

УДК 539.3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ЗАЛИВКИ СТАЛИ ДЛЯ РАЦИОНАЛИЗАЦИИ СУЩЕСТВУЮЩЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РЕЖИМА

**Максимов П.В.**

*ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29), tender1980@mail.ru*

В работе проводится численное моделирование процессов заливки и кристаллизации стали в превенторе с целью подбора оптимальных параметров технологических режимов, применяемых на промышленном предприятии. Создана компьютерная конечно-элементная модель превентора. Приведено описание подходов к решению связанных задач, возникающих при моделировании процессов заливки и кристаллизации стали. Задача решается в нелинейной постановке. Определено местоположение и размеры зоны наиболее вероятного возникновения пористости, показано хорошее совпадение результатов численного моделирования с картиной пористости в реальном изделии. Определена зависимость пористости в указанной зоне от скорости заливки. Найдена оптимальная скорость заливки, соответствующая наименьшей пористости изделия. Предлагается использовать разработанную компьютерную модель для проведения численных экспериментов, рационализации широкого спектра технологических режимов производства и обработки изделий.

Ключевые слова: моделирование, оптимизация, разливка стали, кристаллизация, метод конечных элементов.

## DETERMINATION OF THE OPTIMAL SPEED CASTING OF STEEL FOR RATIONALIZATION THE EXISTING TECHNOLOGICAL REGIME

**Maksimov P.V.**

*Perm national research polytechnic university, Perm, Russia (614990, Russia, Perm, Komsomolsky Av., 29), tender1980@mail.ru*

The paper deals with the numerical simulation of filling and solidification of steel preventer in order to select the optimal parameters of technological regimes. The computer model of the preventer is created. The description of approaches to solving related problems arising in the mold filling and solidification is described. The problem is solved in a nonlinear formulation. The location and size of the zone most likely occurrence of porosity are determined, the coincidence of the results of numerical simulations with a picture of porosity in the actual product are shown. The dependence between the porosity in the specified area and the fill rate is obtained. The optimal rate of filling to the lower porosity is calculated. It is proposed to use a designed computer model to streamline a wide range of technological modes of production and processing of products.

Keywords: modeling, optimization, casting of steel, crystallization, finite elements method.

Процесс разлива металла оказывает большое влияние на качество получаемого изделия [1]. Именно поэтому, а также потому, что процент брака выплавляемых изделий существенен и может достигать пятой части всех изделий, процесс разлива необходимо правильно организовывать и контролировать, дабы нивелировать возникающие дефекты.

В данной работе проводится численное моделирование процессов заливки и кристаллизации стали в превенторе с целью подбора оптимальных параметров для рационализации существующих на предприятии технологических режимов производства и обработки изделий. Превентор – это рабочий элемент комплекта противовыбросового оборудования, устанавливаемый на устье нефте- и газодобывающей скважины, сразу под "полем" буровой вышки [5]. Чаще всего этот компонент не виден из-за нагромождений буровой вышки, но, пожалуй, это один из самых важных компонентов на вышке, т.к. именно

он сохранит от пожара не только буровую вышку, но и жизни людей, находящихся на объекте.

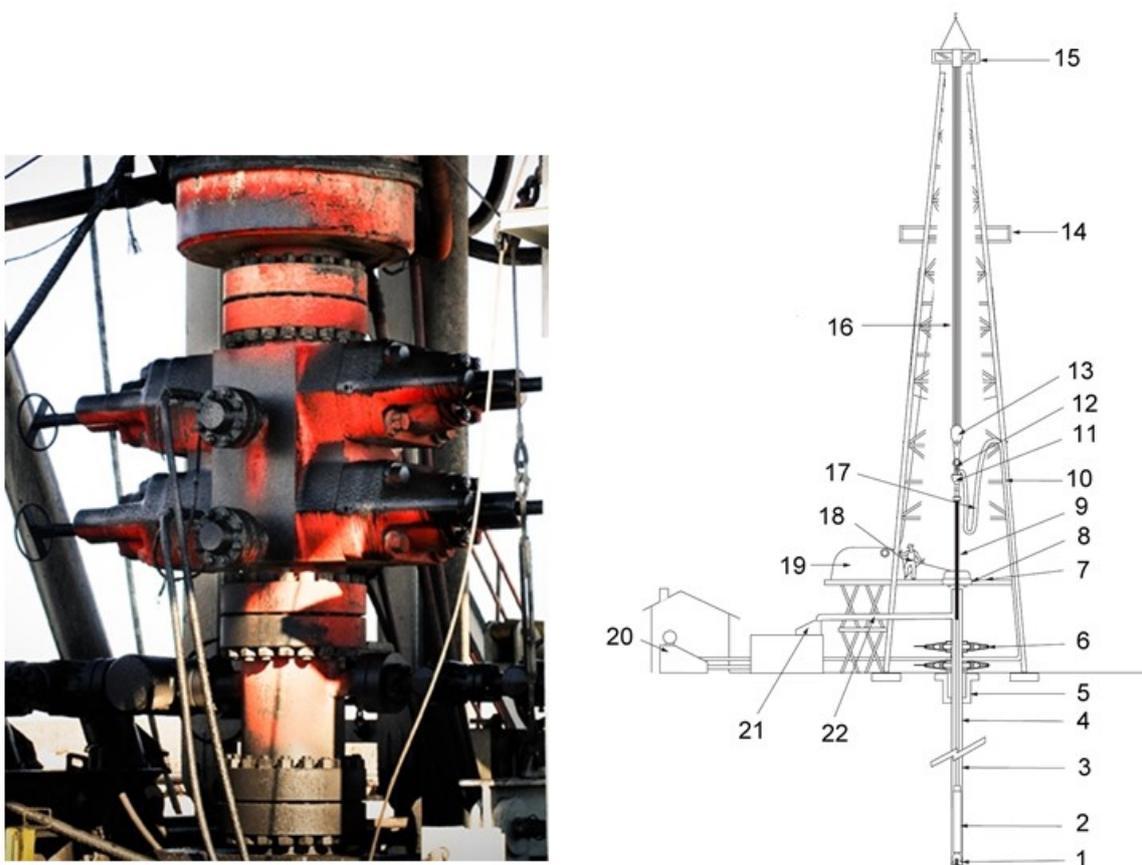


Рис. 1. Глухой превентор

1 — буровое долото; 2 — УБТ; 3 — бурильные трубы; 4 — кондуктор; 5 — устьевая шахта; 6 — превенторы; 7 — пол буровой установки; 8 — буровой ротор; 9 — ведущая бурильная труба; 10 — буровой стояк; 11 — вертлюг; 12 — крюк; 13 — талевый блок; 14 — балкон верхового рабочего; 15 — кронблок; 16 — талевый канат; 17 — шланг ведущей бурильной трубы; 18 — индикатор нагрузки на долото; 19 — буровая лебёдка; 20 — буровой насос; 21 — вибрационное сито для бурового раствора; 22 — выкидная линия бурового раствора

### **Создание модели исследуемого процесса**

Математическая модель рассматриваемых процессов представлена в работе [2].

В работе применяются методы математического моделирования, позволяющие исследовать поставленную проблему в процессе проведения серии вычислительных экспериментов [1-4].

Для численного анализа процесса заливки и кристаллизации стали создана компьютерная модель превентора. Геометрическая 3D-модель разрабатывалась в CAD/CAE-системах, после чего выполнялось импортирование в программный пакет ProCAST 2010.0, где и осуществлялась последующее моделирование технологических режимов. Создание

конечно-элементной сетки, на основе которой строилась объемная сетка в ProCAST, выполнялось в пакете ANSYS. Созданная расчетная сетка продемонстрирована на рисунке 2.

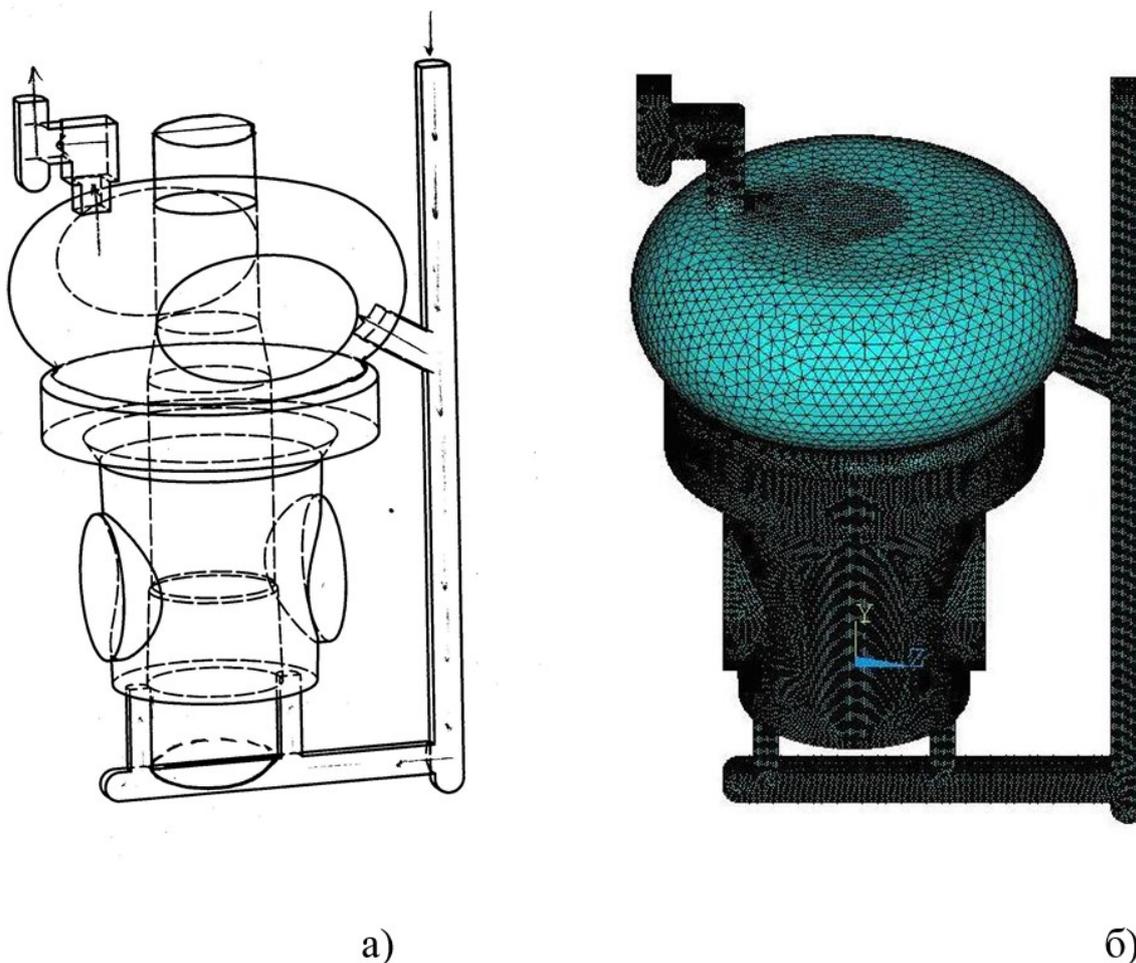


Рис. 2. Расчетная модель объекта

а) схема превентора (стрелками указано направление движение металла)

б) конечно-элементная сетка на отливке превентора

Для расчетов была построена модель формы, в которую заливается сталь. Также моделировалась литниковая система с входящими в нее питателями. Был выполнен целый спектр расчетов, при этом применялись различные подходы к решению связанных задач.

Так, например, в одном из подходов решались две подзадачи – гидродинамическая и тепловая. В первой подзадаче производилась заливка расплавленной стали в форму; решались уравнения движения жидкости, теплопроводности и неразрывности. Далее результаты, полученные в ходе решения гидродинамической задачи, (например, температурное поле) подставлялись в тепловую задачу в качестве ее начальных условий. Во второй подзадаче – тепловой, рассматривался процесс кристаллизации расплава.

При втором подходе, и гидродинамическая и тепловая задачи решались одновременно как одно целое с соответствующим формированием определяющих уравнений.

Следует сделать акцент на том, что такие свойства материала, как, например, теплопроводность и плотность, принимаются нелинейными, что делает решаемую задачу физически правдоподобной, однако приводит к необходимости организации итерационного процесса нахождения численного решения.

### **Анализ результатов**

Проведен тепловой расчет процесса кристаллизации стали марки 30ХМЛ, материал формы – специальная песко-смоляная смесь alfaset. Заливка проводилась со скоростью 35 м/с. Температура песчано-смоляной формы – 20°C, стали – 1575°C. По результатам численного эксперимента определена зона наиболее вероятного возникновения пористости (рисунок 3).

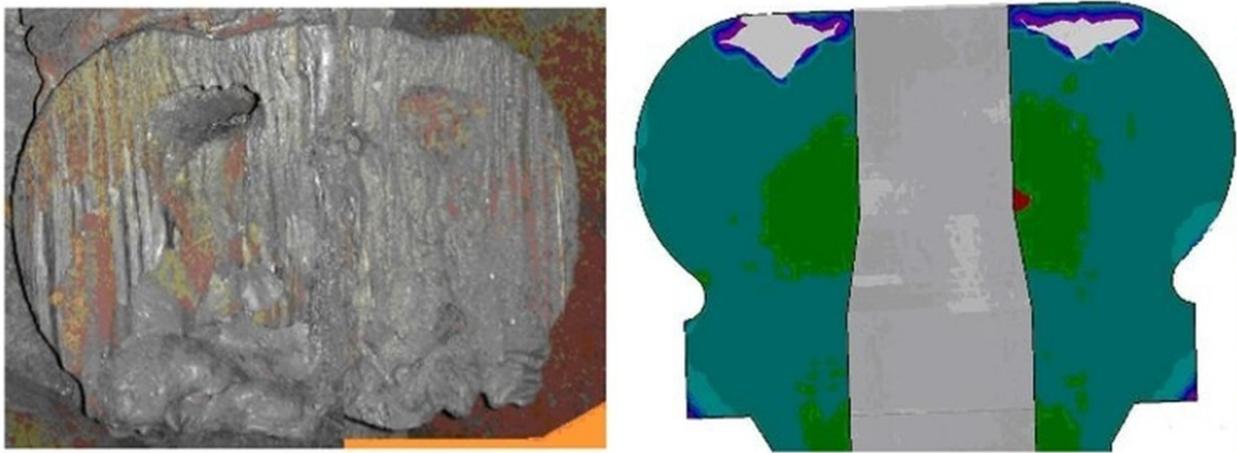


Рис. 3. Сравнение картин пористости в изделии и его модели

В результате моделирования определено, что пористость не превышает максимально допустимого значения 3% (красная зона), а ее среднее значение (зеленая зона) не превышает значения 1,9%.

Для области наиболее вероятного возникновения пористости представлен график зависимости пористости в указанной зоне от скорости заливки (рисунок 4):

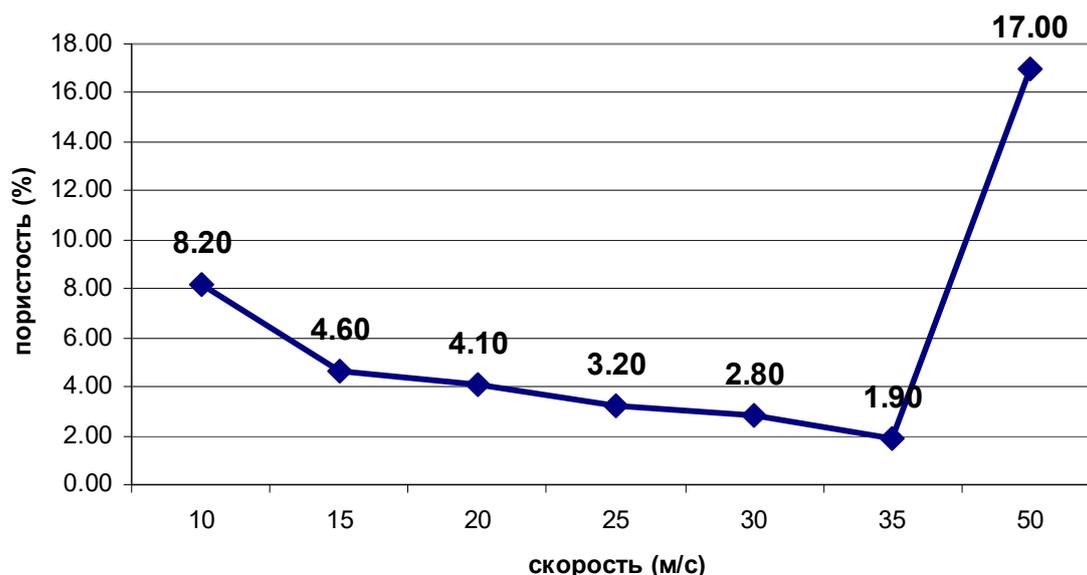


Рис. 4. График зависимости пористости от скорости заливки

В ходе исследований определено, что оптимальной является скорость заливки 35 м/с. Кроме того, в пределы допустимой пористости также попадает скорость 30 м/с, а скорость 25 м/с только немного выходит за данные пределы. Другие величины скорости не представляется возможным использовать ни при реальной разливке, ни при численном моделировании, так как значения пористости при этих скоростях сильно превышают допустимые.

Интересен тот факт, что определенная в результате численного моделирования оптимальная скорость заливки совпадает со скоростью, установленной на сталелитейном предприятии эмпирическим путем на основе натуральных экспериментов, что подтверждает корректность и адекватность разработанной компьютерной модели процесса разливки и кристаллизации стали.

### Заключение

В ходе поиска оптимальной скорости заливки расплавленного сплава в форму были рассмотрены различные значения от 5 до 50 м/с. В результате оказалось, что численный эксперимент подтвердил результаты натурального. Оптимальной скоростью заливки является скорость 35 м/с. Совпали также и области проявления пористости. Все это позволяет сделать вывод о том, что результаты численного эксперимента для данной модели правильны, а сама компьютерная модель может быть принята к использованию на предприятии.

Подтвердившая свою адекватность, разработанная численная конечно-элементная модель может применяться и для рационализации иных внедренных на предприятии технологических режимов производства и обработки изделий.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0068 от 23.05.2013 г. в составе мероприятия по реализации постановления Правительства РФ № 218).*

### Список литературы

1. Бройтман О.А., Монастырский А.В., Иванов И.А., Мальгинов А.Н., Макарычева Е.В., Сараев Д.Ю. Компьютерное моделирование процессов формирования крупных стальных кузнечных слитков // Литейщик России. 2011. № 10. С. 7–15.
2. Гилева Э.А., Соколова О.О., Труфанов Н.А. Численное исследование процесса кристаллизации заготовки превентора // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 5.
3. Соколова О.О., Сметанников О.Ю. Численное моделирование затвердевания и структуры металлического слитка // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2012. – № 1. – С. 152-167.
4. Цаплин А.И. Теплофизика внешних воздействий при кристаллизации стальных слитков на машинах непрерывного литья. – Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1995. – 238 с.
5. Kermanpur A., Eskandari M., Purmohamad H., Soltani M.A., Shateri R. Influence of mould design on the solidification of heavy forging ingots of low alloy steels by numerical simulation. // Materials and Design, 31, pp. 1096-1104, 2010.

### Рецензенты:

Шевелев Н.А., д.т.н., профессор кафедры «Динамика и прочность машин» ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь;  
Столбов В.Ю., д.т.н., профессор кафедры «Математическое моделирование систем и процессов» ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.