

УДК 669.184.244

Сущенко А.В.¹, Балаба А.П.²

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПОЛЕЙ В
НАКОНЕЧНИКАХ КИСЛОРОДНЫХ ФУРМ LD-КОНВЕРТЕРОВ**

Приведены результаты математического моделирования и выполнен анализ температурного поля в медных наконечниках водоохлаждаемых кислородных фурм для верхней продувки расплава в конвертерах. Исследовано влияние ряда производственных факторов на тепловую работу наконечников.

Получение достоверной информации о температурных полях в медных наконечниках и стволах кислородно-конвертерных фурм является важным условием для разработки надежной конструкции, правильного выбора материалов, оптимизации режимов эксплуатации дутьевого оборудования. В то же время в технической литературе мало работ, посвященных указанному вопросу, что связано как с имеющимися трудностями математического описания, так и со сложностью проведения натурных экспериментов на действующих конвертерах. В работах [1, 2] представлены математические модели тепловой работы фурменного наконечника, основанные на численном решении трехмерной нелинейной задачи нестационарной теплопроводности. При этом не учитываются возможность возникновения и развития режимов кипения охлаждающей воды и отрыва потока кислорода в соплах, а также лучистый тепловой поток от полости конвертера на внутреннюю поверхность сопла. Адиабатная температура стенки диффузора сопла рассчитывается только по параметрам кислорода в его выходном сечении. Как справедливо отмечают авторы [2], в работе [1] не приводятся результаты расчета пространственного температурного поля. В то же время физичность результатов, полученных в работе [2], вызывает сомнение. При приведенных значениях температуры (500 °С и более) поверхности наконечника, контактирующей с охладителем, однозначно произойдет изменение граничных условий теплообмена с переходом к кипению воды и существенному изменению температурного поля в наконечнике [3].

Цель настоящей работы – устранение указанных выше недостатков математических моделей тепловой работы фурмы, моделирование температурного поля в наконечниках типовых конструкций, а также исследование влияния на него ряда производственных факторов.

Математическая модель разработана на основе следующих положений. Учитывая симметричность рассматриваемой задачи (относительно оси фурмы), в качестве расчетной области была выделена часть наконечника, включающая одно основное (периферийное или центральное) продувочное сопло и прилегающую к нему торцевую часть головки. При этом рассматривалась двумерная задача нестационарной теплопроводности в цилиндрических координатах $T(r; z; \tau)$ с началом координат в центре выходного сечения данного сопла и осью z , совпадающей с его осью (см. рис. 1):

$$\partial T / \partial \tau = \text{div} (-\lambda \cdot \text{grad } T), \quad (1)$$

где λ – теплопроводность меди, как функция от температуры; τ – время.

Граничные условия III рода уравнения (1) со стороны охлаждающей воды (внутренняя поверхность торцевой части наконечника и наружная поверхность стенки сопла) описывают теплообмен вынужденной конвекцией при заданных параметрах охладителя (скорость w_0 , температура T_0 , давление p_0) с учетом реальной шероховатости поверхности, возможности существования различных режимов кипения и наличия слоя накипи по методике [3]. Граничные условия III рода со стороны сверхзвукового потока кислорода описывают

¹ПГТУ, канд. техн. наук, доц., нач. лаб. энерго-ресурсосбережения металлург. пр-ва

²ПГТУ, аспирант

теплообмен вынужденной конвекцией к внутренней поверхности диффузора сопла при заданных температуре торможения $T_{0к}$ и расходе кислорода через сопло m_k . При этом коэффициент теплоотдачи α_k определялся с использованием критериального уравнения [4], как функция от числа Маха потока $M_k(z)$ и температуры стенки сопла $T_c(z)$. Принимали, что при наличии отрыва потока кислорода в сопле (при заданной величине глубины отрыва $h_{отр}$) в области $0 < z < h_{отр}$ охлаждающий эффект кислорода отсутствует. Граничные условия III рода со стороны полости конвертера характеризуют сложный теплообмен в системе «поверхность наконечника (сопла) – реакционная зона – металлический и шлаковый расплав – отходящие газы и области их дожигания». При их описании ввели понятие эффективной температуры $T_{эф}$ условной поверхности F_n , находящейся в непосредственной близости от торца наконечника и имеющей степень черноты, равную единице. Величина $T_{эф}$ определяет фактическую плотность лучистого теплового потока $q_{н,л}$ от полости конвертера на поверхность наконечника и сопла (через лучепрозрачный кислород). При этом дополнительно учитывали конвективную теплоотдачу от газо-шлако-металлической эмульсии к наконечнику посредством задания коэффициента теплоотдачи α_n . Граничные условия со стороны поверхностей F_1 и F_2 (см. рис. 1) представляют собой: $\partial T / \partial r = 0$ и $\partial T / \partial z = 0$ соответственно.

Полученную таким образом систему нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений решали с использованием известных численных методов [5, 6] и с применением вычислительных программных комплексов типа Matlab, Femlab и др. При этом для обеспечения сходимости итерационного процесса при условии перехода от режима однофазной конвекции к поверхностному кипению охлаждающей воды [3] была введена специальная сглаживающая функция $k = f(T_{нов})$, где k – вероятность возникновения поверхностного кипения, $T_{нов}$ – температура внутренней поверхности наконечника.

В качестве объекта исследования рассматривали типовые конструкции наконечников кислородных фурм 130-180 т и 250-400 т конвертеров. При этом конструктивные и режимные параметры работы фурм были взяты по производственным данным (см. рис. 1): $d_{мин}^{160(350)} = 30$ (47) мм, $d_{вых}^{160(350)} = 40$ (67) мм, $l_{диф}^{160(350)} = 66$ (115) мм, $\delta_c^{160(350)} = 10$ (11) мм, $\delta_m^{160(350)} = 12$ (13) мм, $T_{0к} = 20$ °С $m_k^{160(350)} = 80$ (240) $\text{нм}^3/\text{мин}$, $T_g = 30$ °С. Здесь и далее верхний индекс параметров указывает на садку конвертера.

На рис. 1 представлены температурные поля (изотермы) в расчетных областях 5 – сопловых наконечников фурм для 160-т (а – литой) и 350-т (б – сварной, ковано-паяной конструкции) агрегатов – в сечении вертикальной плоскостью, проходящей через оси фурмы и сопла, полученные при базовых условиях: $T_{эф} = 2200$ °С (соответствующая величина $q_{н,л} = 1,7 \text{ МВт}/\text{м}^2$), скорость воды $w_g^{160(350)} = 2$ (5) м/с, материал наконечника – медь М0, работа фурмы без заметалливания наконечника, без отрыва кислородного потока в соплах.

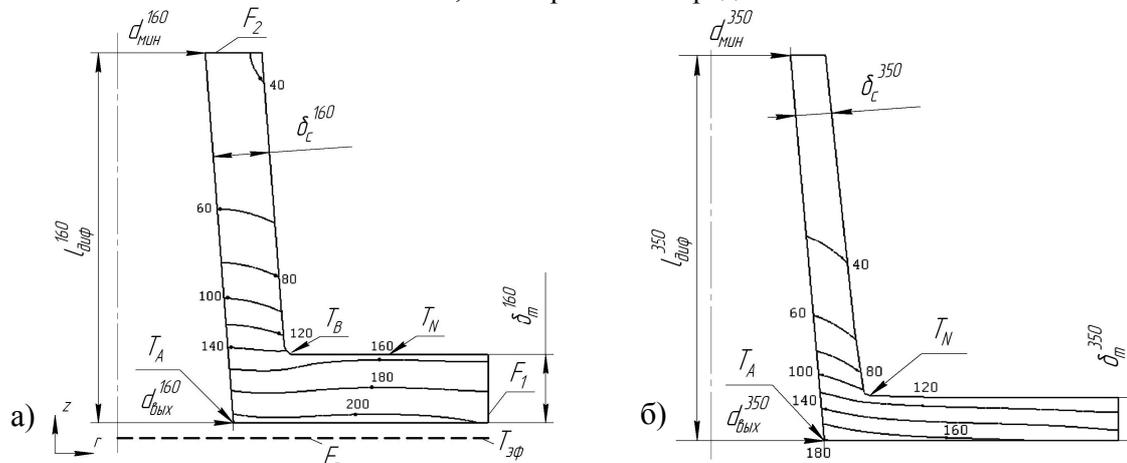


Рис. 1 – Результаты моделирования температурных полей в наконечниках фурм 160-т (а) и 350-т (б) конвертеров

На рис. 2 представлена динамика изменения температуры на кромке сопла (точка A) и максимальной температуры внутренней поверхности наконечника (точка N) для базового варианта 350-т конвертера. Время релаксации температурного поля τ_p составляет порядка 10-15 с. Все приведенные в работе результаты вычислений температур даны для условий наступления квазистационарного режима теплообмена в системе (при $\tau \geq \tau_p$).

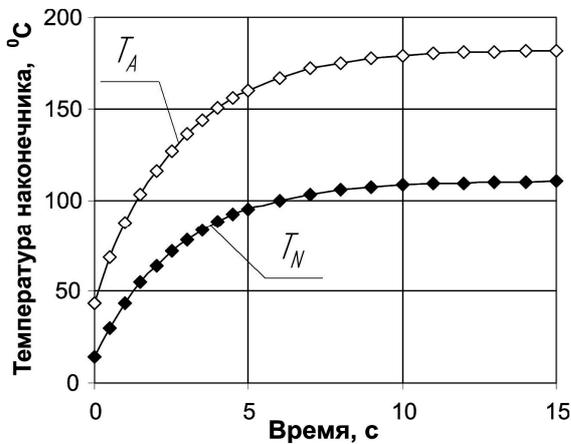


Рис. 2 – Изменение характерных температур T_A и T_N наконечника фурмы 350-т конвертера во времени

Максимальная температура наконечника (см. рис. 1) достигается на кромке сопла: $T_A^{160(350)} = 207$ (182) °C. Положение точки N определяется соотношением охлаждающих эффектов со стороны воды и стороны кислородного потока: $T_N^{160(350)} = 157$ (111) °C.

Величина α_k монотонно уменьшается по длине сопла (см. рис. 3) с небольшим увеличением на выходном участке, что связано с его более интенсивным нагревом. Плотности тепловых потоков к воде (от торца наконечника) и к кислороду (на выходном участке сопла) для 160-т (350-т) конвертера при базовых условиях соответственно равны 1,6 (1,8) МВт/м² и 0,4 (0,3) МВт/м².

В месте сопряжения сопла с торцевой частью наконечника (рис. 1, точка B) имеют место максимальный градиент температуры и, как следствие, максимальные температурные напряжения в материале – см. рис. 4. Для сварных конструкций это является одной из причин разрушения швов сопел с нижней тарелкой наконечника.

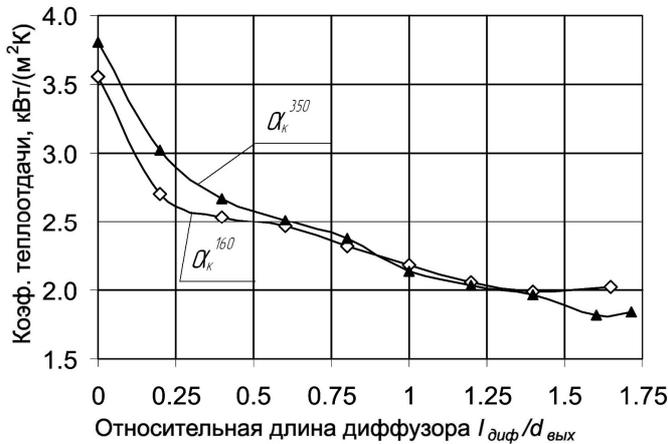


Рис. 3 – Изменение коэффициента теплоотдачи α_k по длине диффузора сопел фурм 160-т и 350-т конвертеров при базовых условиях

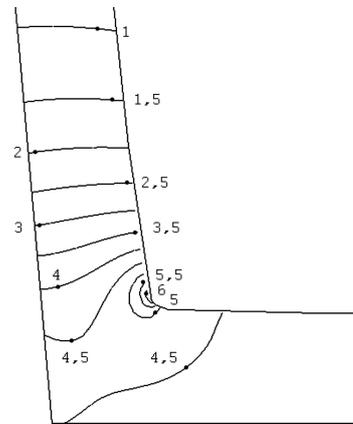


Рис. 4 – Изолинии градиента температуры в околосопловой области наконечника фурмы 350-т конвертера при базовых условиях, °C/мм

Определенные в результате моделирования значения температуры наконечников фурм хорошо согласуются с имеющимися немногочисленными экспериментальными данными, полученными в производственных условиях. Так, например, в работе [7] при скорости воды 5-6 м/с в наконечнике фурмы 350-т конвертера температура внутренней поверхности нижней тарелки (на расстоянии 35 мм от сопла) увеличивалась в процессе плавки до 120 – 150 °C. Моделирование этих условий (по уровню тепловых потоков на наконечник, соответствующих температуре $T_{эф} = 2300 - 2400$ °C) дает результаты близкие к экспериментальным значениям (см. рис. 5, линия T_N^{350}). Это подтверждает адекватность разработанной модели. При хорошо организованном охлаждении [8] и отсутствии заметалливания наконечника имеют место

относительно невысокие значения температур, не приводящие к его оплавлению и разрушению. Это также подтверждается результатами экспериментов на лабораторном конвертере [9].

На рис. 6 представлены результаты моделирования влияния скорости воды w_6 на тепловую работу литого наконечника фурмы 160-т конвертера (рассматривается случай затрудненной организации высокоскоростных потоков охлаждающей воды в межсопловом пространстве наконечника [8]). При снижении w_6 менее 1,5 м/с соответствующее уменьшение коэффициента теплоотдачи к воде в режиме однофазной конвекции $\alpha_{конв}$ приводит к перегреву внутренней поверхности наконечника относительно температуры насыщения охлаждающей воды (при давлении p_6) и возникновению поверхностного кипения [3]. В результате увеличения суммарного коэффициента теплоотдачи к воде $\alpha_\Sigma = (\alpha_{кон}^n + k \cdot \alpha_{кин}^n)^{1/n}$, где $\alpha_{кин}$ – коэффициент при развитом пузырьковом кипении, $n = 2$ [10], рост температуры наконечника существенно замедляется. Однако работа наконечника в таком режиме является крайне нежелательной в связи с активизацией выпадения солей жесткости в виде накипи на его внутренней поверхности. При этом ухудшается охлаждение и увеличивается вероятность возникновения пленочного режима кипения с последующим прогаром наконечника.

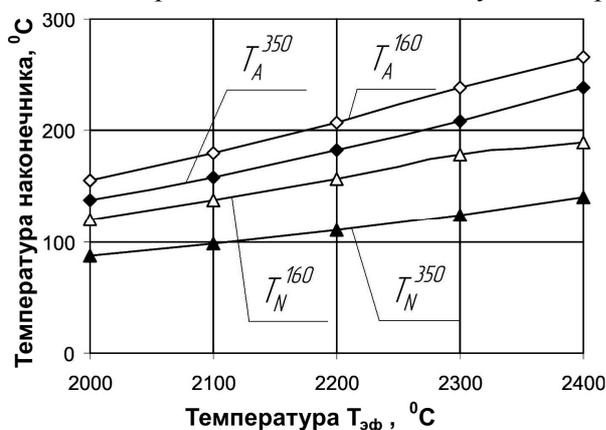


Рис. 5 – Зависимости температур T_A и T_N от величины $T_{эф}$ для наконечников фурм 160-т и 350-т конвертеров

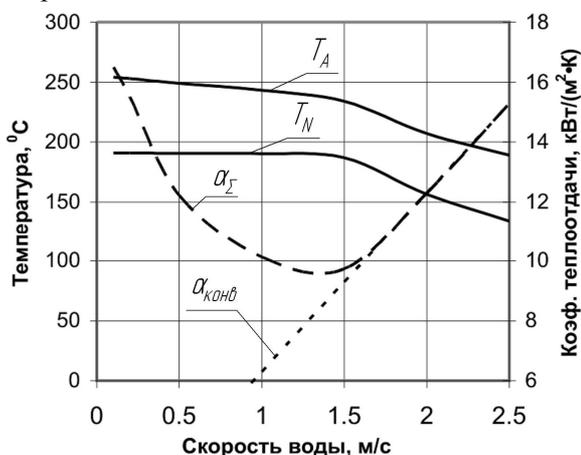


Рис. 6 – Зависимости параметров $\alpha_{конв}$, α_Σ , T_A и T_N от скорости охлаждающей воды в наконечнике фурмы 160-т конвертера при базовых условиях

При возникновении отрыва кислорода в соплах фурмы 160-т конвертера ($h_{отр} = 10$ мм) температура на кромке сопла T_A увеличивается незначительно: с 207°C (базовый вариант) до 218°C . С учетом дополнительного воздействия на торец наконечника конвективного теплового потока $q_{п,конв}$ от запыленных газов и газо-шлако-металлической эмульсии (при увеличении α_n до $0,5 \text{ кВт/(м}^2\cdot\text{К)}$) величина T_A составила 271°C при безотрывном течении в соплах. При появлении отрыва потока она увеличилась до 283°C и 305°C без учета и с учетом конвективного потока $q_{п,конв}$ в области $0 < z < h_{отр}$ соответственно.

Ухудшение качества меди (уменьшение коэффициента теплопроводности на 20 % и 30 % относительно чистой меди) приводит к росту температуры T_A с 207°C (базовый вариант) до 225°C и 238°C соответственно. Влияние λ на температуру T_N проявляется в гораздо меньшей степени. Так величина T_N для вышеуказанных условий составила: 157°C (базовый вариант), 158°C и 159°C .

При проведении дальнейших исследований по рассматриваемому вопросу необходимо выполнить анализ тепловой работы наконечника фурмы в критических условиях ее эксплуатации: при интенсивном заматывании и зашлаковывании наконечника, эжекции и горении в зоне отрыва потока кислорода в соплах конвертерных газов и газо-шлако-металлической эмульсии, образовании слоя накипи на внутренней поверхности наконечника, ухудшении качества сварных швов, ухудшении механических свойств меди и др. Для этого планируется усовершенствовать разработанные физическую и математическую модели с добавлением соответствующих расчетных блоков.

Выводы

1. Разработана математическая модель тепловой работы наконечника водоохлаждаемой конвертерной фурмы, позволяющая учитывать различные режимы кипения охлаждающей воды, изменение коэффициента теплоотдачи к кислороду по длине сопла, отрыв потока дутья в диффузорах сопел, а также лучистый и конвективный тепловые потоки на их внутреннюю поверхность.
2. Время релаксации (достижения квазистационарного состояния) температурного поля в наконечнике фурмы составляет порядка 10-15 с. Поэтому при исследовании тепловой работы наконечников в случаях, не связанных с быстрым изменением внешних факторов (время действия фактора менее τ_p , например, локальное попадание на наконечник объема металлического расплава, кратковременный отрыв потока в соплах с эжекцией шлака и т.п.), с достаточной для практики степенью точности можно использовать стационарную модель температурного поля.
3. В условиях нормальной работы фурмы (отсутствие заметалливания наконечника и глубокого отрыва потока кислорода в соплах) даже при относительно невысоких скоростях воды температуры наконечника существенно ниже температуры плавления меди. При этом максимальная температура наружной поверхности наконечника достигается на кромке сопла, а координаты изотермы с максимальной температурой внутренней поверхности наконечника определяются соотношением охлаждающих эффектов со стороны воды и со стороны кислородного потока. Зона максимального градиента температуры расположена в месте сопряжения сопла с торцевой частью наконечника.

Перечень ссылок

1. Жульковский О.А. Математическая модель тепловой работы наконечника верхней кислородной фурмы / О.А. Жульковский // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2000. – № 4. – С. 8 – 12.
2. Мокринский А.В. Численное моделирование температурных полей в цельноточном наконечнике верхней кислородной фурмы / А.В. Мокринский, Е.В. Протопопов, А.Г. Чернятевич // Металл и литье Украины. – 2005. – № 3 – 4. – С. 70 – 71.
3. Суценко А.В. К вопросу о теплообмене в системе охлаждения кислородных фурм конвертеров верхнего дутья / А.В. Суценко, В.Н. Евченко, А.П. Балаба // Изв. вузов. Черная металлургия. – 2007. – № 1. – С. 19 – 23.
4. Болгарский А.В. Термодинамика и теплопередача / А.В. Болгарский, Г.А. Мухачев, В.К. Шукин. – М.: Высшая школа, 1975. – 495 с.
5. Ши Д. Численные методы в задачах теплообмена / Д. Ши. – М.: Мир, 1988. – 544 с.
6. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150 с.
7. Исследование тепловой работы наконечника кислородной фурмы / Р.В. Старов, Г.В. Рыбалов, К.П. Кравцов, В.И. Ганошенко // Технология производства конвертерной и мартеновской стали массового назначения: Сб. науч. тр. ИЧМ. – М.: Металлургия, 1981. – С. 11 – 15.
8. Суценко А.В. Анализ эффективности гидродинамической работы систем охлаждения наконечников кислородно-конвертерных фурм / А.В. Суценко, А.П. Балаба // Вісник Приаз. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2008. – Вип. 18. – С. 121 – 125.
9. Баптизманский В.И. Исследование теплопередачи в наконечниках кислородных фурм / В.И. Баптизманский, В.Б. Охотский, А.В. Шибко // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1987. – № 11. – С. 47 – 50.
10. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие / С.С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 25.12.2008