



Semi-quantitative method for calculation of non-metallic particles moving in gating systems that are used in sand-clay moulds is offered. The method allows to carry out expert evaluation of efficiency of gating system working at initial stage of the foundry technology development. The differential equation of Navje-Stocks and Newton's second law of motion taking into account Archimed's force are put into basis of the methods.

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

УДК 519:669.27

О ВЕРИФИКАЦИИ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА УЛАВЛИВАНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ, ДВИЖУЩИХСЯ В ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ

Одним из основных дефектов литья в песчано-глинистые формы является засор, который возникает из-за проникновения неметаллических частиц различного происхождения через литниковую систему в отливку. К сожалению, многочисленные конструкции шлакоуловителей не всегда позволяют на практике решить эту проблему. В результате этого поток расплава представляет собой гетерогенную смесь, состоящую из расплава и инородных частиц. При этом движение частиц в значительной степени повторяет движение расплава, однако имеет свои особенности, обусловленные силами Архимеда и сопротивления. Чтобы уменьшить влияние инородных частиц на формирование отливки, литниковые системы конструируют, используют так называемые элементы шлакоулавливания, которые «всасывают» инородные частицы, преграждая им путь в отливку. Следует отметить, что размеры и конструкцию литниковых систем разрабатывают на основе гидравлических формул для отношений сечений стояка, шлакоуловителя и питателя, которые носят эмпирический характер. Справедливость использования этих формул часто вызывает критику как практиков, так и теоретиков, поскольку они далеко не всегда могут быть применимы при разработке технологического процесса. В частности, существование в литниковых системах так называемого автоматического режима течения расплава свидетельствует о приближенном характере гидравлических формул, используемых при разработке литниковых систем. Следует отметить, что плотность частиц, их размеры, скорость движения практически не учитываются в расчетах. В настоящее время в теории литейных процессов модели движения дисперсных частиц в литниково-питающих системах еще недостаточно развиты, что не позволяет их использовать на практике для оценки эффективности шлакоулавливания.

Развитие вычислительных методов и появление компьютеров с большой оперативной и дисковой памятью открывают новые возможности для разработки литейных технологий. В связи с этим в настоящее время растет интерес к разработке моделей и методов, основанных на численном моделировании. Эти модели позволяют еще на этапе проектирования виртуально оценить эффективность технологических решений производственного цикла, используя методы пространственной и послойной визуализации. При этом важнейшим является вопрос о разработке метода, позволяющего по информации, полученной с помощью методов моделирования, выбирать лучшие технологические решения. Один из возможных методов в применении к процессам шлакоулавливания излагается в настоящей работе.

Цель настоящей работы — разработка полуколичественного метода расчета процесса улавливания неметаллических частиц заданной плотности в пространственной системе «стояк—шлакоуловитель—отливка» на основе динамически изменяющегося поля скоростей, рассчитываемого сеточными методами.

В основу расчета движения шлаковых частиц положена идея о том, что скорость частицы является суперпозицией скорости потока, описываемой уравнением Навье—Стокса расплава, и скорости частицы, возникающей в результате действия силы тяжести и архимедовой силы в

условиях стабилизации движущегося потока. В этом случае движение частицы может быть описано системой

$$\begin{cases} \bar{v}_q = \bar{v}_1 + \bar{v}_2, \\ m_q \frac{d\bar{v}_2}{dt} = \bar{F}_A + m_q \bar{g}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\bar{v}_q$ – скорость частицы; $\bar{v}_1$ – компонента скорости, связанная с потоком расплава; $\bar{v}_2$ – компонента скорости, связанная с силой Архимеда и силой тяжести; m_q – масса частицы; $\bar{F}_A$ – сила Архимеда.

Для определения скорости $\bar{v}_1$ ($v_1^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$) использовали систему уравнений Навье–Стокса для движущейся жидкости и уравнения Фурье–Кирхгофа для описания охлаждения движущегося потока.

В основу математических моделей для расчета поля скорости расплава положены дифференциальные уравнения Навье–Стокса, дополненные уравнением неразрывности для потока и функцией, связывающей давление и плотность. На этих моделях основывается компьютерная система «ПроЛит-1» [1–3] (www.caegroup.bntu, разработка БНТУ), модули которой использовали для расчета скоростных и температурных полей моделируемого объекта. Следует отметить, что модели течения расплава были верифицированы на основе экспериментов, основанных на определении скоростного поля с помощью оригинальной методики [4]. Ниже представлены основные уравнения математических моделей

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

и уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho_l}{\partial \tau} + \left(\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} \right) \rho_l = 0, \quad (3)$$

где τ – время; x, y, z – декартовы координаты (ось Y направлена вертикально вверх); V_x, V_y, V_z – соответственно проекции скорости жидкости на координатные оси X, Y, Z ; P – давление жидкости; ρ_l – плотность жидкости; η – динамическая вязкость жидкости.

В модели использовали следующие начальные и граничные условия для скоростей и температур: $v_x(x, y, z, 0) = 0$, $v_y(x, y, z, 0) = 0$, $v_z(x, y, z, 0) = 0$, $v(x, y, z, 0) = 0$, $T_p(x, y, z, 0) = 700^\circ\text{C}$, $T_\phi(x, y, z, 0) = 20^\circ\text{C}$, где T_p – температура расплава; T_ϕ – температура формы.

В качестве объекта моделирования использовали две литниковые системы (обозначение Л1 и Л2), которые имели одинаковую пространственную конфигурацию и различались лишь сечением стояка, шлаковика и питателя. Для литниковой системы Л1 это соотношение составляло 0,54:1,04:1, для литниковой системы Л2 – 0,60:2,4:1. В обеих литниковых системах каждый питатель соединен со своей отливкой с целью дальнейшего определения количества проходящих через соответствующий питатель шлаковых частиц, как видно из рис. 1 для литниковой системы Л1.

Модельные системы Л1 и Л2 были построены в пакете SolidWorks и импортированы в компьютерную систему «ПроЛит-1.0» для дальнейшего моделирования движения расплавленного потока и расчета траекторий движения шлаковых частиц в потоке. При моделировании системы с отливками в качестве начальных условий для расплава и формы использовали следующие характеристики: число сеточных элементов для Л1 – 242 883; для Л2 – 341 447; заливаемый металл – серый чугун СЧ10; химический состав: С – 3,6%; Si – 2,4; Mn – 0,65; P – 0,2; S – 0,15%; температура заливки – 1400°C ; начальная температура формы – 30°C ; шаг по пространству – 0,0025 м; теплофизические характеристики чугуна: $T_{\text{liq}} = 1238^\circ\text{C}$; $T_{\text{sol}} = 1145^\circ\text{C}$, теплопроводность и теплоемкость как функция температуры; теплофизические характеристики формы – теплопроводность, теплоемкость. Начальная скорость частиц, запускаемой в стояк, принималась равной нулю.

Результаты моделирования при запуске частиц вместе с потоком для литниковых систем Л1 и Л2 приведены на рис. 2 и 3. Из рис. 2, а видно, что шлаковые частицы движутся по всему объему

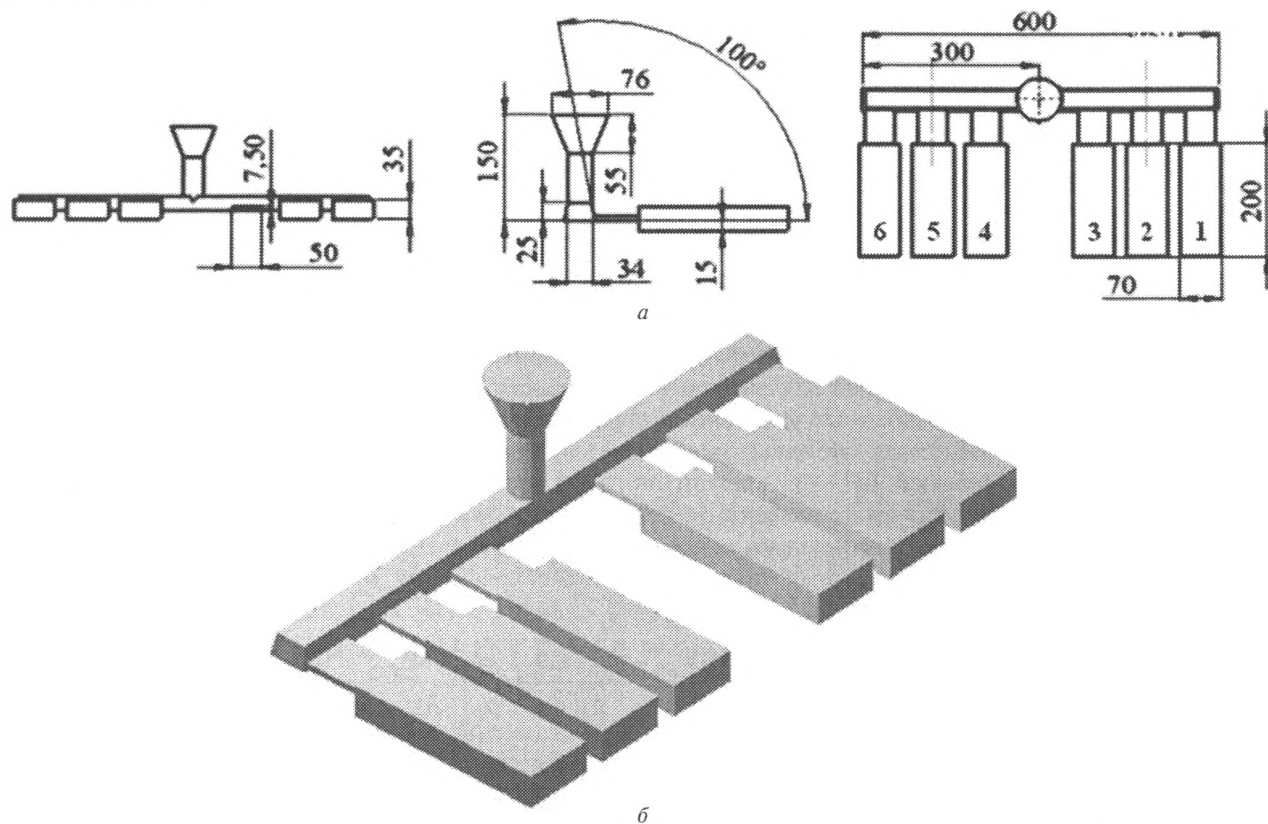


Рис. 1. Литниковая система Л1: *а* – эскиз литниковой системы; *б* – 3d изображение литниковой системы

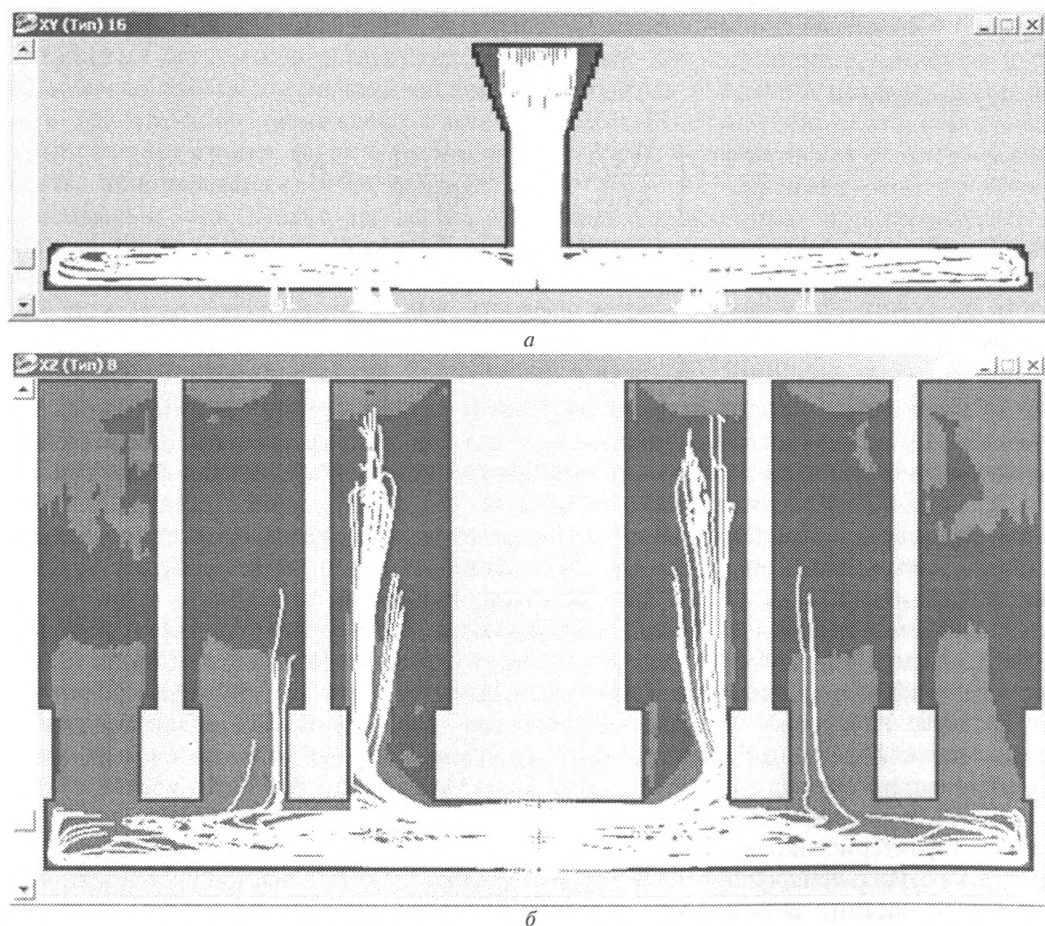


Рис. 2. Траектории движения частиц в литниковой системе Л1 при их движении вместе с потоком: *а* – вид литниковой системы с отливкой спереди; *б* – вид литниковой системы с отливкой сверху

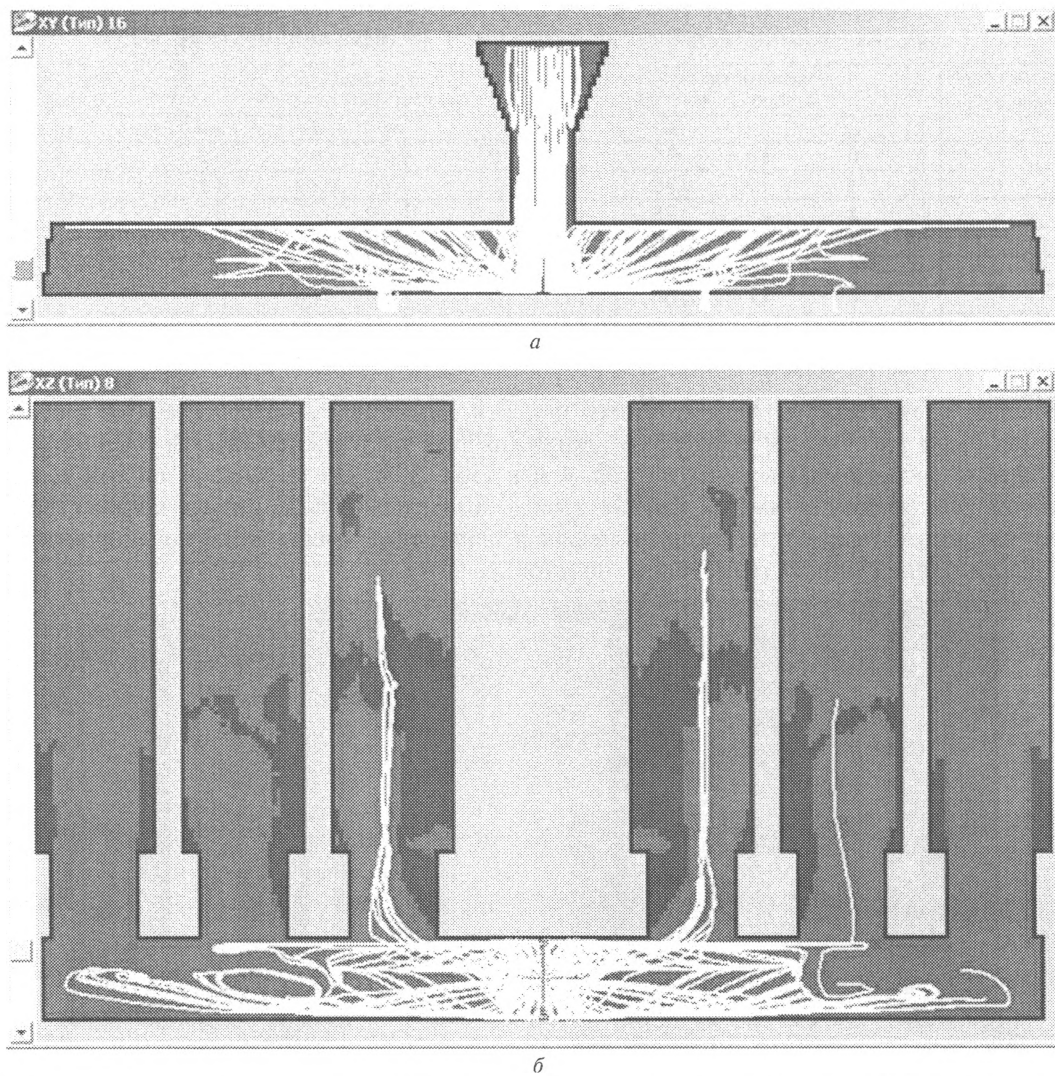


Рис. 3. Траектории движения частиц в литниковой системе Л2 при их движении вместе с потоком: а – вид литниковой системы с отливкой спереди; б – вид литниковой системы с отливкой сверху

шлаковика литниковой системы Л1, в то время как в литниковой системе Л2 частицы всплывают уже в первой половине шлаковика и частично в стояке (рис. 3, а). Попадание частиц в отливку и их траектории хорошо видны на обеих литниковых системах (рис. 2, б, 3, б). Очевидно, что шлаковые частицы попадают в большом количестве в отливки №3 и 4 в литниковой системе Л1 и в небольшом количестве для литниковой системы Л2. Подробные расчетные данные по попаданию шлаковых частиц в отливки №1–6 представлены в табл. 1, 2. Из таблиц видно, что в отливки №3 и 4 попадает по 14–16% шлаковых частиц в зависимости от их плотности для литниковой системы Л1 и 2,7–3,2% шлаковых частиц для литниковой системы Л2.

Таблица 1. Расчетное количество частиц с различной плотностью, попавших в отливки №1–6 при их движении вместе с потоком в литниковой системе Л1

Номер отливки	Число частиц $\rho=2600 \text{ кг/м}^3$		Число частиц $\rho=2800 \text{ кг/м}^3$		Число частиц $\rho=3000 \text{ кг/м}^3$	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%
1	0	0	2	0,74	1	0,37
2	3	1,10	5	1,84	5	1,84
3	39	14,34	40	14,71	43	15,81
4	40	14,71	42	15,44	44	16,18
5	6	2,21	6	2,21	8	2,94
6	0	0,00	0	0,00	1	0,37
Шлаковик	184	67,65	177	65,07	170	62,50
Всего	272	100	272	100	272	100

Таблица 2. Расчетное количество частиц с различной плотностью, попавших в отливки №1–6 при их движении вместе с потоком в литниковой системе Л2

Номер отливки	Число частиц $\rho=2600 \text{ кг/м}^3$		Число частиц $\rho=2800 \text{ кг/м}^3$		Число частиц $\rho=3000 \text{ кг/м}^3$	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%
1	0	0	0	0	1	0,35
2	1	0,35	2	0,69	3	1,04
3	8	2,78	9	3,13	9	3,13
4	8	2,78	9	3,13	9	3,13
5	0	0,00	1	0,35	2	0,69
6	0	0,00	0	0,00	1	0,35
Шлаковик	271	94,10	267	92,71	263	91,32
Всего	288	100	288	100	288	100

При проверке адекватности разработанных моделей движения неметаллических частиц в литниковых системах были рассчитаны траектории движения при их первоначальном расположении на дне стояка. Результаты расчетов приведены на рис. 4 и в табл. 3, 4. Из рисунка и таблиц видно, что при первоначальном расположении частиц на дне стояка значительно большее их количество попадает в отливки. Это связано с тем, что частицы, попадая в шлаковик, имеют нулевую скорость всплытия, в отличие от частиц, движущихся с потоком по стояку.

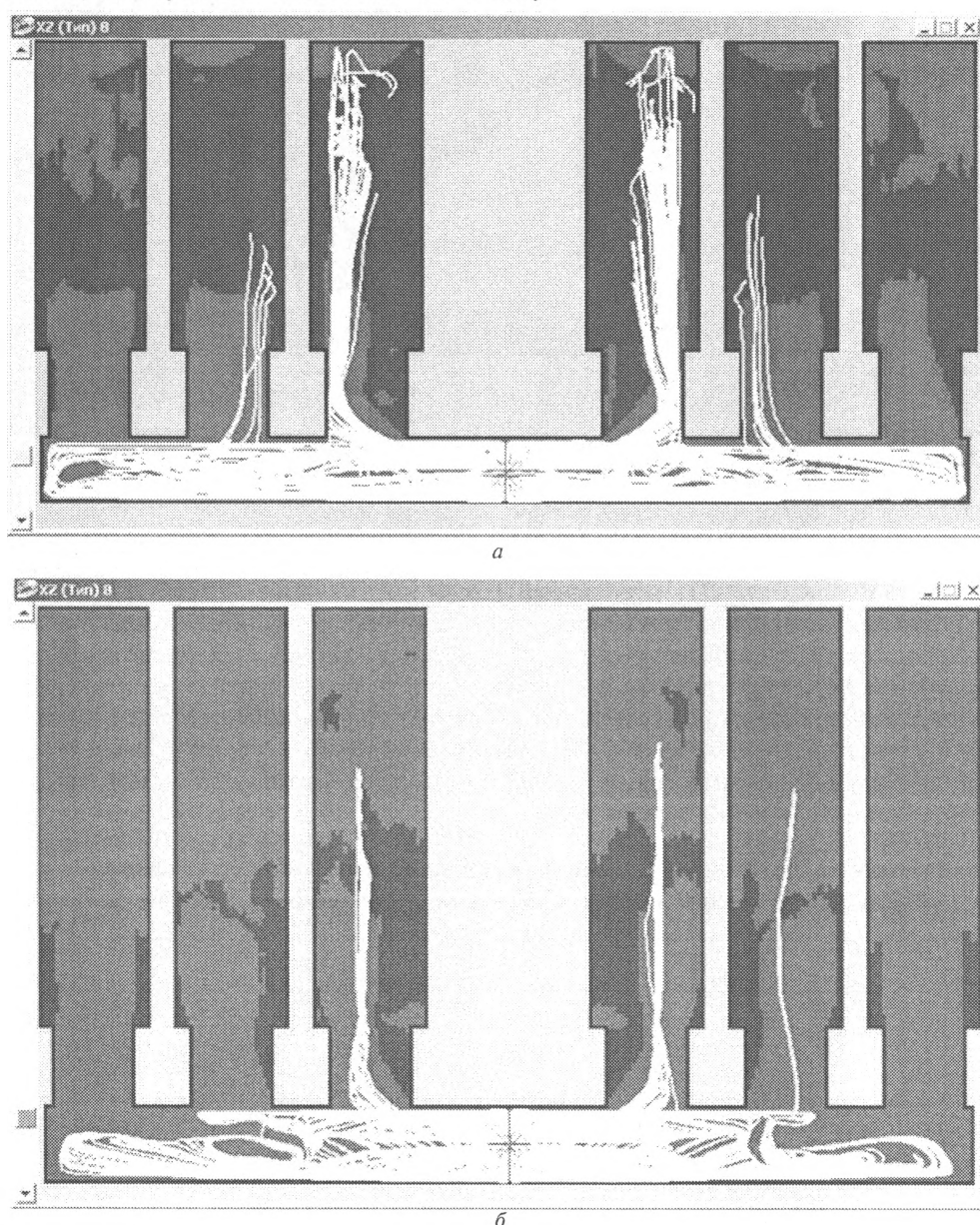


Рис. 4. Траектории движения частиц при их расположении на дне стояка различных литниковых систем: а – литниковая система Л1; б – литниковая система Л2

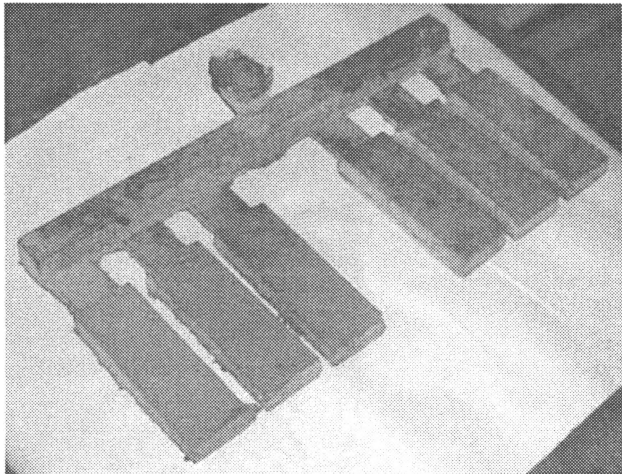
Таблица 3. Расчетное количество частиц с различной плотностью, попавших в отливки №1–6 при их расположении на дне стояка в литниковой системе Л1

Номер отливки	Число частиц $\rho=2600 \text{ кг/м}^3$		Число частиц $\rho=2800 \text{ кг/м}^3$		Число частиц $\rho=3000 \text{ кг/м}^3$	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%
1	2	0,69	2	0,69	2	0,69
2	10	3,47	12	4,17	15	5,21
3	55	19,10	56	19,44	58	20,14
4	56	19,44	58	20,14	61	21,18
5	11	3,82	14	4,86	18	6,25
6	1	0,35	1	0,35	2	0,69
Шлаковик	153	53,13	145	50,35	132	45,83
Всего	288	100	288	100	288	100

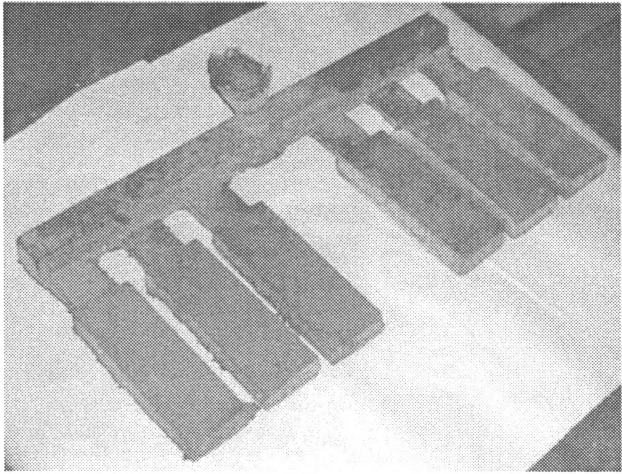
Таблица 4. Расчетное количество частиц с различной плотностью, попавших в отливки №1–6 при их расположении на дне стояка в литниковой системе Л2

Номер отливки	Число частиц $\rho=2600 \text{ кг/м}^3$		Число частиц $\rho=2800 \text{ кг/м}^3$		Число частиц $\rho=3000 \text{ кг/м}^3$	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%
1	0	0	0	0	1	0,39
2	1	0,39	0	0,00	3	1,17
3	23	8,98	23	8,98	25	9,77
4	22	8,59	23	8,98	24	9,38
5	0	0,00	1	0,39	2	0,78
6	0	0,00	0	0,00	0	0,00
Шлаковик	210	82,03	209	81,64	201	78,52
Всего	256	100	256	100	256	100

На окончательном этапе верификации математических моделей были проведены экспериментальные заливки в модельные формы на ОАО «МЗОО». На рис. 5 показаны фотографии обеих литниковых систем. При заливке шлаковые частицы располагались на дне стояка с целью получения возможности более четко проследить количество неметаллических частиц, попадающих в отливку и сравнения экспериментальных данных с результатами численного моделирования. После заливки поверхность каждой отливки была обработана для вскрытия дефектов, образованных попавшими в отливку неметаллическими частицами. Результаты экспериментальных заливок представлены на рис. 6–9. Из рисунков видно, что отливки №3 и 4 в литниковой системе Л1 собирают максимальное количество шлаковых частиц, в отливку №2 частицы не попадают, но в отливке №5 скапливается некоторое их количество. Результаты моделирования показывают, что значительное количество частиц должно попадать в отливки №3 и 4 и некоторое количество частиц может попадать в отливки №2 и 5. В отливки №1 и 6 частицы не попадают в литниковой системе Л1, что хорошо видно на рис. 6, 7. Анализ макроструктуры для литниковой системы Л2 показывает, что только в отливку №3 попадает некоторое количество шлаковых частиц (рис. 8, в). Численный расчет по модели, основанной на трехмерности поля скоростей, показывает, что только около 3% частиц может попасть в отливку №3 или 4.



а



б

Рис. 5. Фотографии экспериментальных литниковых систем: а – литниковая система Л1; б – литниковая система Л2

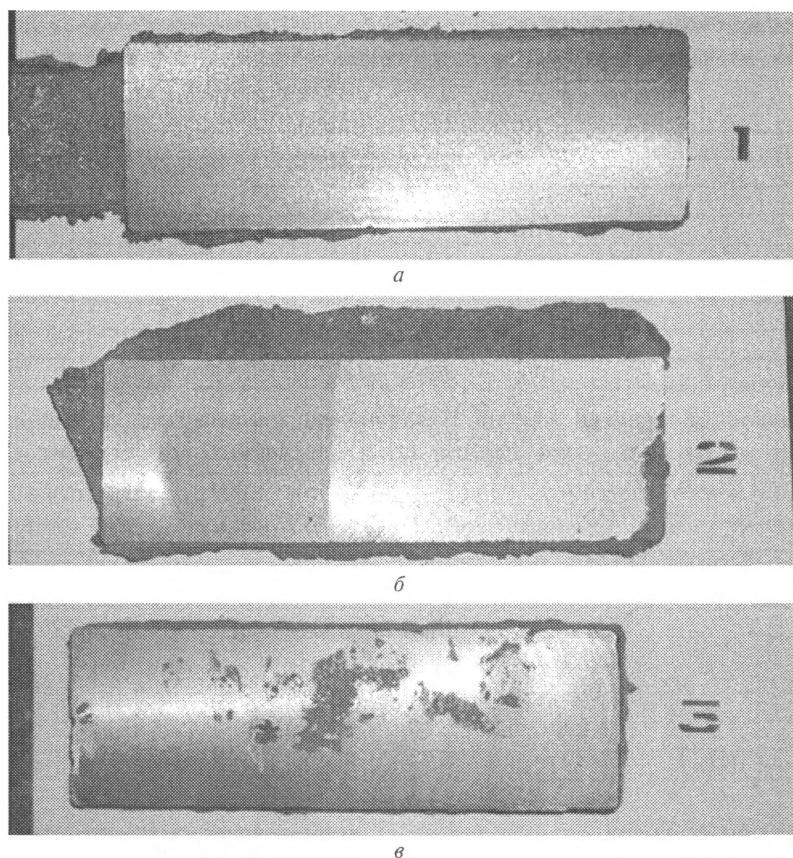


Рис. 6. Фотографии верхней поверхности отливок, полученных с помощью экспериментальной литниковой системы Л1: *а* — отливка №1; *б* — отливка №2; *в* — отливка №3

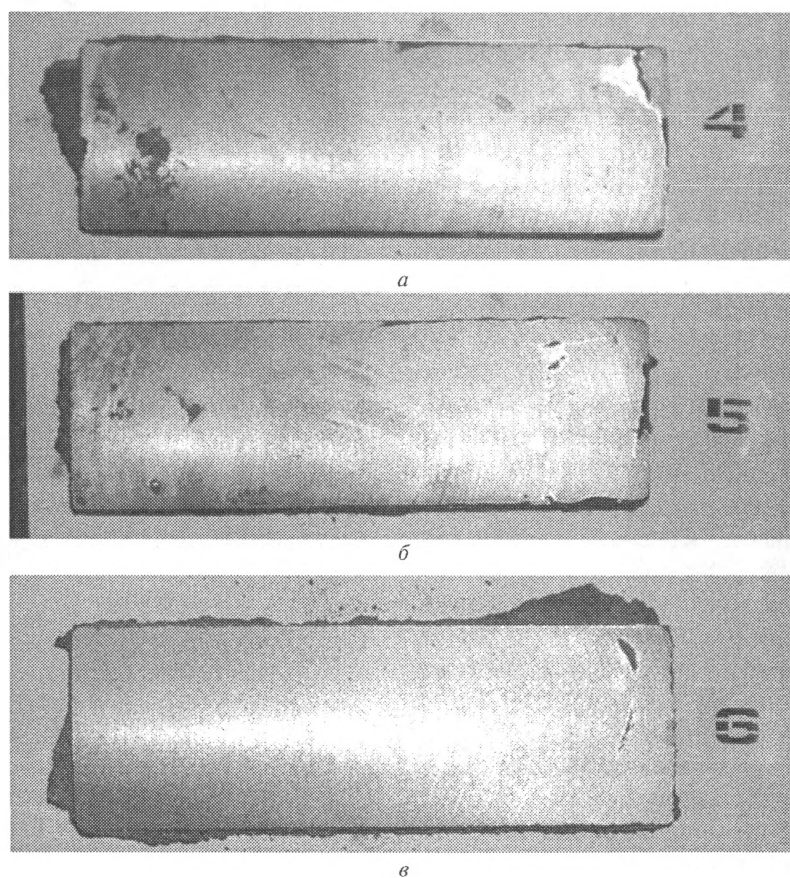


Рис. 7. Фотографии верхней поверхности отливок, полученных с помощью экспериментальной литниковой системы Л1: *а* — отливка №4; *б* — отливка №5; *в* — отливка №6

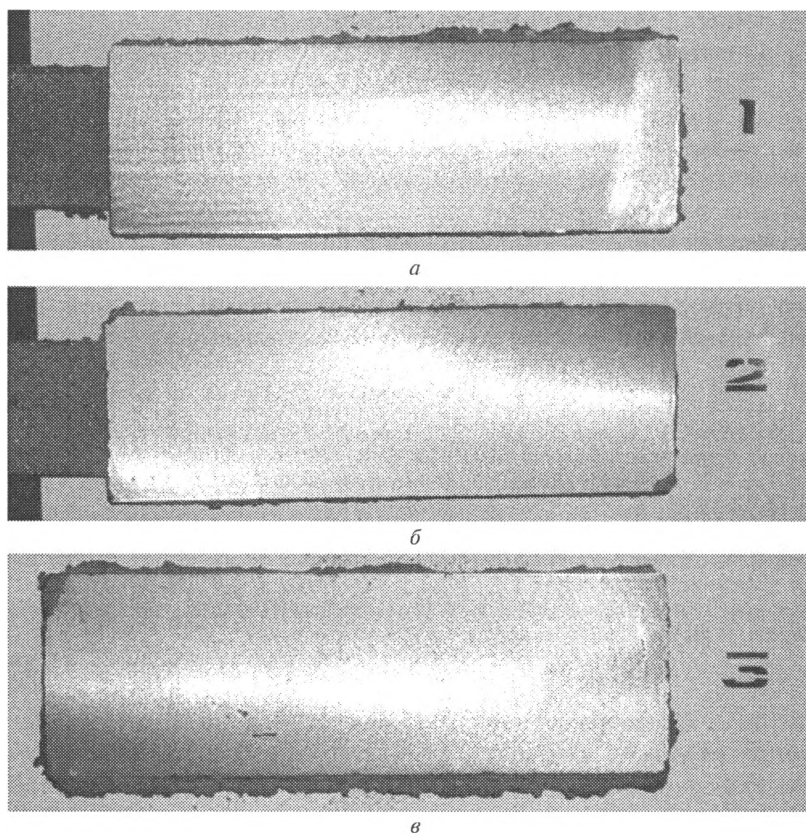


Рис. 8. Фотографии верхней поверхности отливок, полученных с помощью экспериментальной литниковой системы Л2: *а* – отливка №1; *б* – отливка №2; *в* – отливка №3

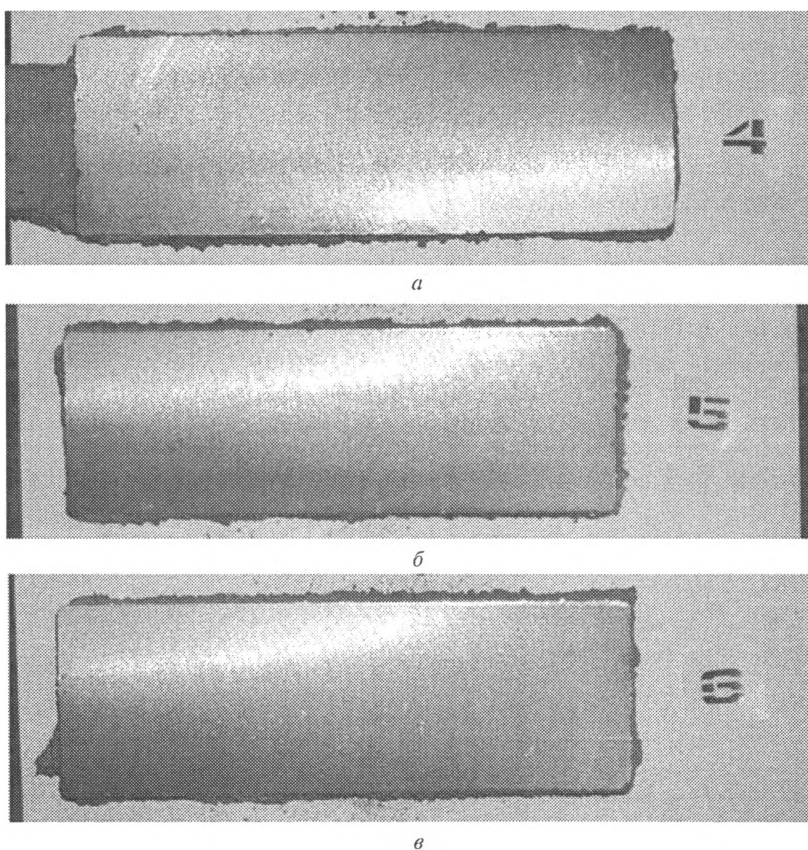


Рис. 9. Фотографии верхней поверхности отливок, полученных с помощью экспериментальной литниковой системы Л2: *а* – отливка №4; *б* – отливка №5; *в* – отливка №6

На основе представленных результатов можно сделать вывод об удовлетворительном согласовании расчетов, проведенных по математическим моделям, и экспериментально полученным отливкам №4 и 3 (рис. 8, в и 9, а).

Следует отметить, что модель движения частиц учитывает трехмерность литниковой системы и формы, а также динамику полей скоростей, что позволяет рассчитать траекторию частицы заданной плотности в любой точке литниковой системы. Данный полуколичественный метод, основанный на математической модели с распределенными параметрами, может быть использован для расчета движения неметаллических частиц в любой литниковой системе. Он отличается от известных тем, что учитывает траекторию движения ансамбля частиц по всей литниковой системе в целом, а не только в шлакоуловителе, что позволяет на начальном этапе разработки литейной технологии проводить экспертную оценку эффективности работы литниковой системы.

Литература

1. Чичко А.Н., Лихоузов С.Г., Лукашевич Ф.С. Компьютерная система «ПроЛит-1» для моделирования течения и охлаждения расплавов // Литье и металлургия. 2003. №4. С. 64–72.
2. Чичко А.Н., Соболев В.Ф., Лихоузов С.Г., Лукашевич Ф.С., Лукашевич С.Ф., Хацкевич В.А. Система автоматизированного моделирования «ПроЛит-1» и опыт ее использования на Минском заводе отопительного оборудования // Литье и металлургия. 2004. Спецвыпуск. С. 117–123.
3. Лукашевич Ф.С., Лихоузов С.Г., Чичко О.И. Компьютерные расчеты динамики улавливания шлака в литниковой системе на основе уравнений Навье–Стокса // Литье и металлургия. 2005. № 1. С. 66–69.
4. Чичко А.Н. Расчетное и экспериментальное исследование характеристик движущегося расплава / А.Н. Чичко, Ф.С. Лукашевич, С.Г. Лихоузов, О.И. Чичко // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44. № 3. С. 1–6.