на оси x, y, z соответственно; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность жидкости; η – коэффициент динамической вязкости; λ – коэффициент теплопроводности; c – теплоемкость жидкости; τ – вре-

мя; P – давление в рассматриваемой точке потока; T – температура в рассматриваемой точке потока; $q(x, y, z, \tau)$ – источник скрытой теплоты кристаллизации в рассматриваемой точке потока.

МЕТОД РЕШЕНИЯ

Для решения системы уравнений (1)–(3) применялся конечно-разностный метод решения, реализованный в программе “ПроЛит”. При численном решении задач для случая течения расплавов в заданных формах использовалось несколько вариантов границ для скоростей, давлений и температур на шести типах областей, определяющих граничные условия: Ω_1 – жидкий металл; Ω_2 – форма или закристаллизовавшийся металл; Ω_3 – воздух; Ω_4 – ось симметрии; Ω_5 – источник ($\rho(\Omega_5) = \text{const}$; $T(\Omega_5) = \text{const}$); Ω_6 – граница первого рода ($T(\Omega_6) = \text{const}$).

Начальные условия для $\tau = 0$ имеют вид

$$\begin{aligned} V_x(\Omega_1) = 0, \quad V_y(\Omega_1) = 0, \quad V_z(\Omega_1) = 0, \\ \rho(\Omega_1) = \rho_0(\Omega_1), \quad P(\Omega_1) = 0, \quad T(\Omega_1) = T_{\text{зал}}; \\ V_x(\Omega_2) = 0, \quad V_y(\Omega_2) = 0, \quad V_z(\Omega_2) = 0, \\ \rho(\Omega_2) = \rho_0(\Omega_2), \quad P(\Omega_2) = 0, \quad T(\Omega_2) = T_2; \\ V_x(\Omega_3) = 0, \quad V_y(\Omega_3) = 0, \quad V_z(\Omega_3) = 0, \\ \rho(\Omega_3) = \rho_0(\Omega_3), \quad P(\Omega_3) = 0, \quad T(\Omega_3) = T_3; \\ V_x(\Omega_4) = 0, \quad V_y(\Omega_4) = 0, \quad V_z(\Omega_4) = 0, \\ \rho(\Omega_4) = \rho_0(\Omega_1), \quad P(\Omega_4) = 0, \quad T(\Omega_4) = T(\Omega_1); \\ V_x(\Omega_5) = 0, \quad V_y(\Omega_5) = 0, \quad V_z(\Omega_5) = 0, \\ \rho(\Omega_5) = \rho_0(\Omega_1), \quad P(\Omega_5) = 0, \quad T(\Omega_5) = T_{\text{зал}}; \\ V_x(\Omega_6) = 0, \quad V_y(\Omega_6) = 0, \quad V_z(\Omega_6) = 0, \\ \rho(\Omega_6) = \rho_0(\Omega_2), \quad P(\Omega_6) = 0, \quad T(\Omega_6) = T_6. \end{aligned}$$

При $\tau \neq 0$ задаются следующие граничные условия:

$$\begin{aligned} V_x(\Omega_1) = V_x(\Omega_{1n}), \quad V_y(\Omega_1) = V_y(\Omega_{1n}), \\ V_z(\Omega_1) = V_z(\Omega_{1n}), \quad \rho(\Omega_1) = \rho(\Omega_{1n}), \\ P(\Omega_1) = P(\Omega_{1n}), \quad T(\Omega_1) = T(\Omega_{1n}); \\ V_x(\Omega_2) = 0, \quad V_y(\Omega_2) = 0, \quad V_z(\Omega_2) = 0, \\ \rho(\Omega_2) = \rho_0(\Omega_2), \quad P(\Omega_2) = P(\Omega_1), \\ T(\Omega_2) = T(\Omega_{2n}); \quad V_x(\Omega_3) = V_x(\Omega_1), \\ V_y(\Omega_3) = V_y(\Omega_1), \quad V_z(\Omega_3) = V_z(\Omega_1), \\ \rho(\Omega_3) = \rho(\Omega_{3n}), \quad P(\Omega_3) = 0, \quad T(\Omega_3) = T(\Omega_{3n}); \\ V_x(\Omega_4) = V_x(\Omega_1), \quad V_y(\Omega_4) = V_y(\Omega_1), \\ V_z(\Omega_4) = -V_z(\Omega_1), \quad \rho(\Omega_4) = \rho(\Omega_1), \\ P(\Omega_4) = P(\Omega_1), \quad T(\Omega_4) = T(\Omega_1); \\ V_x(\Omega_5) = V_x(\Omega_{5n}), \quad V_y(\Omega_5) = V_y(\Omega_{5n}), \\ V_z(\Omega_5) = V_z(\Omega_{5n}), \quad \rho(\Omega_5) = \rho_0(\Omega_1), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(\Omega_5) = 0, \quad T(\Omega_5) = T_{\text{зал}}; \\ V_x(\Omega_6) = 0, \quad V_y(\Omega_6) = 0, \quad V_z(\Omega_6) = 0, \\ \rho(\Omega_6) = \rho_0(\Omega_2), \quad P(\Omega_6) = 0, \quad T(\Omega_6) = T_6. \end{aligned}$$

При $T \geq T_{\text{зал}}$ используются следующие начальные распределения скоростей, плотностей, давлений и температур:

$$\begin{aligned} V_x(\Omega_1) = V_x(\Omega_1), \quad V_y(\Omega_1) = V_y(\Omega_1), \\ V_z(\Omega_1) = V_z(\Omega_1), \quad \rho(\Omega_1) = \rho_0(\Omega_1), \\ P(\Omega_1) = P(\Omega_1), \quad T(\Omega_1) = T(\Omega_1); \\ V_x(\Omega_2) = 0, \quad V_y(\Omega_2) = 0, \quad V_z(\Omega_2) = 0, \\ \rho(\Omega_2) = \rho(\Omega_2), \quad P(\Omega_2) = P(\Omega_1), \quad T(\Omega_2) = T(\Omega_2); \\ V_x(\Omega_3) = 0, \quad V_y(\Omega_3) = 0, \quad V_z(\Omega_3) = 0, \\ \rho(\Omega_3) = \rho(\Omega_3), \quad P(\Omega_3) = 0, \quad T(\Omega_3) = T(\Omega_3); \\ V_x(\Omega_4) = V_x(\Omega_4), \quad V_y(\Omega_4) = V_y(\Omega_4), \quad V_z(\Omega_4) = V_z(\Omega_4), \\ \rho(\Omega_4) = \rho(\Omega_1), \quad P(\Omega_4) = P(\Omega_1), \quad T(\Omega_4) = T(\Omega_4); \\ V_x(\Omega_5) = V_x(\Omega_5), \quad V_y(\Omega_5) = V_y(\Omega_5), \quad V_z(\Omega_5) = V_z(\Omega_5), \\ \rho(\Omega_5) = \rho_0(\Omega_1), \quad P(\Omega_5) = 0, \quad T(\Omega_5) = T_{\text{зал}}; \\ V_x(\Omega_6) = 0, \quad V_y(\Omega_6) = 0, \quad V_z(\Omega_6) = 0, \\ \rho(\Omega_6) = \rho(\Omega_2), \quad P(\Omega_6) = 0, \quad T(\Omega_6) = T_6. \end{aligned}$$

Все расчетные данные получены как результат численного решения системы уравнений (1)–(3) с выше приведенными граничными и начальными условиями.

ЭКСПЕРИМЕНТ

Экспериментальные результаты получены с помощью специальной методики определения скоростных режимов и временных характеристик движения расплавов. В частности, измерялись времена перемещения расплава из одной заданной точки трехмерной формы в другую. На рис. 1 представлена принципиальная схема прибора, использованного для нахождения времен движения металла в выделенных точках формы. Суть этой методики сводится к определению времени перемещения металла между контактами микроконтроллера. Контактные элементы, установленные в выделенных местах формы, последовательно закорачиваются при прохождении через них металла, что регистрируется таймером-микроконтроллером. Технический алюминий, используемый в качестве расплава, заливался в змеевидную вертикально меняющуюся форму, выполненную из песчано-глинистой смеси. Форма, представленная на 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 движе-

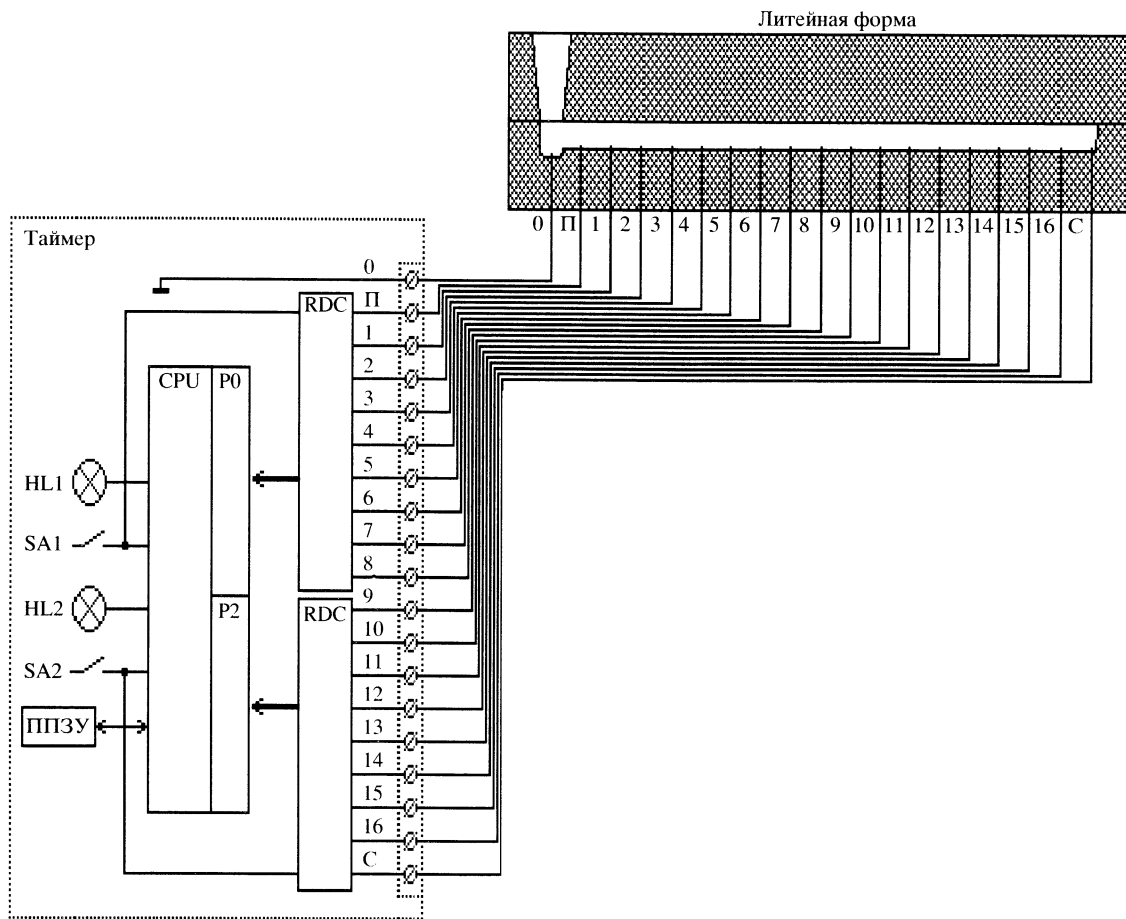


Рис. 1. Схема прибора для определения временных характеристик текущего расплава в форме. CPU – микроконтроллер; P0, P2 – порты-приемники состояния рабочих зондов; RDC – схема смещения потенциала зондов и схема защиты входов портов P0 и P2; ППЗУ – энергонезависимая память; HL1, HL2 – световая индикация режимов работы; SA1, SA2 – кнопки “пуск” и “стоп” работы таймера; 0 – канал зонда, выполняющего функцию общего провода; 1–16 – каналы рабочих зондов; П, С – каналы зондов автоматического выполнения команд “пуск” и “стоп”.

ния металла, обозначено числами 1–7. Основная выбранная точка, от которой производится отсчет относительного времени, имеет номер 1.

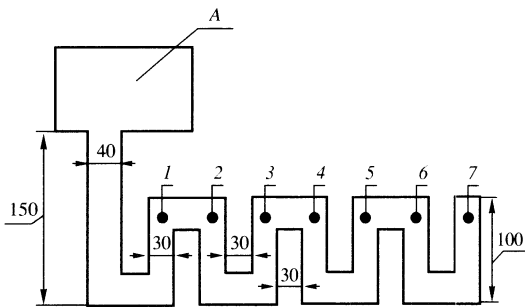


Рис. 2. Положения контактов 1–7 микроконтроллера в центральном сечении формы, использованной для проведения экспериментальных исследований. Размеры указаны в мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На первом этапе исследований было проведено 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 постоянной температуре формы $50 \pm 5^\circ\text{C}$.

На втором этапе трехмерное изображение формы было построено в компьютерной системе “ПроЛит-1”. На третьем этапе пространственная структура змеевидной формы (рис. 2) аппроксимировалась пространственными сетками различной степени дискретности. При этом использовались пять пространственных конфигураций, каждая из которых отличалась числом элементов, на которые разбивалась вся структура. Например, варианту В5 соответствуют расчетные шаги по пространству $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 30$ мм (общее число элементов 480), а варианту В9 – $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 3$ мм (общее число элементов 112 931). Введение раз-

личных шагов по пространству позволило варьировать число элементов и степень погрешности результатов моделирования.

На рис. 3 представлено полученное с помощью компьютерного кода “ПроЛит-1” расчетное поле скоростей при заполнении алюминиевым расплавом формы, изображенной на рис. 2 (вариант расчета В8). Из рис. 3 видно, что поле скоростей является неоднородным. На рис. 4 представлены зависимости продольной и поперечной составляющих скорости в трех выделенных точках формы. Из рис. 4 следует, что изменение скорости в течение всего временного промежутка имеет сложный характер, в частности, скорость меняет знак во времени. Анализ распределений скорости позволяет определить время попадания металла в область выделенной точки.

В табл. 1 представлены экспериментальные и расчетные данные по относительным моментам времени при течении расплава. По трем экспериментальным вариантам был получен средний вариант В4, который также использовался для сравнительной оценки. Обозначения 1–2, 1–3...1–7 в графе “Интервал” означают перемещение расплава из точки 1 в точку 2, из точки 1 в точку 3 и т.д. Как видно из табл. 1, для интервала 1–2 время перемещения расплава изменяется от 0.09 до 0.12 с для трех испытаний. Расчетное время для варианта В5 составляет 0.08 с, что несколько ниже значений из интервала 0.09–0.12 с. Для вариантов В6 и В9 относительные расчетные времена для 1–2 лежат в диапазоне от 0.09 до 0.12 с. Для интервала 1–3 относительное расчетное время 0.38 с для варианта В6 немного превышает экспериментальные величины 0.28–0.34 с. Так, расчетное время 0.38 с отклоняется от значения 0.34 с менее чем на 12%. Подобные отклонения наблюдаются и для контактных пар 1–4, 1–5, 1–6 и 1–7. По-видимому, бóльший пространственный шаг приводит к более значимым расхождениям экспериментальных и расчетных данных. Однако из-

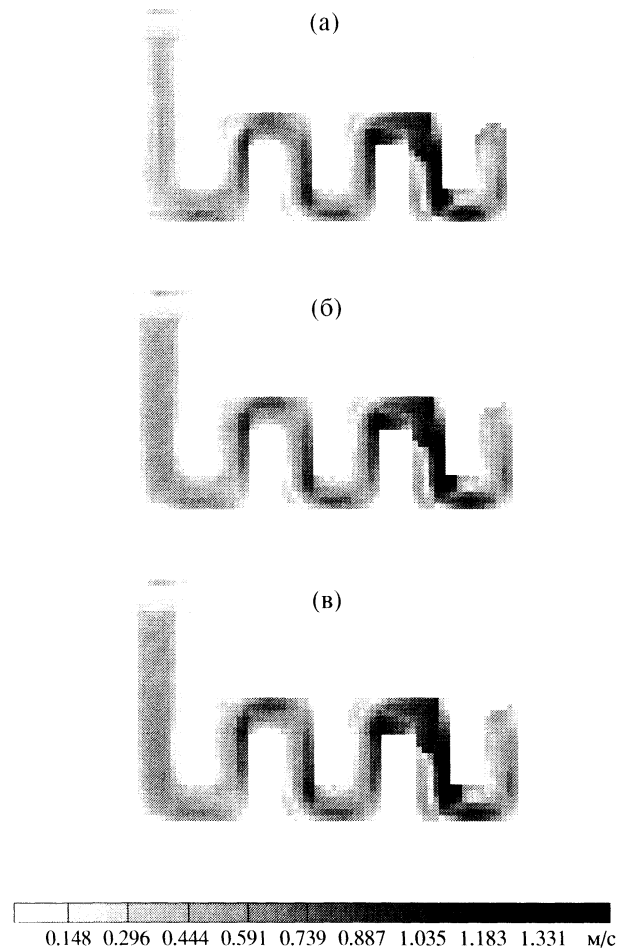


Рис. 3. Расчетное распределение скоростей при течении расплава в разных сечениях формы ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 5$ мм); (а) – центральное сечение; (б) – сечение между центром и формой; (в) – сечение вблизи поверхности формы.

менение пространственного шага неоднозначно влияет на точность расчета. Это, вероятно, связано с колебаниями плотности расплава при решении уравнений Навье–Стокса в компьютерном

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

Интервал	Время, экспериментальные данные, с			Среднее время, с	Время, расчет, с				
	В1	В2	В3		В4	В5	В6	В7	В8
				шаг сетки, мм					
					30	15	10	5	3
1–2	0.09	0.11	0.12	0.11	0.18	0.09	0.10	0.12	0.10
1–3	0.28	0.34	0.32	0.31	0.54	0.38	0.31	0.35	0.34
1–4	0.52	0.51	0.55	0.53	0.83	0.56	0.48	0.53	0.55
1–5	0.85	0.81	0.86	0.84	1.51	0.92	0.77	0.80	0.79
1–6	1.04	1.01	1.05	1.03	1.99	1.16	0.98	1.06	1.14
1–7	1.51	1.4	1.48	1.46	3.41	1.54	1.39	1.47	1.55

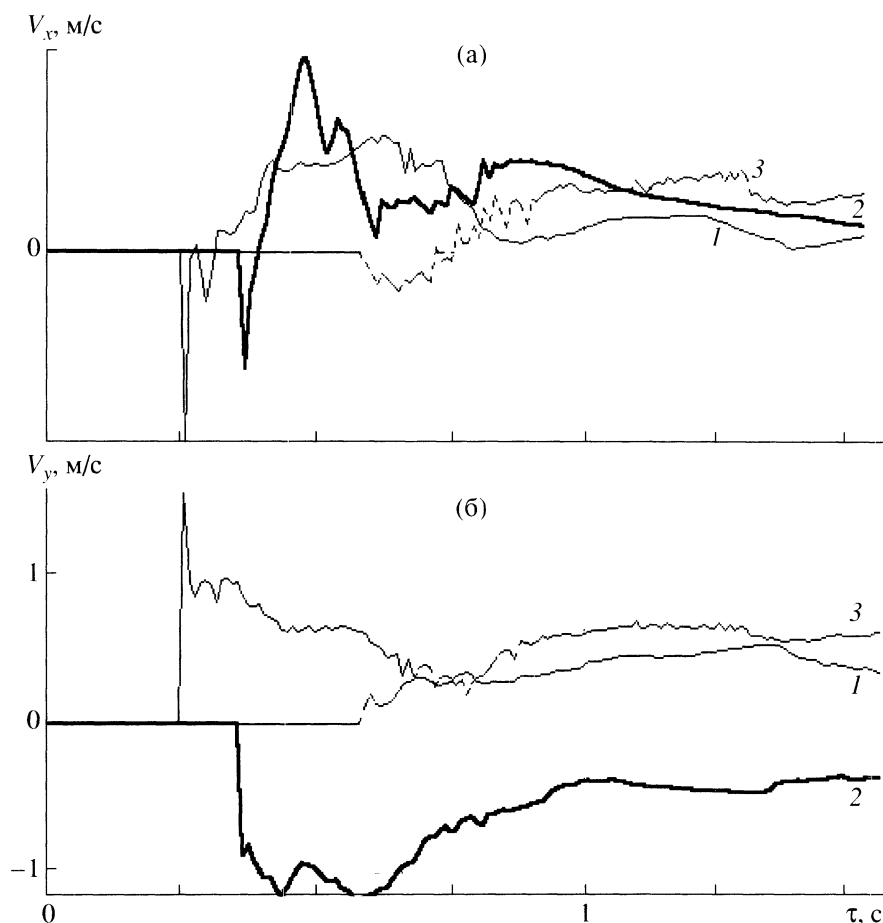


Рис. 4. Распределение скорости при течении расплава во времени в измеряемых точках 1–3 ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = 3$ мм): (а) – проекция скорости на ось x , (б) – проекция скорости на ось y .

коде “ПроЛит-1”. В целом соответствие экспериментальных и расчетных данных изменения относительных времен является удовлетворительным, что свидетельствует об адекватности используемых моделей в компьютерном коде “ПроЛит-1”.

В табл. 2 для сравнения представлены экспериментальные и расчетные относительные времена течения, полученные на разных шагах по времени. Из данных табл. 2 следует, что временной шаг практически не влияет на значения относительных времен движения расплава. По-видимому, это свя-

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

Интервал	Время, экспериментальные данные, с			Среднее время, с	Время, расчет, с					
	В1	В2	В3		В4	В5	В6	В7	В8	В9
						шаг по времени, с				
					0.001	0.0005	0.0001	0.00001	переменный	
1–2	0.09	0.11	0.12	0.11	0.07	0.9	0.09	0.08	0.09	
1–3	0.28	0.34	0.32	0.31	0.36	0.37	0.38	0.38	0.38	
1–4	0.52	0.51	0.55	0.53	0.50	0.51	0.53	0.48	0.56	
1–5	0.85	0.81	0.86	0.84	0.87	0.91	0.91	0.90	0.92	
1–6	1.04	1.01	1.05	1.03	1.06	1.12	1.15	1.10	1.16	
1–7	1.51	1.4	1.48	1.46	1.51	1.54	1.56	1.58	1.54	

зано с тем, что выбранный шаг в расчете соответствует области устойчивого решения уравнений Навье–Стокса. Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что погрешность расчета составляет 5.5% относительно среднего экспериментального времени, а разброс экспериментальных значений – 4.0%.

Таким образом, представленные расчетные и экспериментальные результаты свидетельствуют об адекватности реализованных в компьютерном коде “ПроЛит-1” математических моделей и численных схем, используемых для решения уравнений Навье–Стокса и уравнения неразрывности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена схема прибора с таймером-микроконтроллером для измерения времен при движении расплавов в промышленных формах.

Проведено численное и экспериментальное моделирование движения алюминиевого расплава для применяемой на практике змеевидной структуры. Получено удовлетворительное согласование расчетных и экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.
2. Чичко А.Н., Соболев В.Ф., Лихоузов С.Г. Компьютерная система “ПроЛит” – инструмент для повышения качества // ТЭО. 2001. № 6. С. 30.
3. Чичко А.Н., Лихоузов С.Г. Клеточно-автоматное моделирование процесса течения расплава в форме // Докл. НАН Беларуси. 2001. Т. 45. № 4. С. 110.
4. Чичко А.Н., Яцкевич Ю.В. Трехмерное компьютерное моделирование охлаждения отливки и выбор питателя литниковой системы на основе уравнения теплопроводности // ИФЖ. 1999. Т. 72. С. 797.
5. Чичко О.И., Соболев В.Ф. О новых методах анализа скоростных потоков расплавов для систем автоматизированного моделирования литейных процессов // Литье и металлургия. 2002. № 2. С. 42.
6. Чичко А.Н., Дроздов Е.А. Влияние электронного строения 3d-расплавов на характеристики охлаждающегося расплава, рассчитанные на основе уравнений Навье–Стокса и Фурье–Киргофа // Вестн. НАНБ. 2000. № 2. С. 5.