

УДК 621.746.328:536.12.001.57

**Жульковская И.И., Огурцов А.П.,
Жульковский О.А.***Днепродзержинский государственный технический университет*

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА СТАКАНА-КОЛЛЕКТОРА ПРИ БЕССТОПОРНОЙ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ

Розроблено математичну модель температурного режиму стакана-колектора ковшового шибєрного затвору при рїзних способах розливу сталї. Температурне поле конструкції описується нелїнійним диференційним рївнянням теплопровідності, що доповнено необхідними крайовими умовами. Для розрахунку радіаційного теплообміну застосовано резольвентно-зональний метод.

Разработана математическая модель температурного режима стакана-коллектора ковшового шибєрного затвора при различных способах разлива стали. Температурное поле конструкции описывается нелинейным дифференциальным уравнением теплопроводности, дополненным необходимыми краевыми условиями. Для расчета радиационного теплообмена применен резольвентно-зональный метод.

There was designed the mathematical model of temperature rate of glass-collector of the gate surface under different ways of steel casting. The temperature field of gate was described by non-linear differential equation of heat conduction, supplemented with necessary boundary conditions. The calculation of radiation heat exchange was made in the base of resolvent-zone method.

 a – поглотательная способность; c – удельная теплоёмкость; q – плотность теплового потока; r – радиальная координата; T – температура; T_0 – температура окружающей среды; z – осевая координата; α – местный коэффициент теплоотдачи; α – средний по поверхности коэффициент теплоотдачи; Φ – разрешающий угловой коэффициент излучения; λ – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана; τ – время; ζ – логический коэффициент (принимает значения 0 и 1).**Индексы:** bot – нижний; ext – наружный; int – внутренний; top – верхний; k – конвективный; r – радиационный; z – зеркало металла; Me – металл; c – струя металла.**Сокращения:**

МНЛЗ – машина непрерывного литья заготовок.

Разливка стали, как заключительный этап сталеплавильного производства, оказывает существенное влияние на его эффективность, поскольку достигнутые в процессе выплавки и внепечной обработки металла положительные показатели могут быть утрачены, если не обеспечиваются соответствующие условия реализации технологии регулируемой разлива металла из ковша. Дозированный выпуск стали из ковша осуществляется с помощью затворов, в основ-

ном, шибєрного (скользящего) типа. Огнеупоры ковшового затвора должны обеспечивать надлежащие эксплуатационные характеристики устройства в условиях воздействия высоких температур и циклических термосмен [1].

В работе [2] разработана математическая модель температурного состояния ковшового шибєрного затвора, позволяющая оценить пространственное температурное поле огнеупорных плит и окаймляющего их стального корпуса с

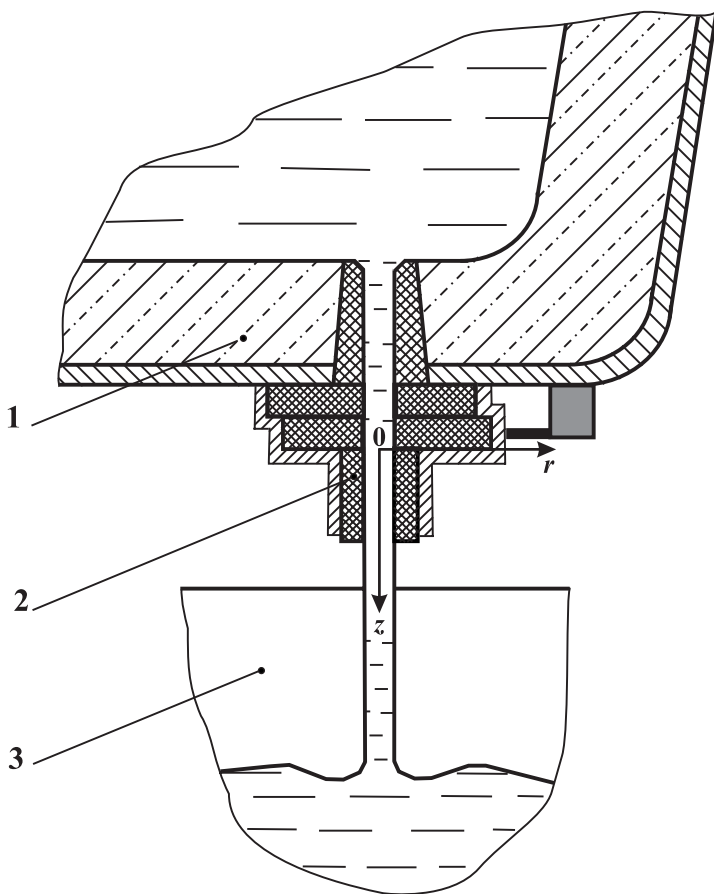


Рис. 1. Схема бесстопорной разливки стали и принятая в расчете система координат: 1 – сталеулиточный ковш; 2 – стакан-коллектор шибера затвора; 3 – металлоприемник.

обеспечением адекватности полученных результатов численного и промышленного экспериментов. Поскольку указанная математическая модель адаптировалась к условиям разливки стали в изложницы сверху, то ее реализация для прочих способов разливки потребовала внесения некоторых существенных корректировок [3]. Кроме этого, в уточненной и унифицированной модели [3] реализовано решение фундаментальной задачи радиационного теплообмена в прозрачной (диатермичной) системе излучающих диффузно-серых поверхностей сложной геометрии: затвор–струя–зеркало металла [4].

Предложенная математическая модель [3] температурного режима ковшового шибера затвора не рассматривает стакан-коллектор – неотъемлемую часть устройства.

Сложность расчета теплового режима стакана-коллектора обусловлена, также как и в [3], необходимостью решения фундаментальной задачи радиационного теплообмена в системе трех диффузно-серых излучающих поверхностей [5]. Так, в случае теплообмена наружной торцовой поверхности стакана-коллектора эта система включает струю и зеркало металла в металлоприемнике, а в случае наружной боковой поверхности устройства – зеркало металла и нижнюю поверхность корпуса плит затвора (рис. 1).

В настоящей работе разработана и реализована математическая модель температурного режима стакана-коллектора шибера затвора сталеулиточного ковша при различных способах разливки металла (в изложницы сверху, сифонная и непрерывная разливка на МНЛЗ) с учетом всех, описанных выше, наработок.

При постановке задачи сделаны следующие допущения.

Процесс разливки условно разделен на два периода: собственно разливка и закрытое состояние затвора. Продолжительность каждого из указанных периодов, а также количество этих циклов определяется способом разливки и технологической инструкцией.

Принято, что металлический гарнисаж на поверхности стакана-коллектора отсутствует, экранирование а также принудительное охлаждение конструкции не используется, и на протяжении всего процесса разливки на наружной поверхности устройства имеет место сложный радиационно-конвективный теплообмен. На поверхности стакана-коллектора, соприкасающейся с огнеупорной плитой затвора, принимается равенство теплового потока нулю [2, 3]. В сталеулиточном канале при открытом затворе учитывается теплоотдача при турбулентном течении металла, при закрытом затворе канал считается теплоизолированным.

Стакан-коллектор имеет осесимметричную конфигурацию и рассматривается как полый двухслойный (огнеупорный стакан в стальной обойме коллектородержателя) цилиндр. Следовательно, задача решается в цилиндрической системе координат (см. рис. 1).

Уравнение теплопроводности

$$c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (1)$$

описывающее нестационарное температурное поле конструкции, дополнено следующими граничными условиями:

$$(\partial T / \partial z)_{top} = 0, \quad (2)$$

$$-\lambda(\partial T / \partial z)_{bot} = [\bar{\alpha}_{botk} + (1 - \zeta)\bar{\alpha}_{botr}](T_{bot} - T_0) + \zeta\alpha_{botr}(T_{bot} - T_{Me}), \quad (3)$$

$$-\lambda(\partial T / \partial r)_{int} = \zeta\bar{\alpha}_{Me}(T_{int} - T_{Me}), \quad (4)$$

$$-\lambda(\partial T / \partial r)_{ext} = [\bar{\alpha}_{extk} + (1 - \zeta)\bar{\alpha}_{extr}](T_{ext} - T_0) + \zeta\alpha_{extr}(T_{ext} - T_{Me}). \quad (5)$$

В системе уравнений (2)–(5) присутствует логический коэффициент ζ , принимающий значения 1 (собственно разливка стали) или 0 (закрытое состояние затвора). Тем самым моделируется текущий период операции, в том числе и переезд сталеразливочного ковша между изложницами (при верхней разливке) или поддонами (при разливке стали сифоном), когда граничные условия теплообмена III рода в сталеразливочном канале устройства переходят в граничные условия II рода (теплоизоляция) (см. уравнение (4) при значении $\zeta = 0$). При непрерывной разливке металла $\zeta = 1$ на протяжении всего процесса перелива металла из сталь-ковша в промежуточный ковш. В периоды оборота ковша и выпуска металла из сталеплавильного агрегата коэффициент ζ равен нулю.

При закрытом затворе расчет лучистого теплообмена редуцируется в классическую задачу теплообмена излучением между невогнутой серой поверхностью стакана-коллектора и облегающей ее серой поверхностью окружающих конструкций, которые вместе образуют замкнутую систему (см. уравнения (3) и (5) при значении $\zeta = 0$).

Методика расчета средних по поверхности коэффициентов конвективного — $\bar{\alpha}_k$ и радиационного теплообмена — $\bar{\alpha}_r$, а также средней теплоотдачи ($\bar{\alpha}_{Me}$) при турбулентном течении металла в разливочном канале устройства подробно рассмотрена в работе [2]. Здесь же собраны все необ-

ходимые для расчета физические свойства теплоносителей и материалов устройства.

При открытом затворе задача исследования лучистого теплообмена в сложной системе серых излучающих поверхностей: стакан-коллектор—струя—зеркало металла значительно усложняется.

Для расчета среднезональной плотности потока результирующего излучения в диатермичной среде для исследуемых излучающих диффузно-серых поверхностей стакана-коллектора применен резольвентно-зональный метод [6]. Так называемые зональные методы основываются на замене непрерывного распределения температуры и радиационных свойств излучающей системы дискретным. При этом поле указанных характеристик считается состоящим из конечного числа термически и оптически однородных участков (тел, зон, элементов). Это весьма удобно при сеточном решении уравнения Фурье (1).

В работе [5] показано, что среднезональная плотность потока результирующего излучения для кольцевого элемента на торцевой поверхности стакана-коллектора может быть определена по формуле:

$$q_{botr} = \sigma_0 a_{bot} a_{Me} (\Phi_{bot \rightarrow c} + \Phi_{bot \rightarrow z}) (T_{Me}^4 - T_{bot}^4), \quad (6)$$

а для кольцевого элемента на боковой поверхности стакана-коллектора — по формуле

$$q_{extr} = \sigma_0 a_{ext} a_{Me} \Phi_{ext \rightarrow z} (T_{Me}^4 - T_{ext}^4). \quad (7)$$

При этом [5], вычисление разрешающих угловых коэффициентов в системе поверхностей стакан-коллектор—струя—зеркало металла сводится к нахождению угловых коэффициентов — геометрических инвариантов излучения — и ведется по методике [6, 7].

Аддитивная неявная разностная схема получена интегро-интерполяционным методом с реализацией на ПЭВМ методом прогонки [8] применительно к условиям разливки стали из 250-тонных ковшей в конвертерном цехе Днепровского металлургического комбината.

Так, приведенный диаметр нижней поверхности ковшового затвора (490x240 мм) составляет

здесь величину 0,366 м. Высота стакана-коллектора равна 0,24, а наружный диаметр коллектородержателя – 0,2 м. Диаметр струи принимается одинаковым по всей длине и равным диаметру сталеразливочного отверстия в стакане-коллекторе – 0,06 м.

Остальные исходные данные определяются способом разлива стали (приняты в соответствии с технологической инструкцией и практикой разлива стали в конвертерном цехе).

Разливка в изложницы сверху: разливается 32 слитка; время наполнения тела слитка – 1,5 мин; время переезда ковша – 10 с; расстояние между срезом стакана-коллектора и поверхностью металла в изложнице изменяется в диапазоне 0,2...2,5 м (верхний предел соответствует начальному, а нижний – конечному этапу наполнения изложницы); средний приведенный диаметр зеркала металла равен 0,7 м.

Разливка в изложницы сифоном: сталь разливается в слитки на 6 поддонах; время наполнения тела слитка – 8 мин; время переезда ковша – 30 с; расстояние между срезом стакана-коллектора и огнеупорной воронкой в центральной составляет примерно 0,2 м.

Поверхность зеркала металла под ковшом отсутствует и уравнение (6) для торцевой поверхности стакана-коллектора преобразовываются к виду [6]:

$$q_{bot,r} = \sigma_0 a_{bot} a_{Me} \Phi_{bot \rightarrow c} (T_{Me}^4 - T_{bot}^4).$$

Для боковой поверхности при этом $q_{ext,r} = 0$.

Непрерывная разливка: время перелива металла из сталеразливочного ковша в промковш составляет 70 мин; расстояние между срезом стакана-коллектора и поверхностью металла в промковше составляет в среднем 0,7 м; диаметр бесшлаковой зоны вокруг струи в промежуточном ковше принимается в среднем 0,4 м.

В настоящей работе исследован температурный режим периклазо-графитового стакана-коллектора при различных способах разлива стали марки 45тр, для которой температура металла в стальковше перед разливкой составляет 1540 (верхняя) и 1550 °С (сифонная и непрерывная разливка).

Как показали предварительные расчеты [5], максимально подвержена воздействию тепलो-

го излучения торцевая часть стакана-коллектора. Наибольшие значения интенсивности радиационного теплообмена для этой поверхности имеют место при разливке стали сверху и, главным образом, на завершающей стадии наполнения изложницы, когда расстояние между ковшом и зеркалом металла в изложнице минимально. Плотность потока результирующего излучения может составлять в этот период величину 40...80 кВт/м² в зависимости от температуры теплопоглощающей поверхности и радиального расстояния от сталевыпускного отверстия стакана-коллектора. При непрерывной разливке $q_{bot,r}$ для рассматриваемой поверхности принимает значения соответственно 10...30, а при сифонной разливке – 5...25 кВт/м².

Немаловажным фактором, обуславливающим нагрев стакана-коллектора при разливке стали, является открытая поверхность струи и, особенно, при разливке сифоном, когда интенсивность потока результирующего излучения для торцевой поверхности определяется в целом радиационным теплообменом с открытой поверхностью струи.

Радиационный теплообмен наружной поверхности стакана-коллектора оказывает определенное влияние на нагрев устройства лишь при разливке стали сверху и только на завершающей стадии наполнения изложницы, когда $q_{ext,r}$ принимает значения 5...20 Вт/м² в зависимости от месторасположения расчетного кольцевого элемента. В то же время значения плотности потока результирующего излучения при разливке на МНЛЗ имеют величину порядка 1102...2102, а на начальной стадии разлива сверху – 1101...1102 Вт/м², т.е. весьма малы и могут при моделировании не учитываться.

В любом случае, даже в условиях циклического перекрытия канала и дросселирования струи, основной вклад в нагрев устройства во время разлива вносит вынужденная конвекция жидкого металла при турбулентном течении в сталеразливочном канале стакана-коллектора.

Полученные результаты расчетов (рис. 2), как и прогнозировалось, свидетельствуют о том, что стакан-коллектор шибера затвора наиболее подвержен высокотемпературному эксплуатационному воздействию при непрерывной разливке и менее всего – при разливке стали сифоном. Это связано как с различной продолжительностью

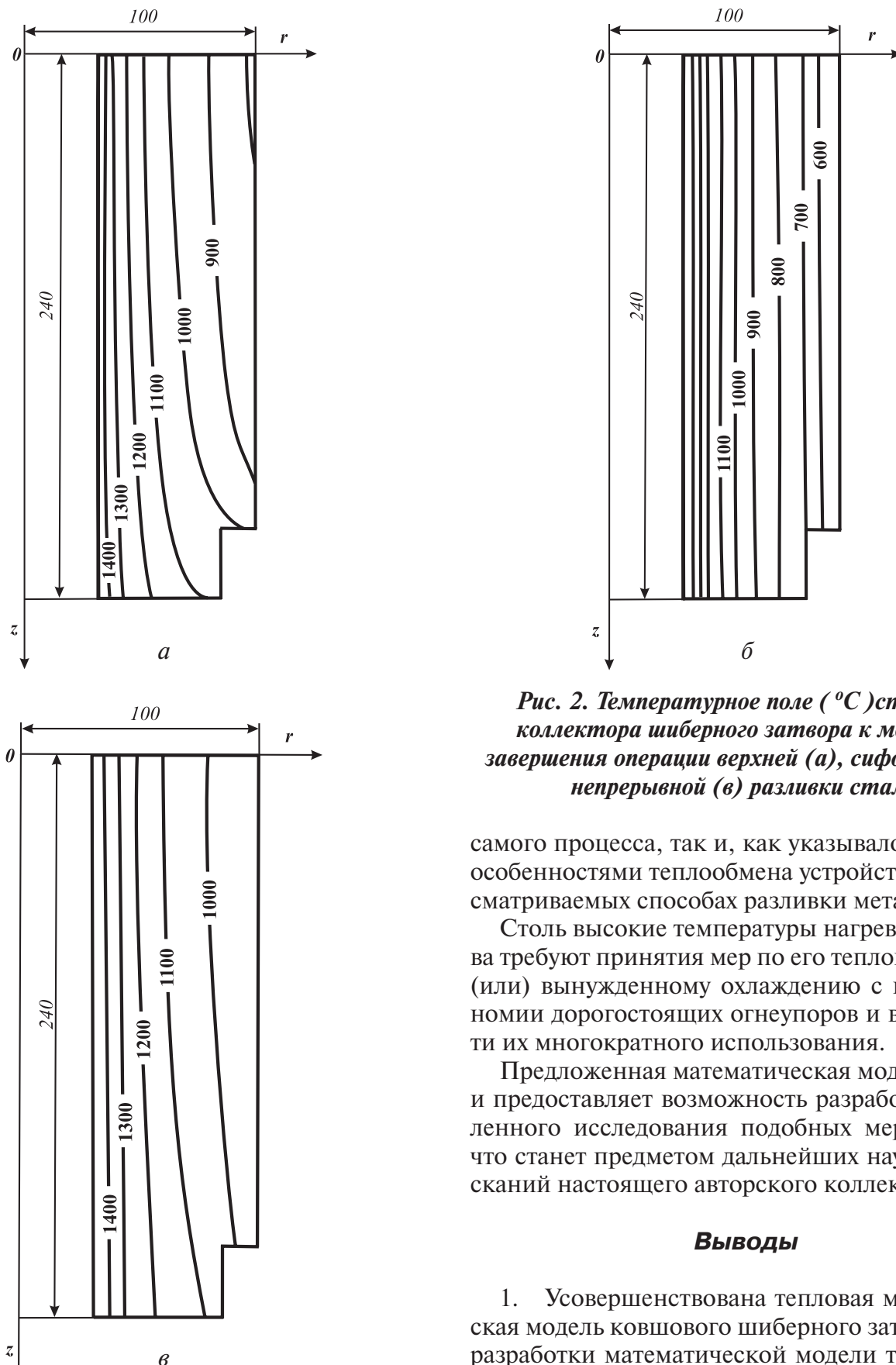


Рис. 2. Температурное поле ($^{\circ}\text{C}$) стакана-коллектора шиберного затвора к моменту завершения операции верхней (а), сифонной (б) и непрерывной (в) разливки стали.

самого процесса, так и, как указывалось выше, с особенностями теплообмена устройства при рассматриваемых способах разливки металла.

Столь высокие температуры нагрева устройства требуют принятия мер по его теплоизоляции и (или) вынужденному охлаждению с целью экономии дорогостоящих огнеупоров и возможности их многократного использования.

Предложенная математическая модель как раз и предоставляет возможность разработки и численного исследования подобных мероприятий, что станет предметом дальнейших научных изысканий настоящего авторского коллектива.

Выводы

1. Усовершенствована тепловая математическая модель ковшового шиберного затвора путем разработки математической модели температур-

ного режима стакана-коллектора; в итоге удалось обеспечить более приемлемую адекватность результатов моделирования.

2. Проведен численный эксперимент и краткий сравнительный анализ результатов моделирования для конкретных производственных условий разливки стали.

3. Полученные результаты использованы при расчете и разработке новой конструкции шиберного затвора с малогабаритными огнеупорными плитами для конвертерного цеха Днепровского металлургического комбината.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Еронько С.П., Быковских С.В.* Разливка стали: Технология. Оборудование.— К.: Техника, 2003.— 216с.
2. *Кулик А.Д., Огурцов А.П., Жульковский О.А.* Математическая модель температурного состояния шиберного затвора// Изв. вузов. Черная металлургия.— 1999. — №4.— С.12-15.
3. *Огурцов А.П., Жульковская И.И., Кулик А.Д.* Расчет температурного состояния ковшового шиберного затвора при различных способах разливки стали// Изв. вузов. Черная металлургия.— 2001. — №4.— С.11-15.
4. *Огурцов А.П., Жульковская И.И., Кулик А.Д.* Расчет радиационного теплообмена на поверхности ковшового затвора// Пром. теплотехника.— 2000.— Т.22, №3.— С.5-8.
5. *Огурцов А.П., Жульковская И.И.* К расчету радиационного теплообмена поверхности ковшового затвора (стакана-коллектора)// Математичне моделювання.— 2000.— №2.— С.72-75.
6. *Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н.* Теплообмен излучением: Справочник.— М.: Энергоатомиздат, 1991.— 432с.
7. *Зигель Р., Хауэлл Дж.* Теплообмен излучением/ Пер. с англ. под ред. Б.А.Хрусталева.— М.: Мир, 1975.— 934с.
8. *Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В.* Применение ЭВМ для решения задач теплообмена.— М.: Высш. шк., 1990.— 207с.

Получено 23.05.2006 г.