

УДК: 669.16.22:621.793

Моделирование температурного поля воздушных фурм доменных печей

А. Г. Радюк^а, А. Е. Титлянов, М. М. Скрипаленко

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4

E-mail: ^а radjuk@rambler.ru

Получено 01.11.2016, после доработки — 21.12.2016.

Принято к публикации 30.12.2016.

Проведено компьютерное моделирование динамики нагрева воздушной фурмы доменной печи с помощью вычислительной среды конечно-элементного анализа DEFORM-2D. Исследовано влияние теплоизолирующей вставки, установленной в дутьевой канал с воздушным зазором и без зазора, а также газотермического покрытия на температурное поле воздушной фурмы доменной печи. Результаты моделирования показали значительное влияние теплоизолирующей вставки в дутьевой канал и воздушного зазора, отделяющего ее от внутреннего стакана, на температурное поле фурмы. При наличии вставки наблюдается градиент температуры по ее толщине до 540–555 °С, причем максимального значения температура вставки достигает на поверхности со стороны дутьевого канала. В то же время температура внутреннего стакана снижается на 35–40 °С по сравнению с фурмой без вставки. При наличии вставки с воздушным зазором градиент температуры вставки по ее толщине снижается до 160–250 °С по сравнению с вариантом без воздушного зазора, причем максимальное значение температуры поверхности вставки со стороны дутьевого канала также увеличивается. Температура внутреннего стакана также снижается еще на 15–20 °С по сравнению с вариантом без воздушного зазора. Однако наблюдается резкий градиент температуры воздушного зазора по его толщине до 760 °С из-за низкой теплопроводности воздуха. При наличии газотермического покрытия максимальная температура нагрева торца рывальной части снизилась до 326 °С, а максимальный градиент температуры по его толщине также снизился до 67 °С по сравнению с вариантом без покрытия. С помощью программного комплекса DEFORM-2D создана модель, имитирующая прогар фурмы вследствие контакта с жидким чугуном. Показано, что через 40 с контакта с чугуном температура на поверхности рывальной части со стороны воды достигает 1050 °С, а через 100 с — 1060 °С, что практически равносильно прогару.

Ключевые слова: доменная печь, воздушная фурма, теплоизолирующая вставка, газотермическое покрытие, DEFORM-2D, температурное поле, прогар фурмы

UDC: 669.16.22:621.793

Computer simulation of temperature field of blast furnace's air tuyere

A. G. Radjuk^a, A. E. Titlianov, M. M. Skripalenko

National University of Science and Technology "MISIS",
4 Leninskiy pr., Moscow, 119049, Russia

E-mail: ^a radjuk@rambler.ru

Received 01.11.2016, after completion — 21.12.2016.

Accepted for publication 30.12.2016.

Study of work of heating equipment is an actual issue because it allows determining optimal regimes to reach highest efficiency. At that it is very helpful to use computer simulation to predict how different heating modes influence the effectiveness of the heating process and wear of heating equipment. Computer simulation provides results whose accuracy is proven by many studies and requires costs and time less than real experiments. In terms of present research, computer simulation of heating of air tuyere of blast furnace was realized with the help of FEM software. Background studies revealed possibility to simulate it as a flat, axisymmetric problem and DEFORM-2D software was used for simulation. Geometry, necessary for simulation, was designed with the help of SolidWorks, saved in .dxf format. Then it was exported to DEFORM-2D pre-processor and positioned. Preliminary and boundary conditions were set up. Several modes of operating regimes were under analysis. In order to demonstrate influence of each of the modes and for better visualization point tracking option of the DEFORM-2D post-processor was applied. Influence of thermal insulation box plugged into blow channel, with and without air gap, and thermal coating on air tuyere's temperature field was investigated. Simulation data demonstrated significant effect of thermal insulation box on air tuyere's temperature field. Designed model allowed to simulate tuyere's burnout as a result of interaction with liquid iron. Conducted researches have demonstrated DEFORM-2D effectiveness while using it for simulation of heat transfer and heating processes. DEFORM-2D is about to be used in further studies dedicated to more complex process connected with temperature field of blast furnace's air tuyere.

Keywords: blast furnace, air tuyere, thermal insulation box, thermal coating, DEFORM-2D, temperature field, burnout of tuyere

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 117–125 (Russian).

1. Введение

При исследовании процессов, связанных с металлургическим производством, широко применяются вычислительные среды конечно-элементного анализа. Перечень решаемых с их помощью задач довольно широк. Это могут быть исследования процессов литья [Fadeev, Bazhenov, Koltugin, 2015], обработки давлением [Li et al., 2009], термообработки [Kharitonov, Stolyarov, 2013] и др. Представляет интерес исследование процессов, связанных с выплавкой чугуна с применением конечно-элементного моделирования.

Воздушные фурмы являются одним из важнейших элементов конструкции доменной печи, определяющих эффективность ее работы; выход фурм из строя влечет за собой необходимость остановки печи для замены разрушенной фурмы. Простои печи по этой причине приводят к существенному снижению выплавки чугуна и увеличению расхода кокса. Кроме того, на воздушные фурмы приходится 30 % всех тепловых потерь в печи. Поэтому проблема повышения стойкости воздушных фурм и снижения тепловых потерь через их поверхность является актуальной.

В настоящее время данная проблема решается различными путями: нанесением газотермических покрытий на рабочую поверхность фурмы [Пат. № 2215043 РФ, 2002; Пат. 2387716 РФ, 2010; Пат. 2465333 РФ, 2012], футеровкой огнеупорами со стороны дутьевого канала [А. с. № 159870 СССР, 1964] и др. Для дальнейшего повышения стойкости воздушных фурм и снижения тепловых потерь через их поверхность целесообразно моделирование их теплового состояния.

Цель работы: используя вычислительную среду конечно-элементного анализа, исследовать динамику нагрева воздушной фурмы, влияние теплоизолирующей вставки и газотермического покрытия на температурное поле фурмы, а также тепловое состояние фурмы при ее взаимодействии с жидким чугуном.

2. Методика исследований

Известна методика расчета тепловых потерь через воздушную фурму [Пат. № 2235789 РФ, 2004]. В работе использовали формулы стационарной теплопроводности для плоской и цилиндрической стенки [Кутателадзе, Борищанский, 1959]. Методика позволяет рассчитать тепловой поток через поверхность фурмы и распределение температуры ее составляющих в установившемся состоянии.

Задача расчета динамики нагрева воздушной фурмы может быть сведена к решению соответствующей осесимметричной задачи. Для ее решения использовали программу DEFORM-2D.

Исходными данными для создания модели являлась воздушная фурма конструкции ПАО «Северсталь» для ДП-5. Толщина внутреннего стакана $h_{вн} = 6$ мм, наружного стакана $h_{н} = 15$ мм, торца рыльной части $h_{рт} = 30$ мм, средняя толщина боковой поверхности рыльной части и со стороны дутьевого канала $h_p = 18$ мм (рис. 1).

Геометрия фурмы была выполнена в среде Solid Works и сохранена в формате .dxf. После этого файлы с указанным расширением загружали в Pre-Processor DEFORM-2D и позиционировали их. На фурме формировали сетку из 5000 элементов. При моделировании температурного поля деталей фурмы были заданы следующие условия: материал — медь, $\lambda = 416$ Вт/(м · К), $C = 390$ Дж/(кг · К), $\varepsilon = 0.7$, $t_{дутья} = 1200$ °С, $\alpha_{дутье-медь} = 375$ Вт/(м² · К) [Расчет коэффициентов..., 2012], начальная температура 30 °С. Граничные условия: окружающая среда — поверхность со стороны дутьевого канала, включая ступеньку; дополнительно: 1 — водоохлаждаемая полость, $t_{воды} = 30$ °С, $\alpha_{медь-вода} = 5815$ Вт/(м² · К), $\varepsilon = 0$; 2 — торец и боковая поверхность рыльной части, $t = 1600$ °С, $\alpha_{среда-рыло} = 268$ Вт/(м² · К), $\varepsilon = 0.7$; 3 — наружный стакан, $t = 1600$ °С; $\alpha_{среда-нар. стакан} = 118$ Вт/(м² · К), $\varepsilon = 0.7$. Шаг по времени принимали равным 2 с.

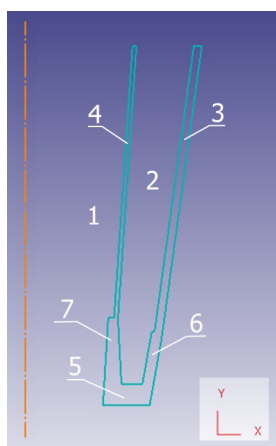


Рис. 1. Геометрия воздушной фурмы для моделирования в DEFORM-2D: 1 — дутьевой канал, 2 — водоохлаждаемая полость, 3 — наружный стакан, 4 — внутренний стакан, 5 — торец рыльной части, 6 — боковая поверхность рыльной части, 7 — рыльная часть со стороны дутьевого канала

3. Результаты и их обсуждение

Во время расчета в DEFORM-2D наблюдали за изменением температуры различных частей фурмы. По результатам расчета в Post-Processor DEFORM-2D для анализа результатов использовали функцию Point Tracking. Эта функция позволяет пользователю выбрать узел или узлы сетки конечных элементов в интересующем его объеме заготовки или инструмента. Для выбранных точек программа строит графики изменения значений различных величин, в том числе температуры, в зависимости от времени. Выделили пять узлов сетки конечных элементов (рис. 2), узлы отмечены черными точками и пронумерованы (P1, P2, P3, P4 и P5), номера узлов на рисунке показаны белым цветом. Выбор точек обусловлен особенностями конструкции фурмы. Точки P1 и P2 представляют интерес, так как отображают изменение температуры внутреннего стакана; точки P3 и P4 отображают изменение температуры рыльной части, точка P5 — наружного стакана. Для каждого из узлов построили с помощью DEFORM-2D графики изменения температуры точки (узла) по времени. Установили, что 1.5–2.0 мин достаточно для выхода температуры различных частей фурмы на стационарный режим. Больше всего времени для выхода температуры на стационарный режим требуется торцу рыльной части (из-за его большей толщины), имеющему максимальные значения температуры нагрева (371 °С) и перепада температуры по толщине (около 80 °С).

При моделировании температурного поля деталей фурмы с теплоизолирующей вставкой толщиной $h_{\text{вс}} = 8$ мм, установленной во внутренний стакан со стороны дутьевого канала (рис. 3), условия были дополнены следующими данными: материал — теплоизоляция, $\lambda = 3$ Вт/(м · К), $C = 780$ Дж/(кг · К), $\varepsilon = 0.46$.

На фурме и вставке формировали сетку из 5000 элементов. Шаг по времени принимали равным 6 с. Выбрали четыре узла, P1–P4 (рис. 3), и построили для них график изменения температуры аналогично показанному на рис. 3. Точки P1 и P2 выбрали для отображения изменения температуры вставки, точки P3 и P4 — для отображения изменения температуры внутреннего стакана.

На рис. 3 показано место контакта трех объектов: вставки, внутреннего стакана и рыльной части со стороны дутьевого канала. При анализе изменения поля температур и температур в выбранных узлах установили, что время выхода температуры вставки на стационарный режим увеличивается до 3 мин по сравнению с фурмой без вставки. Наблюдается градиент температуры вставки по ее толщине до 540–555 °С, причем максимального значения температура вставки достигает на поверхности со стороны дутьевого канала. В то же время температура внутреннего стакана снижается на 35–40 °С по сравнению с фурмой без вставки.

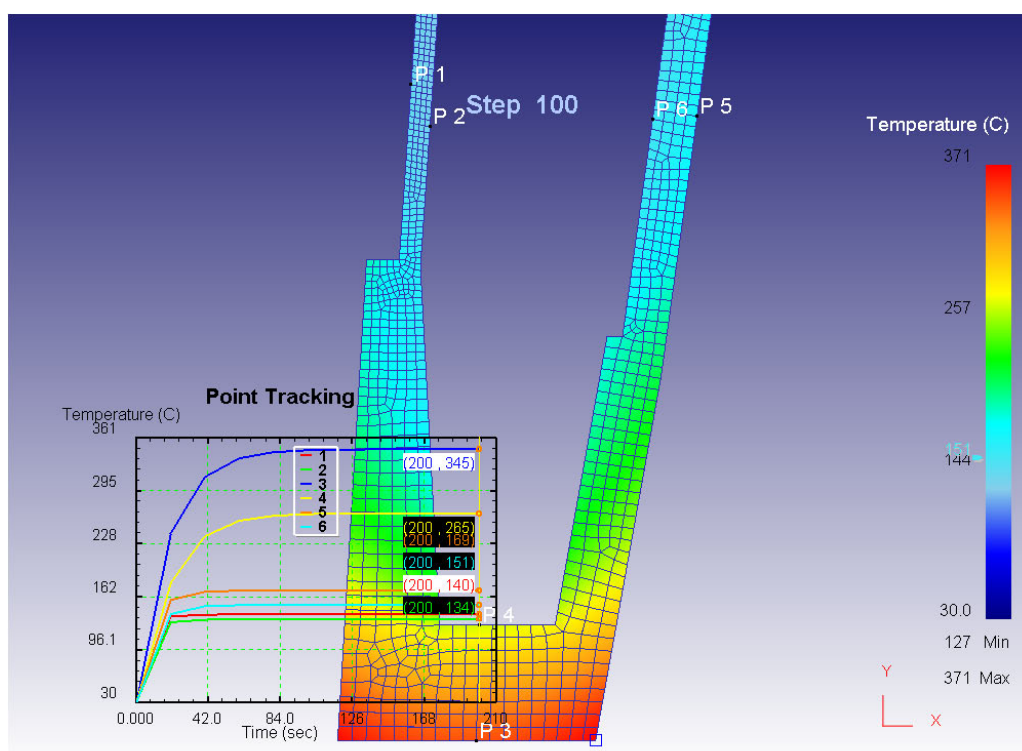


Рис. 2. Температурное поле деталей медной фурмы (цветная версия рисунка доступна в электронной версии статьи на сайте журнала)

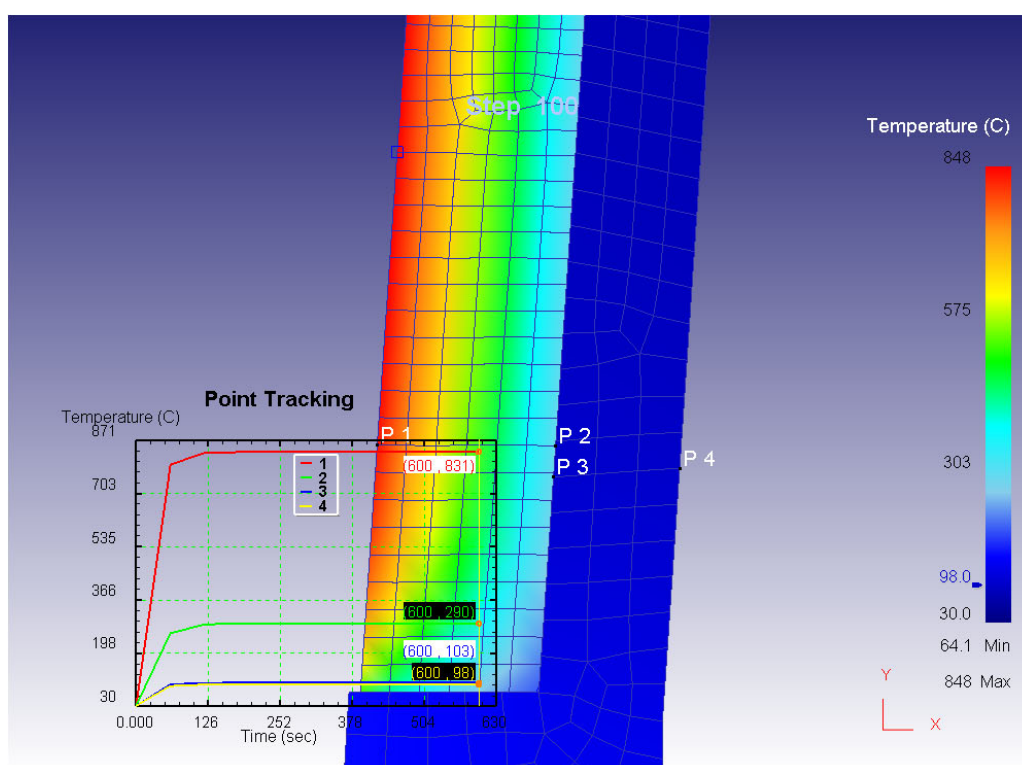


Рис. 3. Температурное поле внутреннего стакана фурмы и теплоизолирующей вставки, плотно прилегающей к внутреннему стакану и рывильной части со стороны дутьевого канала: точки P1 и P2 отображают изменение температуры вставки, P3 и P4 — изменение температуры внутреннего стакана (цветная версия рисунка доступна в электронной версии статьи на сайте журнала)

При моделировании температурного поля деталей фурмы с теплоизолирующей вставкой толщиной $h_{\text{BC}} = 8$ мм, установленной во внутренний стакан со стороны дутьевого канала с воздушным зазором $h_{\text{ВОЗ}} = 1$ мм (рис. 4), условия процесса были дополнены следующими данными: материал — воздух, $\lambda = 0.0362$ Вт/(м · К), $C = 1005$ Дж/(кг · К), $\varepsilon = 0.01$.

На рис. 4 показано место контакта вставки, воздуха, внутреннего стакана и рыльной части со стороны дутьевого канала. Для анализа результатов выбрали шесть узлов, P1–P6, в интересных зонах покрытия и рыльной части (рис. 4). Для каждого узла построили кривые изменения температур от времени. Видно, что в данном случае время выхода температуры вставки на стационарный режим увеличивается до 4 мин. Градиент температуры вставки по ее толщине снижается до 160–250 °С по сравнению с вариантом без воздушного зазора, причем максимальное значение температуры поверхности вставки со стороны дутьевого канала также увеличивается. Температура внутреннего стакана также снижается еще на 15–20 °С по сравнению с вариантом без воздушного зазора. Однако наблюдается резкий градиент температуры воздушного зазора по его толщине (до 760 °С) из-за низкой теплопроводности воздуха, чем и объясняется изменение температурного поля внутреннего стакана и вставки.

Как было сказано выше, для повышения стойкости фурмы и снижения тепловых потерь на нее наносят газотермическое покрытие. В этом случае условия процесса были дополнены следующими данными: материал — алюминий с оксидом алюминия, толщина покрытия $h_{\text{П}} = 1$ мм, $\lambda = 30$ Вт/(м · К), $C = 656.5$ Дж/(кг · К), $\varepsilon = 0.46$.

На фурме и покрытии формировали сетку из 5000 элементов. Шаг по времени принимали равным 2 с.

Результаты моделирования температурного поля торца рыльной части фурмы представлены на рис. 5. Для иллюстрации перепада температур, помимо отображения поля температур, выбрали четыре узла, P1–P4 (рис. 5). Анализ результатов моделирования показал, что время выхода температуры, например торца рыльной части, на стационарный режим не изменилось по сравнению с фурмой без покрытия. Однако максимальная температура нагрева торца рыльной части снизилась до 326 °С, а максимальный градиент температуры по его толщине также снизился до 67 °С.

Представляет интерес моделирование прогара фурмы при ее взаимодействии с жидким чугуном (рис. 6). Поле температур отображали с указанием графика изменения температуры для трех узлов: P1, P2 и P3. При этом точки P2 и P3 находятся на участке возможного прогара, а точка P1 находится на наиболее удаленном участке рыльной части. Цель — выявить отличия изменения температуры в точках P2 и P3 по сравнению с точкой P1. Зона контакта с чугуном не превышала 20 мм по диаметру и длине торца рыльной части. Шаг по времени принимали равным 2 с.

После 200 с нагрева фурмы (работа в стационарном режиме) происходит локальный контакт рыльной части с чугуном. Моделирование прогара выполняли следующим образом: граничные условия дополнены температурой на поверхности рыльной части в области контакта с чугуном — 1500 °С, $\alpha_{\text{чугун-рыло}} = 2100$ Вт/(м² · К) [Емельянов, 1988], $\alpha_{\text{медь-вода}} = 582$ Вт/(м² · К).

Коэффициент $\alpha_{\text{медь-вода}}$ рассчитывали по формулам стационарной теплопроводности [Кутателадзе, Борищанский, 1959], при условии, что торец рыльной части, как самый толстый, расплавился. При этом допускали, что на рыльную часть и наружный стакан нанесено алюминиевое газотермическое покрытие.

Через 40 с контакта с чугуном температура на поверхности рыльной части со стороны воды достигает 1050 °С, а через 100 с — 1060 °С, что практически равносильно прогару.

4. Заключение

Для расчета динамики нагрева воздушной фурмы методом конечных элементов (осесимметричная задача) использовали программу DEFORM-2D.

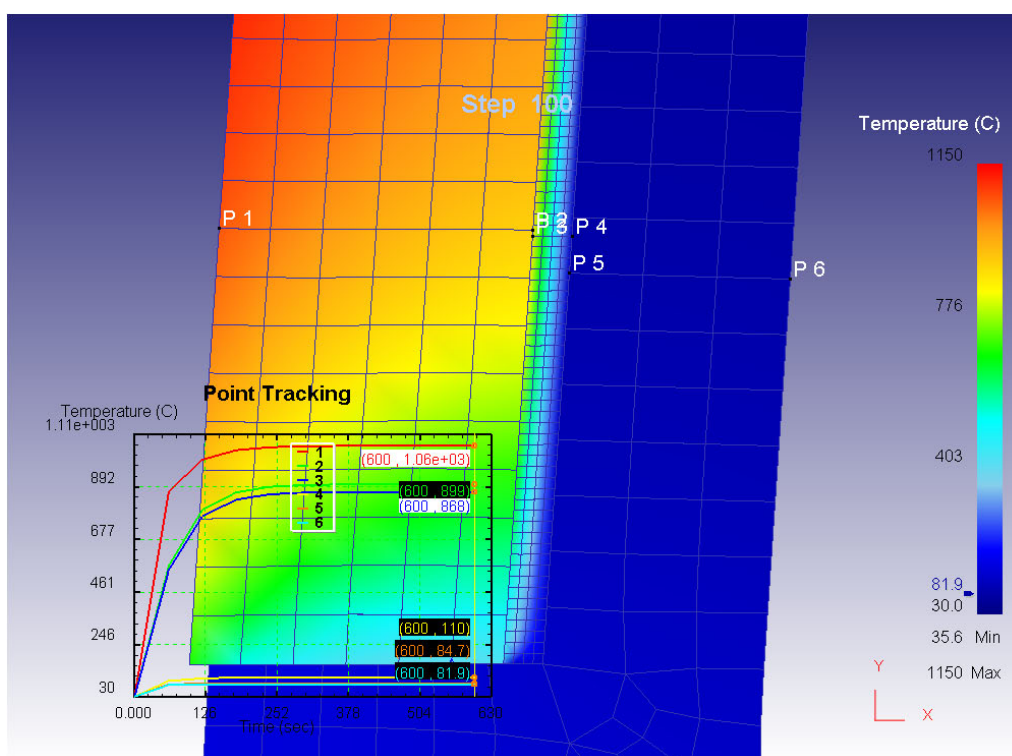


Рис. 4. Температурное поле внутреннего стакана фурмы, теплоизолирующей вставки и воздушного зазора между ними: точки P1 и P2 отображают изменение температуры вставки, P3 и P4 — изменение температуры воздушного зазора, P5 и P6 — изменение температуры внутреннего стакана (цветная версия рисунка доступна в электронной версии статьи на сайте журнала)

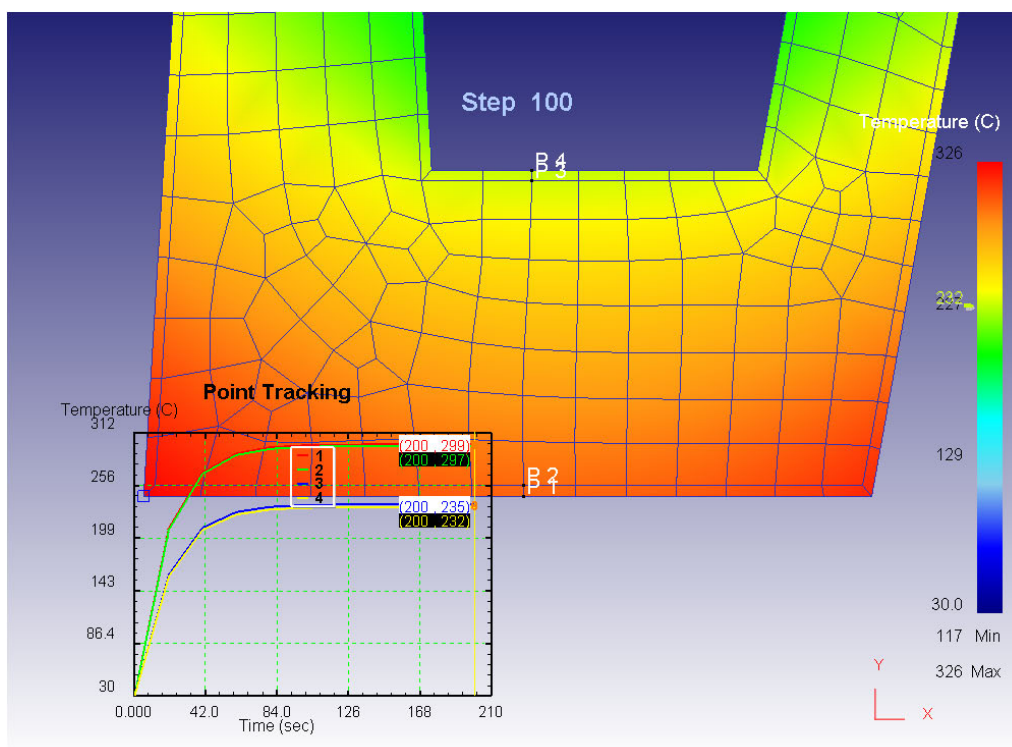


Рис. 5. Температурное поле торца рьяльной части фурмы с покрытием (цветная версия рисунка доступна в электронной версии статьи на сайте журнала)

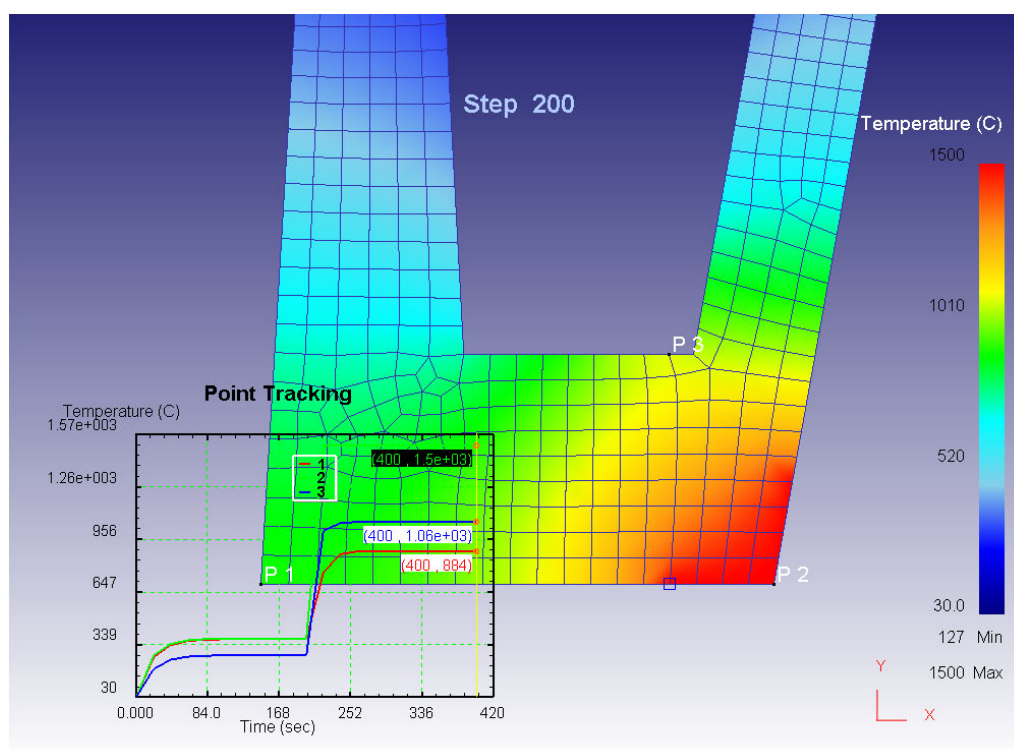


Рис. 6. Температурное поле рывальной части фурмы при прогаре (цветная версия рисунка доступна в электронной версии статьи на сайте журнала)

Показано значительное влияние теплоизолирующей вставки в дутьевой канал и воздушно-го зазора, отделяющего ее от внутреннего стакана, на температурное поле фурмы. Рассмотрено моделирование прогара фурмы при ее взаимодействии с жидким чугуном.

5. Благодарности

Авторы выражают благодарность А. В. Коровину и А. А. Сидорову за консультирование и помощь при разработке конечно-элементных моделей в DEFORM-2D.

Список литературы (References)

- А. с. № 159870 СССР. МПК С21b. Дутьевая фурма доменной печи с огнеупорной вставкой / Е. Д. Багрецов, Ю. И. Ружальский — 805782; заявлено 03.12.1962; опубл. 14.01.1964. — Бюл. № 2.
<http://www.findpatent.ru/patent/15/159870.html> (1962) (Patent USSR 159870) [Electronic resource] (in Russian).
- Емельянов В. А. Тепловая работа машин непрерывного литья заготовок. — М.: Металлургия, 1988. — 143 с.
 Emeljanov V. A. Teplovaya rabota mashin nepreryvnogo lit'ya zagotovok [Heat work of continuous cast equipment]. — Moscow: Metallurgija, 1988. — 144 p.
- Пат. № 2215043 РФ. МКИ С21В7/16. Способ подготовки к работе фурмы доменной печи / В. Н. Григорьев, Г. И. Урбанович, Е. Г. Урбанович и др. — 20011337559/02; заявл. 11.12.01; опубл. 27.10.02. — Бюл. № 30.
 IPS_Ru. http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1479331578428. (2009) (Patent RU 2215043 C2) [Electronic resource] (in Russian).

- Пат. № 2235789 РФ, МКИ C21B7/16. Дутьевая фурма доменной печи и способ нанесения защитного покрытия на дутьевую фурму доменной печи / А. Г. Маншилин, Е. Н. Складановский, В. И. Нецветов и др. — 2002129285/02; заявл. 04.11.02; опубл. 27.05.04. — Бюл. № 15.
IPS_Ru. http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1479378710690. (2009) (Patent RU 2235789 C2) [Electronic resource] (in Russian).
- Пат. 2387716 РФ, C21B7/16. Способ подготовки фурмы доменной печи / А. Г. Радюк, А. Е. Титлянов, С. С. Ляпин и др. (РФ). — 2008111753/02; заявл. 27.03.08; опубл. 27.04.10. — Бюл. № 12.
IPS_Ru. http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1479332004272. (2009) (Patent RU 2387716 C2) [Electronic resource] (in Russian).
- Пат. 2465333 РФ, C21B7/16. Способ подготовки к работе воздушной фурмы доменной печи / А. Г. Радюк, А. Е. Титлянов, Д. С. Васильев и др. (РФ). — 2011104102/02; заявл. 04.02.11; опубл. 27.10.12. — Бюл. № 30.
IPS_Ru. http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1479378480580. (2009) (Patent RU 2465333 C2) [Electronic resource] (in Russian).
- Кутателадзе С. С., Борищанский В. М.* Справочник по теплопередаче. — Л.–М.: Госэнергоиздат, 1959. — 414 с.
Kutaladze S. S., Borshanskiy V. M. Spravochnik po teploperedache [Reference book on heat exchange]. — L.–Moscow: Gosenergoizdat Publishinh House, 1959. — 414 p.
- Расчет коэффициентов теплоотдачи поверхностям воздушной фурмы доменной печи от горна и горячего дутья / Н. Л. Кириллова, А. Г. Радюк, С. М. Горбатюк и др. // Современные проблемы гуманитарных и естественных наук: Материалы XIII Международной научно-практической конференции 21–22 декабря 2012 г. В 2 т.: т. I / Науч.-инф. издат. центр «Институт стратегических исследований». — М.: Спецкнига, 2012. — С. 132–135.
Raschet koehfficientov teplootdachi poverhnostyam vozdushnoj furmy domennoj pechi ot gorna i goryachego dut'ya [Calculation of heat transfer coefficients between surfaces of blast furnace's air tuyere, furnace and hot blowing] / Kirillova N. L., Radjuk A. G., Gorbatjuk S. M. et al. // Sovremennye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk: materialy XIII mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii 21–22 dekabrya 2012 [Proceedings of the XIII international conference for Modern problems of Humanities and Science, December, 21–22, 2012]. — Vol. 1. — Moscow: Spetzkniga Publishing House, 2012. — P. 132–135.
- Fadeev A. V., Bazhenov V. E., Kolygin A. V.* Improvement in the casting technology of blades for aviation gas-turbine engines made of TNM-B1 titanium aluminide alloy produced by induction crucible melting // Russian journal of non-ferrous metals. — 2015. — Vol. 56, Issue 1. — P. 26–32.
- Kharitonov V. A., Stolyarov A. Y.* Development of a Competitive Technology to Make Wire for Metal Cord // Metallurgist. — 2013. — Vol. 57, Issue 3–4. — P. 320–325.
- Li D. R., Liu Z. Y., Yu Y., Wang E. D.* Numerical simulation of hot hydrostatic extrusion of W-40 wt. % Cu // Materials Science and Engineering A. — 2009. — 499. — P. 118–122.