

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ
НЕПРЕРЫВНОГО СЛИТКА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ФОРСУНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

*Институт прикладной математики и механики НАНУ, Донецк,
anna.ivanova@ukr.net*

Введение. При проектировании машины непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) возникает задача выбора типов форсунок, подающих водо-воздушную смесь, и способа их расстановки в зоне вторичного охлаждения (ЗВО). Требуется подобрать параметры форсуночного охлаждения таким образом, чтобы свести к минимуму температурные напряжения, вызванные неравномерным охлаждением слитка.

В [1] рассмотрены особенности распределения плотности орошения на поверхности слябовой заготовки в ЗВО и предлагаются возможные пути повышения равномерности теплоотвода с целью уменьшения вероятности трещинообразования. Однако при современных возможностях вычислительной техники наиболее привлекательным путем для решения задачи минимизации температурных напряжений в затвердевающей корочке непрерывного слитка является математическое моделирование.

Для вычисления температурных напряжений необходимо знание температурного поля непрерывного слитка. Поле температур может быть вычислено по математической модели квази-стационарного или нестационарного процесса теплопереноса с наличием конвективной составляющей при известных теплофизических параметрах разливаемой марки металла, температуре поступающего расплава, конструктивных параметрах МНЛЗ, скорости вытягивания слитка и коэффициентах теплоотдачи в ЗВО. Коэффициенты теплоотдачи в данном случае представляют наибольшую неопределенность, в то же время их изучению посвящено достаточно большое число работ.

Исследования распределений коэффициента теплоотдачи (КТ) вдоль всей поверхности слитка при различных скоростях вытягивания слитка и для различных типов форсунок проводимые в последнее время в Heat Transfer and Fluid Flow Laboratory Технического Университета Брно (Чехия) представлены в [2]. Известно, что наибольший теплоотвод от поверхности слитка осуществляется на участках накрываемых факелом форсунки. Методы определения КТ описаны, например в [3 – 6].

Производители форсунок, такие как, например фирма Lechler, также проводят лабораторные исследования и предоставляют данные о распределении КТ в зависимости от расстояния между форсункой и поверхностью слитка, расхода воды и давления воздуха для различных типов форсунок.

Поэтому, настоящая работа опирается на данные о КТ, полученные в более ранних работах другими исследователями.

Постановка задачи. При известных теплофизических параметрах разливаемой марки металла, температуре поступающего расплава, скорости вытягивания слитка, конструктивных параметрах МНЛЗ (в т.ч. координатах охлаждающих форсунок ЗВО) и коэффициентах теплоотдачи в зависимости от расходов воды и давления воздуха на каждой из форсунок вычислить температурное поле части непрерывного слитка, находящегося в ЗВО.

Математическая модель. Рассматривается непрерывный слиток в ЗВО. Температура внутри слитка описывается нелинейным уравнением в частных производных:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + v(\tau) \cdot \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{1}{c(T)\rho(T)} \left\{ \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] \right\},$$

где v – скорость вытягивания слитка, $T(\tau, x, y, z)$ – температура металла; теплофизические свойства разливаемого металла – c – удельная теплоёмкость, ρ – плотность и λ – теплопроводность – зависят от температуры.

Считается, что в поперечном сечении распределение температур и охлаждение симметричны относительно начала координат, поэтому процесс рассматривается в одной координатной четверти (рис.1), а граничные условия на координатных осях имеют вид:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = 0$$

На границе кристаллизатор – ЗВО задаются граничные условия первого рода, полученные из расчетов по математической модели температурного поля кристаллизатора.

Для определения положения границы раздела фаз заданы условие равенства температур:

$$T(\tau, x, y, z)|_{\xi_-} = T(\tau, x, y, z)|_{\xi_+} = T_{кр}$$

и условие Стефана:

$$\lambda(T) \left. \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} \right|_{\xi_-} - \lambda(T) \left. \frac{\partial T}{\partial \bar{n}} \right|_{\xi_+} = \mu \rho(T_{кр}) \left(\frac{d\xi}{d\tau} + v(\tau) \frac{d\xi}{dz} \right),$$

где μ – скрытая теплота кристаллизации, $T_{кр}$ – температура кристаллизации (средняя из интервала ликвидус – солидус), ξ – граница раздела фаз, $\bar{n}$ – нормаль к поверхности раздела фаз.

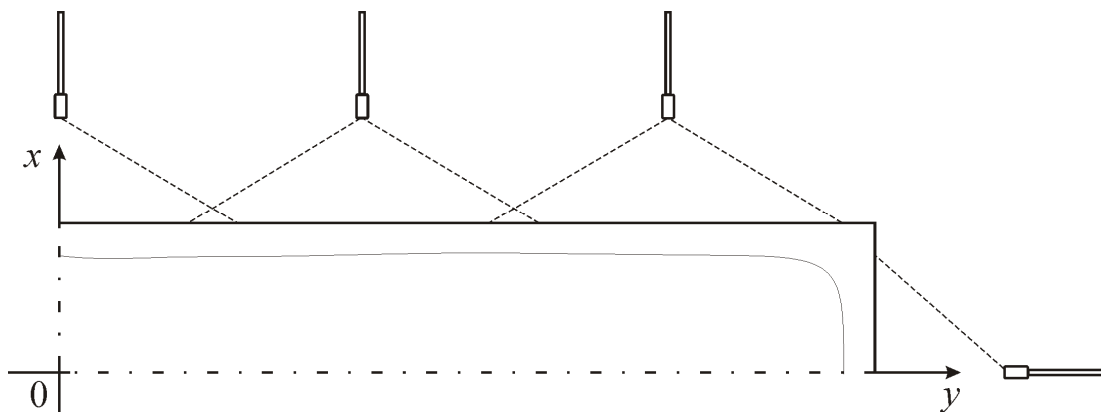


Рис.1. Четверть поперечного сечения слитка на одном из уровней расположения форсунок.

Теплоотдача на поверхности слитка формулируется в виде граничных условий третьего рода (по широкой грани):

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=l} = \alpha(\vec{t}, \vec{k}, \vec{G}, \vec{P}) [T_{o.c.} - T(\tau, l, y, z)] + \sigma_n [T_{o.c.}^4 - T^4(\tau, l, y, z)],$$

где α – коэффициент конвективной теплоотдачи, $\vec{t}$ – вектор, определяющий типы форсунок, $\vec{k}$ – координаты форсунок, $\vec{G}$ – расходы охлаждающей воды, $\vec{P}$ – давление воздуха, $T_{o.c.}$ – температура окружающей среды, l – полутолщина слитка, σ_n – приведённый коэффициент излучения. Аналогично задаются граничные условия для узкой грани. Форсунки вдоль узкой грани (рис.1) устанавливаются на уровнях близких к кристаллизатору. На участках, не накрываемых факелом форсунки, коэффициент конвективной теплоотдачи считается равным константе.

Заданы начальные условия для всего поля температур и положения неизвестной границы:

$$\begin{aligned} T(0, x, y, z) &= T_0(x, y, z), \\ \xi(0, y, z) &= \xi_0(y, z). \end{aligned}$$

Для численного решения поставленной задачи был использован метод конечных разностей. Расчет положения неизвестной границы фазового перехода проводился по специально разработанным алгоритмам.

Разработано программное обеспечение, позволяющее проводить расчеты для различных параметров разливки и форсуночного охлаждения.

Результаты численных экспериментов. Во многих работах считается, что коэффициент теплоотдачи внутри области, накрываемой факелом форсунки, имеет параболическое распределение [1] (рис. 2). Был выполнен ряд расчетов для такого распределения коэффициента теплоотдачи и различных координат размещения форсунки. Температура поверхности, полученная в результате, представлена на рис.3.

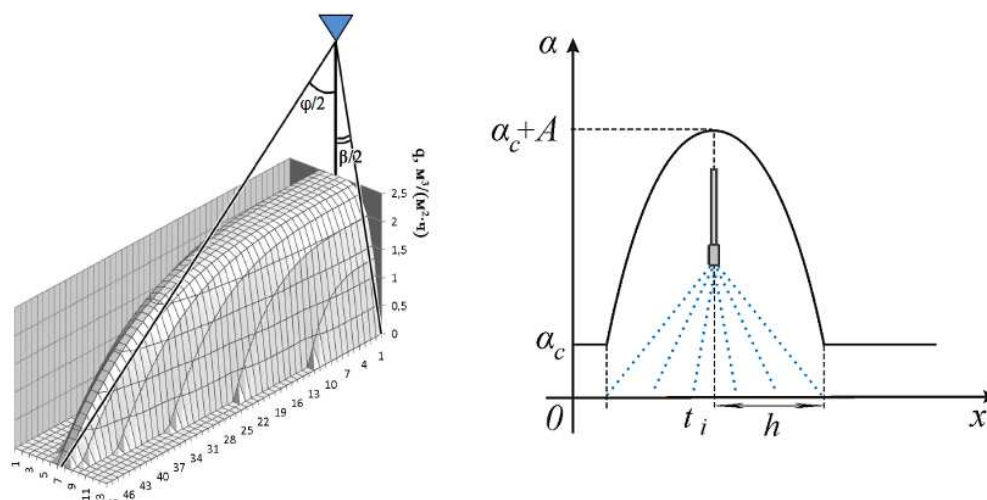


Рис.2. Параболическое распределение коэффициента теплоотдачи внутри области, накрываемой факелом форсунки.

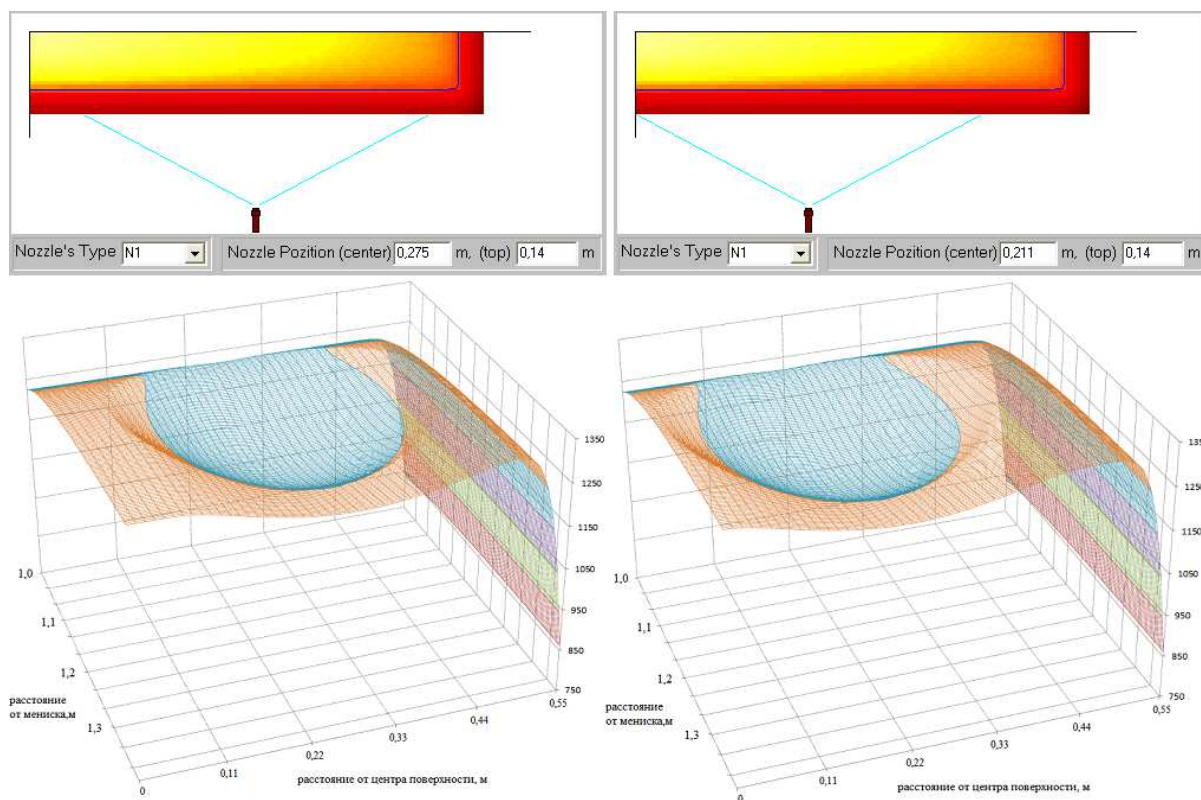


Рис.3. Температура поверхности слитка в зависимости от положения форсунки.

Расчеты, проведенные для форсунок, установленных в первых секциях ЗВО, показали, что в этих секциях углы слитка имеют пониженную температуру, поэтому подвергать их принудительному охлаждению нельзя. Следовательно, форсунки должны быть расположены таким образом, чтобы распыляемые ими частицы воды не достигали углов слитка.

По представленной модели можно рассчитывать температуру слитка в случае произвольного (не только параболического) распределения коэффициента теплоотдачи (рис. 4а), а также для случая перекрытия областей накрываемых факелами разных форсунок (рис 4б).

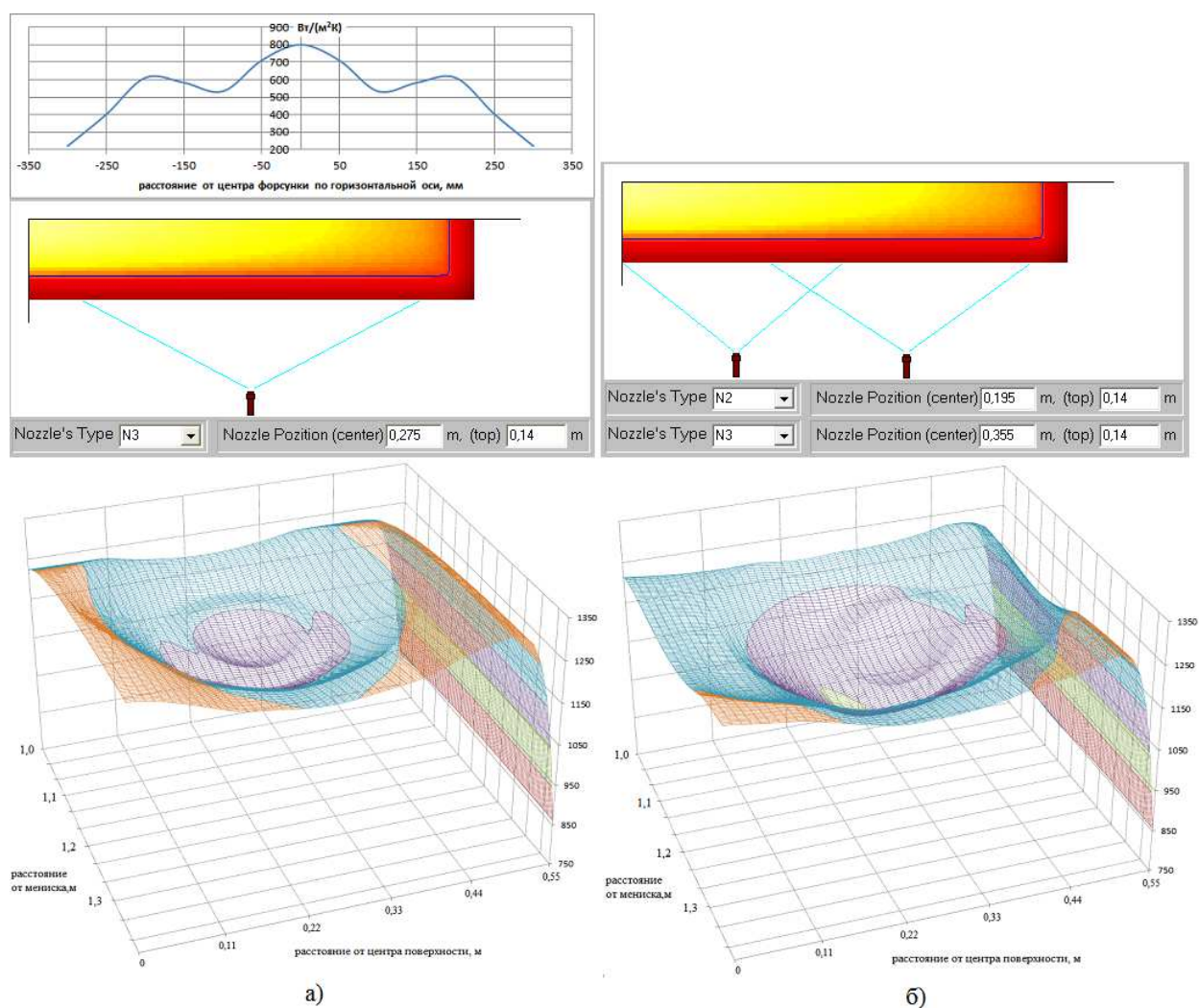


Рис.4. Температура поверхности слитка при: а) нестандартном коэффициенте теплоотдачи под форсункой, б) перекрытии областей действия форсунок.

Выводы. В работе представлена трехмерная модель температурного поля непрерывного слитка. Полученные данные дают информацию о распределении температур в зависимости от технических характеристик, величин расхода охлаждающей воды, давления воздуха и способа расстановки форсунок в зоне

вторичного охлаждения. На основе результатов расчетов могут быть подобраны такие конструктивные параметры форсуночного охлаждения в ЗВО, которые будут соответствовать наименьшим температурным напряжениям, а, следовательно, обеспечивать наилучшее возможное качество металла производимого машиной непрерывного литья заготовок.

Библиографический список

1. Федосов А.В., Казачков Е.А. Определение локальных коэффициентов теплоотдачи от поверхности слябовой заготовки МНЛЗ в зоне вторичного охлаждения. // Вісник Приазовського державного технічного університету, Вип.18, 2008, С. 44 – 49.
2. J. Stetina, F.Kavicka, T. Mauder, L. Klimes. Transient simulation temperature field for continuous casting steel billet and slab. // Proceedings of 7th European Continuous Casting Conference, Dusseldorf, 27 June – 1 July 2011. p. 1-10.
3. J. Horský, M. Raudenský. Measurement of heat transfer characteristics of secondary cooling in continuous casting. METAL 2005, Hradec nad Moravicí, 24 – 26 May 2005.
4. J.I. Minchaca M., A.H. Castillejos E., F.A. Acosta G. and S. Murphy. Fluid Dynamics of Thin Steel Slab Continuous Casting Secondary Cooling Zone Air Mists. ILASS-Americas 22nd Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Cincinnati, OH, May 2010
5. Jürgen W. Frick. User benefits of modern air mist nozzle and secondary cooling system technology. www.lechlerusa.com/pdfs/frickarticle.PDF
6. F. Puschmann, E. Specht, J. Schmidt. Evaporation Quenching with Atomized Sprays. 3rd European Thermal Sciences Conference 2000, p. 1071-1074.

© Иванова А.А., 2011