

МАШИНОСТРОЕНИЕ

DOI: 10.53078/20778481_2023_3_6

УДК 624.74.01

А. М. БРАНОВИЦКИЙ, канд. техн. наук

Белорусско-Российский университет (Могилев, Беларусь)

ВОДНОЕ АНАЛОГОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЗАПОЛНЕНИЯ РАСПЛАВОМ МЕТАЛЛА ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ ПРИ ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Аннотация

В работе приведены результаты водного аналогового моделирования процесса заполнения литейной формы металлическим расплавом при литье под давлением. Разработана установка и программное обеспечение для моделирования процессов литья, которые позволяют воспроизвести трехмерную картину заполнения литейной формы и могут использоваться для верификации численных моделей заполнения литейной формы, а также для разработки и оптимизации технологических процессов литья и конструкции литниковой системы.

Ключевые слова:

водное аналоговое моделирование, литье под давлением, литейная форма, металлический расплав.

Для цитирования:

Брановицкий, А. М. Водное аналоговое моделирование процессов заполнения расплавом металла литейной формы при литье под давлением / А. М. Брановицкий // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2023. – № 3 (80). – С. 6–15.

Процесс заполнения литейной формы при литье под давлением является достаточно сложным, и для его исследования, наряду с численным математическим моделированием, широко используется водное аналоговое моделирование [1–7] с целью:

– верификации численных моделей и различных методов моделирования течения потока металлического расплава при заполнении литейной формы;

– конструирования литниковой системы и определения технологических параметров процесса литья, позволяющих избежать дефектов, вызванных некачественным заполнением литейной формы;

– оптимизации технологических и конструктивных параметров процесса литья.

Широкое применение водное ана-

логовое моделирование получило при проектировании процессов литья под давлением металлических сплавов, когда заполнение формы происходит со скоростью до 50 м/с.

Наряду с водным аналоговым моделированием, известны следующие способы регистрации процесса заполнения литейной формы:

– регистрация профиля расплава с использованием высокоскоростной рентгеноскопии (данный метод обладает такими недостатками, как ограниченность проникновения рентгеновских лучей в металле и высокая стоимость оборудования и обеспечения безопасности персонала) [7];

– размещение внутри литейной формы электрических контактов, при прохождении металла контакты замыкаются, регистрируя расположение рас-

плава (к недостаткам данного метода можно отнести зависимость точности регистрации от числа контактов и влияние электрических контактов на течение расплава) [8–10].

Метод водного аналогового моделирования успешно применяется для верификации численных моделей с использованием SPH-метода (smoothed particle hydrodynamics method – метод гидродинамики сглаженных частиц), который является эффективным бессеточным лагранжевым методом и в настоящее время широко применяется для моделирования потока жидкости с неизвестной свободной границей [1].

Установка для водного аналогового моделирования

Для водного аналогового моделирования процесса заполнения литейной

формы разработана установка [4–7] (рис. 1 и 2), основными компонентами которой являются:

- система создания необходимого давления жидкости с микропроцессорным блоком управления;
- прозрачная акриловая форма для моделирования;
- синхронизированные видеокамеры;
- система освещения;
- четыре системных компьютерных блока с установленными платами видеозахвата Data Translation 3120;
- ПК для управления установкой.

Для захвата и записи изображений с видеокамер использовались четыре персональных компьютера и платы видеозахвата Data Translation 3120, компьютеры управлялись по локальной сети посредством удаленного доступа.



Рис. 1. Установка для водного аналогового моделирования процессов литья под давлением



Рис. 2. Вид установки для водного аналогового моделирования процесса заполнения формы с четырьмя видеокамерами

Для регистрации изображений использовали четыре аналоговые цветные CCD-видеокамеры Samsung SCC 131A с возможностью внешней синхронизации от сети переменного тока (line-lock), со скоростью затвора $1/60 \dots 1/100000$ и объективами с переменным фокусным расстоянием $5 \dots 50$ мм. Режим синхронизации line-lock использовался для одновременного захвата изображений с видеокамер. Для одновременного старта захвата изображений использовали триггерное устройство, TTL-сигнал с которого подавался на триггерные входы плат видеозахвата. Для монтажа видеокамер использовали штативы.

Для задач проектирования процесса литья использовали точную копию литейной формы, изготовленную из прозрачного пластика акрила (рис. 3).

Для улучшения возможностей регистрации потока жидкости при моделировании воду окрашивали. Водное аналоговое моделирование позволяет обнаружить дефекты (полости), образующиеся в процессе заполнения формы, в случае малых внутренних деталей формы, когда в форме могут появиться области с давлением, препятствующим ее заполнению. При помощи аналогового моделирования можно найти технологические параметры процесса литья и конструктивные параметры литниковой системы, обеспечивающие качественное заполнение литейной формы.

Для определения масштабов процесса моделирования и параметров модельной формы используется идентичность трех критериев подобия: Рейнольдса (Re), Вебера (We) и Фруда (Fr) [11].

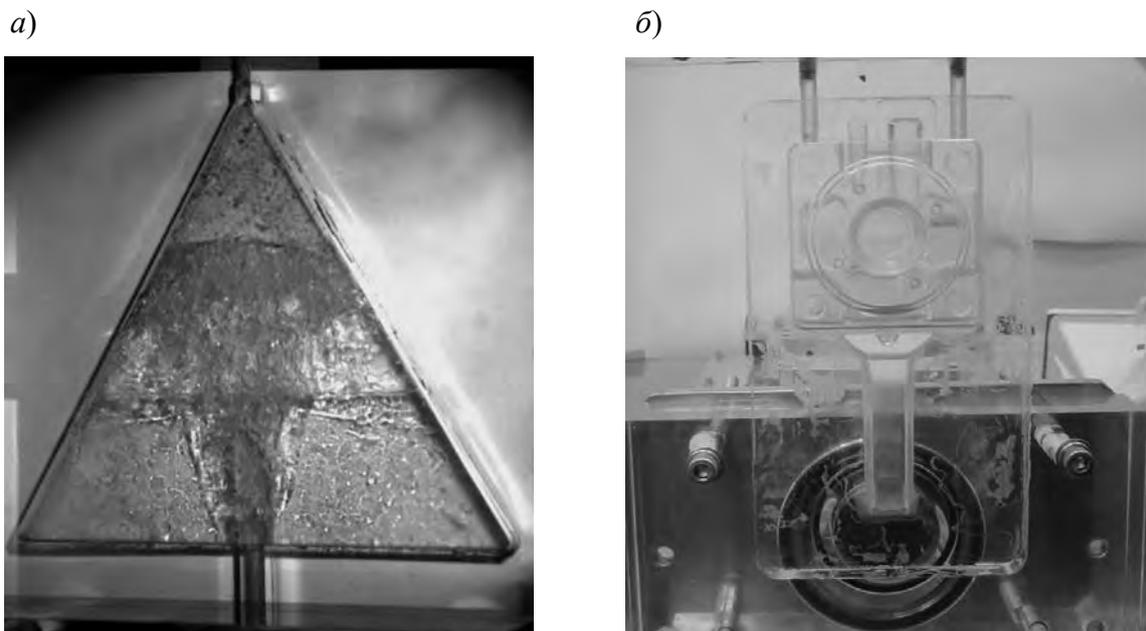


Рис. 3. Прозрачная акриловая модель литейной формы: а – треугольной формы; б – сложной формы

Критерий Рейнольдса обеспечивает подобие сил вязкости и инерции:

$$Re = \frac{wl}{\nu}, \quad (1)$$

где w – скорость движения жидкости; l – характерный размер; ν – кинематический коэффициент вязкости.

Критерий Вебера обеспечивает подобие сил тяжести и поверхностного натяжения[^]

$$We = \frac{\rho l^2}{\sigma}, \quad (2)$$

где ρ – плотность жидкости; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Критерий Фруда обеспечивает подобие сил тяжести и инерции:

$$Fr = \frac{\omega^2}{gl}. \quad (3)$$

С помощью критериев подобия определяются геометрические параметры модельной установки и параметры процесса заполнения формы.

Для моделирования использовали смесь воды и глицерина. Глицерин, обладающий высокой вязкостью, в смеси с водой позволяет получать широкий диапазон вязкостей [12]. Динамическая вязкость смеси чистого глицерина и дистиллированной воды варьируется от 0,01 до 14,1 Па·с при 20 °С (рис. 4).

Программное обеспечение для водного аналогового моделирования литейных процессов

Для получения трехмерной картины заполнения формы разработано программное обеспечение, осуществляющее регистрацию изображений, оцифровку литейной формы и калибровку камер.

Чертежи литейных форм выполнены в векторном формате AutoCAD, что не позволяет осуществлять визуализацию результатов моделирования. Для этой цели разработано программное обеспечение, осуществляющее конвертирование векторного формата файла Autocad в растровый формат (числовой 3D-массив), позволяющий определить

объемные границы заполнения формы жидкостью (рис. 5).

Для получения 3D-картины заполнения формы жидкостью с использова-

нием зарегистрированных двухмерных изображений проводилась пространственная калибровка видеокамер [13].



Рис. 4. Изменение динамической вязкости водного раствора глицерина в зависимости от концентрации

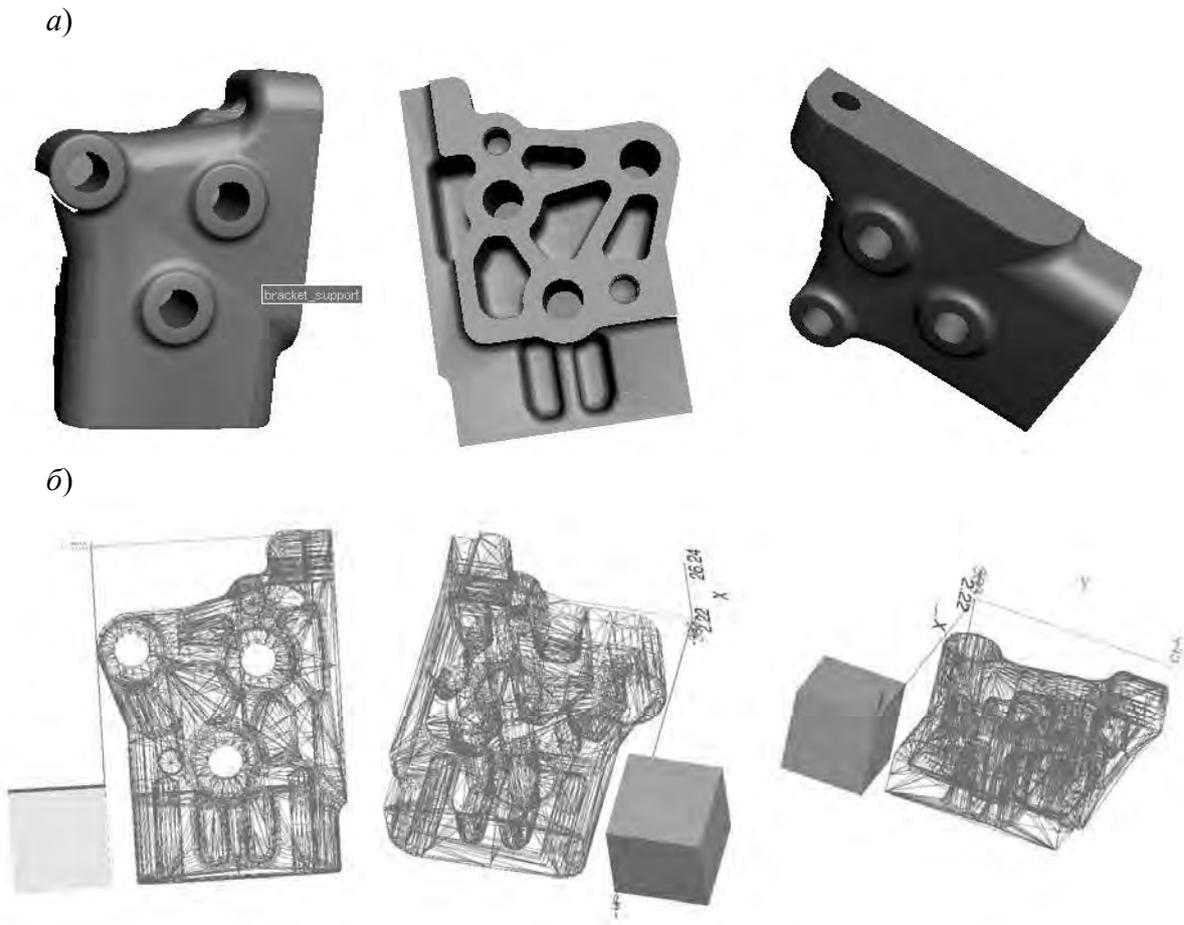


Рис. 5. Конвертирование файла чертежа (а) в числовой массив модельной формы (б)

Данная процедура позволяет связать трехмерные координаты модельной формы с координатами каждой видеокамеры, учитывая параметры видеокамер. В результате калибровки двумерные изображения, полученные с каждой из видеокамер, использовались для формирования трехмерной картины заполнения.

Визуализация данных осуществлялась при помощи программного обеспечения для обработки и визуализации данных (IDL, Matlab). 3D-картину заполнения формы получали как результат расчета положения соответствующих пикселей каждого из четырех изображений, что позволяет получать картину заполнения и поверхность потока жидкости в каждом из сечений формы.

Экспериментальные исследования процесса заполнения литейных форм

С помощью разработанных установок и программного обеспечения для водного аналогового моделирования исследовали процесс заполнения для случая простых (треугольной и прямоугольной) и сложных форм. В качестве модельной жидкости использовали окрашенную воду.

Моделирование процесса заполнения треугольной формы выполняли посредством трех видеокамер. На рис. 6 представлены три исходных изображения, разделенных на полукадры, и трехмерное изображение, полученное с их использованием. Пример заполнения прямоугольной формы шириной 60 мм и высотой 100 мм представлен на рис. 7.

Исследовали процесс заполнения сложной литейной формы на примере промышленных деталей типа «крышка стержня» и «тормозной суппорт». Пример водного аналогового моделирования таких деталей при времени заполнения около 0,5 с приведен на рис. 8. Проведено сравнение численного моделирования с использованием программы AD-STEFAN и водного аналогового моделирования процесса заполнения литейной формы при литье под давлением (рис. 9). При численном моделировании в программу закладывались параметры, соответствующие воде. Эксперименты по водному аналогового моделированию процесса заполнения формы показали удовлетворительное совпадение с результатами численного моделирования в программном обеспечении AD-STEFAN.

а)

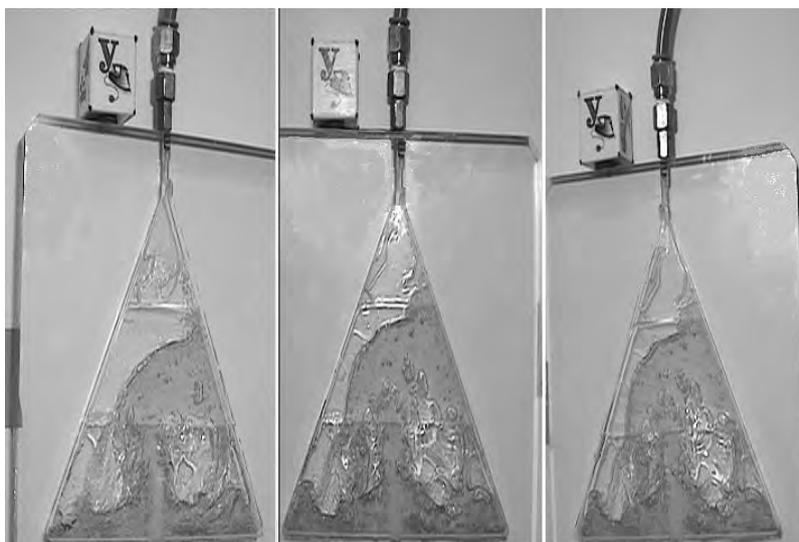
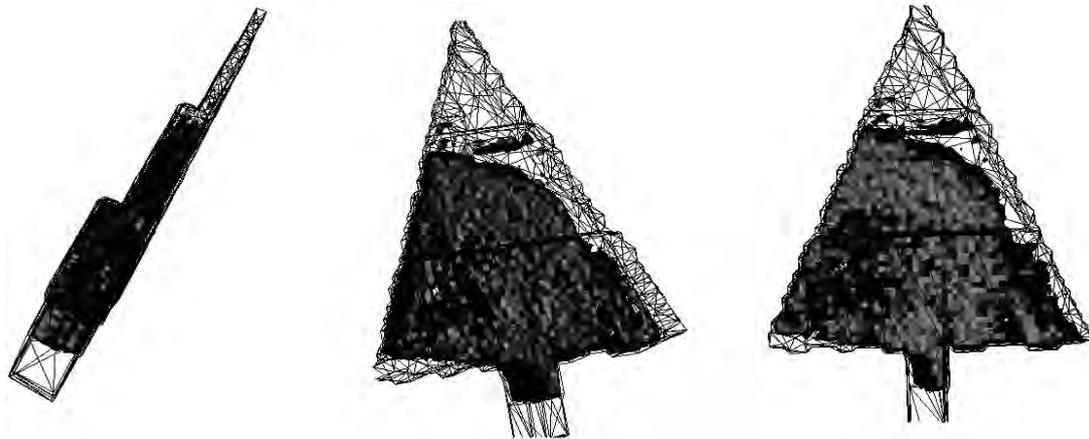


Рис. 6. Процесс заполнения треугольной формы (скорость заполнения – 2000 мм/мин): а – исходные двумерные изображения; б – трехмерные восстановленные

б)



Окончание рис. 6

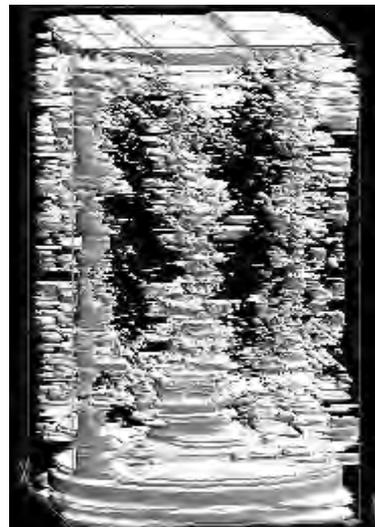
а)



б)



в)



з)



д)



Рис. 7. Процесс заполнения прямоугольной формы (время заполнения – 0,116 с): а, б – исходные изображения; в – трехмерное изображение; з, д – сечения XY и X

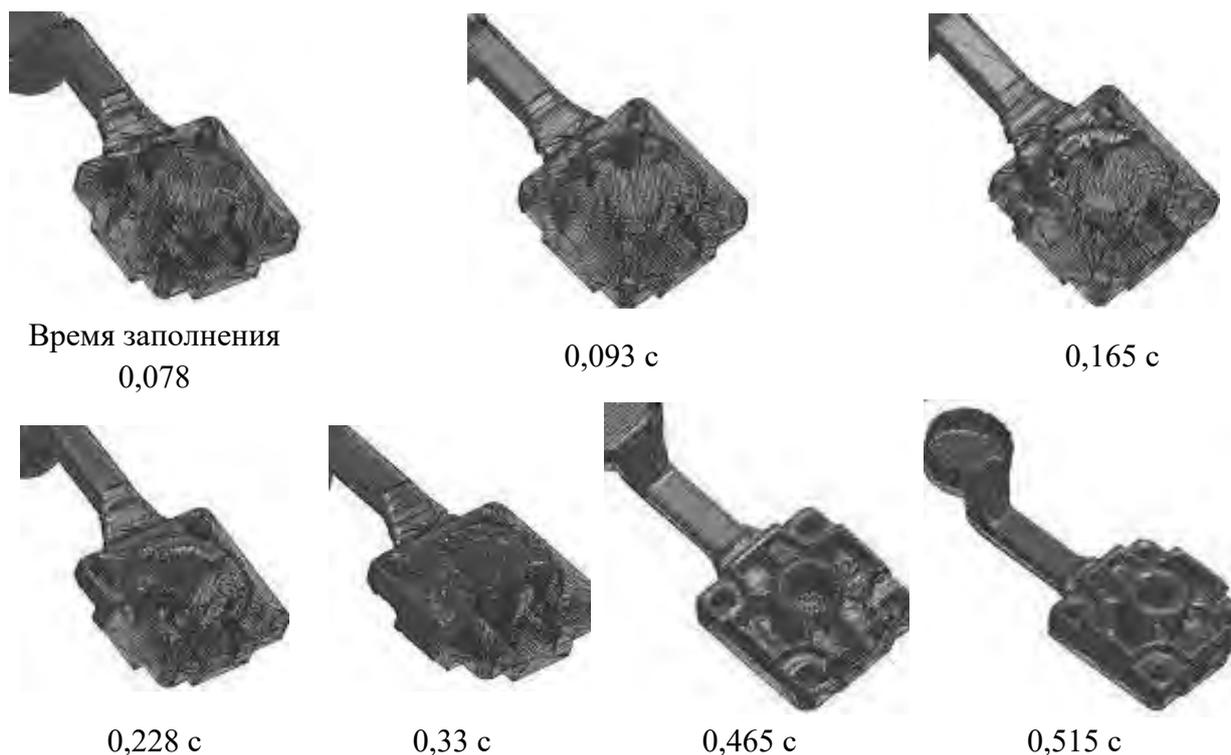


Рис. 8. Водное аналоговое моделирование процесса заполнения сложной литейной формы

Выводы

Разработана установка для водного аналогового моделирования процесса заполнения литейной формы. Основными компонентами установки являются: система создания давления жидкости с микропроцессорным блоком управления; прозрачная акриловая форма для моделирования; система освещения; несколько синхронизированных видеокамер, которые подключаются к компьютеру. Установка позволяет моделировать заполнение литейной формы в процессе литья под давлением и может быть использована при разработке технологических процессов литья под давлением и верификации математических моделей течения металлического расплава при заполнении литейной формы.

Разработано программное обеспечение для водного аналогового моделирования заполнения литейной формы при

литье под давлением, которое позволяет воспроизводить 3D-картину заполнения.

Проведено сравнение водных аналоговых экспериментов по заполнению литейной формы с результатами численного моделирования, произведенного в программе для численного моделирования AD-STEFAN, показавшее удовлетворительное совпадение результатов численного моделирования с результатами экспериментальных исследований.

Таким образом, водное аналоговое моделирование может эффективно использоваться для верификации численных моделей заполнения литейной формы, а также при проектировании оснастки и технологических режимов для процессов литья под давлением, что способствует существенной экономии материальных средств и временных затрат вследствие сокращения количества дорогостоящих натуральных экспериментов.

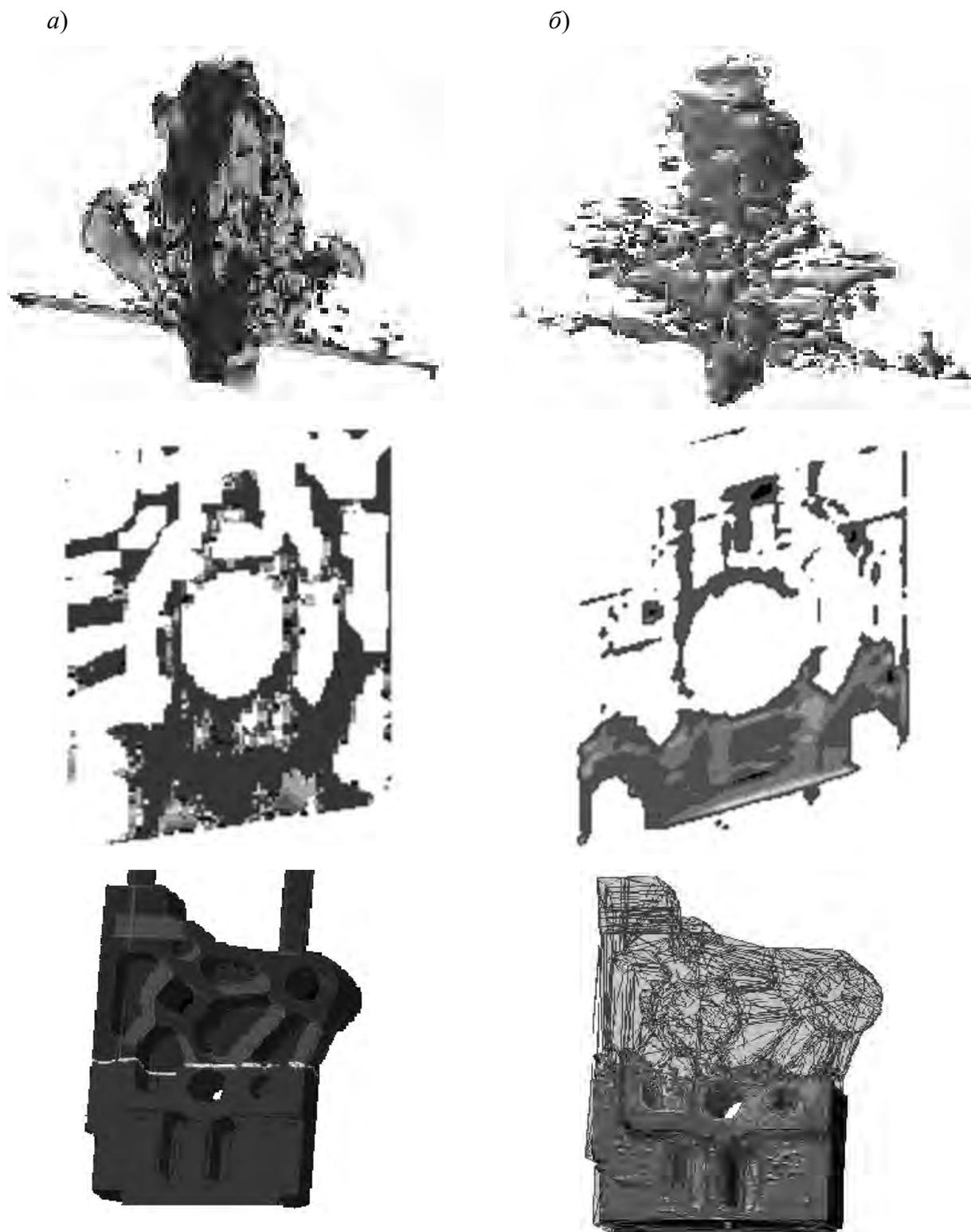


Рис. 9. Сравнение результатов экспериментов по водному аналоговому моделированию с результатами численного моделирования (программа AD-STEFAN): *a* – численное моделирование; *б* – водное аналоговое моделирование

Водное аналоговое моделирование заполнения литейной формы расплавом металла является достаточно точным,

когда изменение температуры расплава металла в литниковой в процессе литья вызывает малое изменение его вязкости.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Flow analysis and validation of numerical modelling for a thin walled high pressure die casting using SPH / P. W. Cleary [et al.] // *Comp. Part. Mech.* – 2014. – P. 229–243.
2. Numerical simulation and experimental validation of free surface flows during low pressure casting process / A. Viswanatha [et al.] // *Journal of Materials Processing Technology.* – 2017. – № 244. – P. 320–330.
3. Novel Approach to Visualize Liquid Aluminum Flow to Advance Casting Science / C. Bate [et al.] // *Materials.* – 2023. – № 16. – P. 756.
4. Three-dimensional image reconstruction for water modelling of metal casting processes / J.-K. Choi [et al.] // *International Conference On Modelling and Simulation MS'2004, Minsk, 27–29 April 2004.* – Minsk, 2004. – P. 216–219.
5. Three-dimensional modelling and simulation of die-casting processes for AlSi alloys / H.-Y. Hwang [et al.] // *Proceedings of 67th World Foundry Congress 5–7 June 2006, Harrogate International Centre, United Kingdom.* – Harrogate, 2006. – P. 203/1–203/9. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
6. Гидромоделирование процессов литья / Е. И. Марукович [и др.] // *Литье и металлургия.* – 2010. – № 3. – С. 36–42.
7. Гидромоделирование процессов литья / Е. И. Марукович [и др.] // *Литейное производство.* – 2011. – № 2. – С. 10–14.
8. Экспериментальная верификация результатов моделирования течения расплавов, полученных с помощью компьютерной системы «Пролит-1» / В. Ф. Соболев [и др.] // *Литье и металлургия.* – 2003. – № 3. – С. 5–8.
9. **Duff, E. S.** Fluid Flow Aspects of Solidification Modelling: Simulation of low pressure die casting: PhD thesis, Department of Mining and Metallurgical Engineering / E. S. Duff. – The University of Queensland. – 1999. – P. 217.
10. **Jong, S. H.** Three dimensional mold filling simulation for casting and its experimental verification / S. H. Jong, W. S. Hwang // *AFS Transactions.* – 1991. – Vol. 99. – P. 117–124.
11. **Демченко, Е. Б.** Исследование гидродинамики расплава в кристаллизаторе при вертикальном непрерывном литье / Е. Б. Демченко, Е. И. Марукович // *Литье и металлургия.* – 2006. – № 4. – С. 77–81.
12. **Schmid, M.** Fluid Flow in Die Cavities Experimental and Numerical Simulation / M. Schmid, F. Klein // *Transactions, 18th NADCA International Die Casting Congress and Exposition.* – Indianapolis, 1995. – P. 93–99.
13. The technique of calibration multi camera imaging system for fast water flow registration and reconstruction / J.-K. Choi [et al.] // *Proceedings of the Eight International Conference Pattern recognition and information processing, Minsk, 18–20 May 2005.* – Minsk, 2005. – P. 177–180.

Статья сдана в редакцию 28 июня 2023 года

Контакты:

inmet@mail.ru (Брановицкий Александр Михайлович).

A. M. BRANOVITSKY

WATER ANALOGUE MODELING OF PROCESSES OF FILLING A CASTING MOLD WITH METAL MELT DURING DIE CASTING

Abstract

The paper presents results of water analogue modeling of the process of filling a casting mold with metal melt during die casting. A plant and software for modeling casting processes have been developed, which reproduce a three-dimensional pattern of mold filling and can be used to verify numerical models of mold filling, as well as make it possible to develop and optimize casting processes and the gating system design.

Keywords:

water analogue modeling, die casting, casting mold, metal melt.

For citation:

Branovitsky, A. M. Water analogue modeling of processes of filling a casting mold with metal melt during die casting / A. M. Branovitsky // *Belarusian-Russian University Bulletin.* – 2023. – № 3 (80). – P. 6–15.