

8. Высокомагнезиальные флюсы для сталеплавильного производства / К.Н. Демидов [и др.]. – Екатеринбург: Уральский рабочий, 2013. – 280 с.

9. Дидковский, В.К. Использование магнезиальных шлакообразующих материалов для повышения стойкости футеровки кислородных конвертеров / В.К. Дидковский, Е.В. Третьяков. – М.: Черметинформация, 1985. – 23 с.

10. Формирование гарнисажа магнезиальных шлаков на футеровке большегрузных конвертеров / А.В. Амелин [и др.] // Сталь. – 2014. – № 7. – С. 22–25.

11. Оценка влияния агрессивности технологических факторов на износ алюмопериклазоуглеродистых изделий, применяемых в футеровке сталеразливочного ковша / А.А. Метелкин [и др.] // Сталь. – 2013. – № 5. – С. 29–31.

12. XI Международная конференция огнеупорщиков и металлургов в Москве // Сталь. – 2013. – № 7. – С. 29–32.

УДК 621.78.012.5

П.Ю. ЦЫКУНОВ,
И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук,
И.В. РАФАЛЬСКИЙ, канд. техн. наук (БНТУ)

ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ ЗАГОТОВОК РАЗЛИЧНОЙ ФОРМЫ

Математическое моделирование процессов индукционного нагрева металлических заготовок является важнейшим этапом проектирования индукционных нагревателей, а также плавильных печей. На этапе моделирования, как правило, рассматривают различные комбинации входных параметров индукционного нагрева (полезная мощность, частота тока и др.), оценивают распределение температуры на различных этапах нагрева и возникающие температурные напряжения в заготовках и изделиях. Конечным этапом моделирования может быть определение времени нагрева при заданных теплофизических свойствах нагреваемых заготовок и их геометрической формы, или же решение обратной задачи – подбор

материала и формы заготовки под заданную производительность установки.

Следует отметить, что создание специальных программных модулей позволяет решать поставленные задачи с достаточной степенью оперативности и точности. В работах [1, 2] приведена математическая модель для нагрева ограниченных цилиндрических заготовок, положенная в основу создания программного модуля. В дальнейшем выполнена модификация программного модуля по следующим направлениям:

- использован более совершенный метод расчета нагрева (плавления) цилиндрических заготовок (взамен конечно-разностного точного применены угловые координаты);
- добавлена возможность расчета заготовок прямоугольного сечения;
- рассмотрен расчет нагрева (плавления) полых заготовок круглого и прямоугольного сечения;
- реализована база данных материалов с возможностью внесения новых элементов в эту базу;
- для упрощения расчетов введено изменение шага по координате;
- графическая модель температурного поля перенесена в реальное время;
- добавлена возможность определения температуры в любой точке заготовки;
- реализован новый принцип расчета полезной мощности индуктора и т.д.

Нагрев заготовок круглого сечения был реализован с использованием численных методов решения задачи на основе модели нагрева, приведенной в работе [3]:

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\left(\frac{\partial}{\partial r}\lambda(T)r\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial \varphi}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right); \quad (1)$$

$$T = T(r; \theta; z; 0); \quad \begin{cases} 0 < r < R; 0 \leq \varphi \leq \pi; \\ 0 \leq z \leq h; \tau \geq 0, \end{cases} \quad (2)$$

где T – температура в точке; r, θ, z – текущие значения радиуса, угла, продольного размера соответственно; $\rho(T), c(T), \lambda(T)$ – функции плотности, теплоемкости, теплопроводности материала.

Граничные условия формируются исходя из понятия о скин-слое заготовки. В результате эффекта уменьшения амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения вглубь проводящей среды, переменный ток высокой частоты при протекании по проводнику распределяется не равномерно по сечению, а преимущественно в поверхностном слое (скин-слое). Т.к. этот слой очень тонкий, то, пренебрегая его толщиной, получим начальное значение температуры T_1 на поверхности заготовки.

Зная мощность P (Вт), генерируемую в скин-слое, рассчитанную ниже, при условии, что момент времени η равен единице, получим следующие выражения

$$Q_{\Delta} = P\eta; \quad (3)$$

$$Q_{\Delta} = P, \quad (4)$$

где Q_{Δ} – количество теплоты, генерируемое в скин-слое, Дж.

Тогда, зная начальную температуру заготовки T_0 (К), получим искомое значение T_1

$$(T_1 - T_0) = \Delta T = \frac{Q_{\Delta}}{cm_{\Delta}}, \quad (5)$$

где c – теплоемкость материала заготовки, Дж/(кг·К); m_{Δ} – масса скин-слоя, кг.

Масса скин-слоя рассчитывается по формуле

$$m_{\Delta} = \frac{\pi}{4} [R^2 - (R - \Delta)^2] L \rho, \quad (6)$$

где R – радиус заготовки, м; Δ – глубина скин-слоя, м; L – высота заготовки, м; ρ – плотность материала заготовки, кг/м³.

Более детальное описание модели приведено в работе [2].

При использовании программного модуля рассмотрены такие аспекты нагрева металлических заготовок, как:

- влияние толщины скин-слоя на нагрев полых заготовок;
- влияние геометрических размеров полых заготовок на конечную скорость и режим нагрева;
- зависимость режима нагрева от свойств материала загрузки для полых заготовок по сравнению со сплошными заготовками;
- нагрев полых заготовок прямоугольного профиля.

Начальная стадия работы программы представлена на рисунке 1. Чтобы начать расчет заготовки, необходимо выбрать материал и параметры системы «индуктор–загрузка».

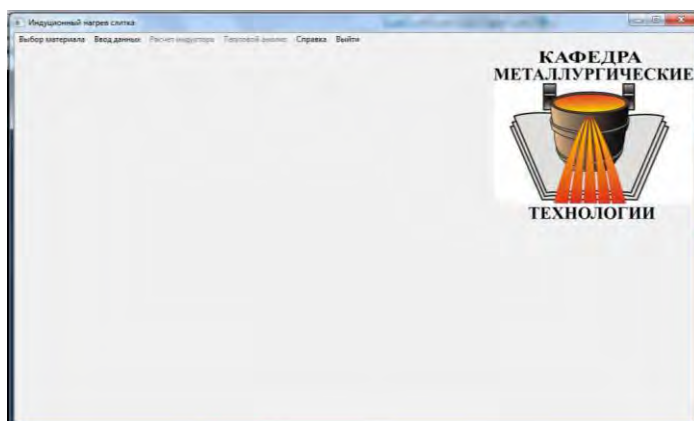


Рисунок 1 – Стартовое окно программы

Выбор материала осуществляется в первой вкладке с одноименным названием (рисунок 2). В открывшемся окне представлены три области ввода: профиль заготовки, выбор материала, выбор свойств материала. В области выбора профиля заготовки можно выбрать сам профиль заготовки, а также ее геометрические размеры. Специальная иллюстрация позволит корректно ввести значения величин в миллиметрах. На рисунке 3 представлены возможные профили ввода.

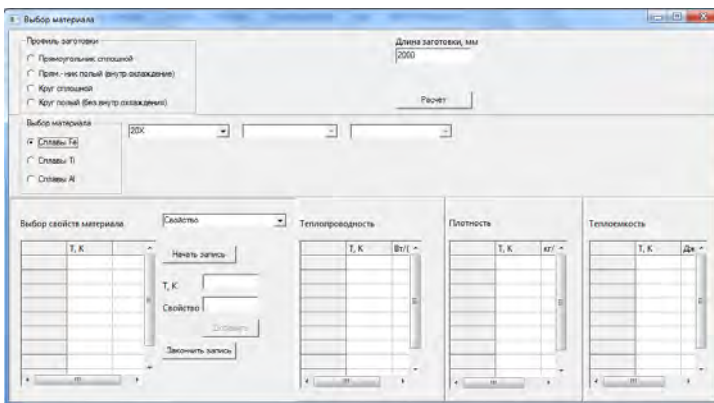


Рисунок 2 – Окно выбора материала заготовки

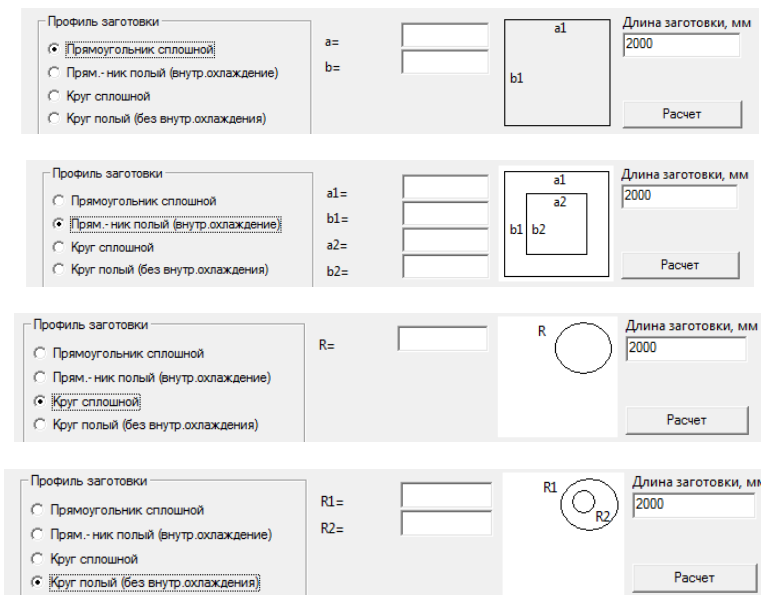


Рисунок 3 – Варианты профиля рассчитываемой заготовки

После выбора профиля и материала кнопкой «Расчет» переходим к дальнейшему вводу данных (рисунок 4). В области «Индуктор» необходимо ввести параметры нагрева: частоту электромагнитного

поля, полезную (именно полезную, что очень важно) мощность и свойства материала катушки.

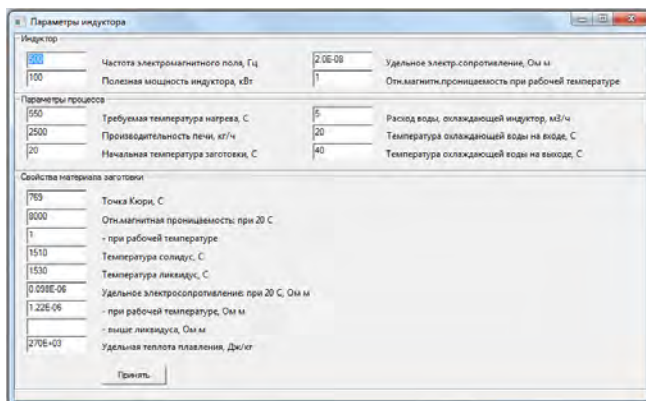


Рисунок 4 – Вид окна «Параметры индуктора»

В области «параметры процесса» вводятся предполагаемые данные выбираемой индукционной установки для расчета полной мощности установки.

После ввода данных можно оценить первичную информацию по индукционной установке (мощность, высота индуктора) и характеристиках процесса нагрева выбором «Расчет индуктора» (рисунок 5) в главном окне.

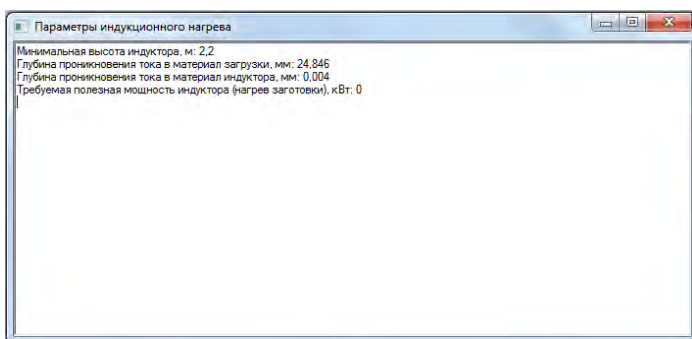


Рисунок 5 – Предварительные параметры индукционной установки и нагрева

Расчет производится во вкладке «Тепловой анализ», скриншот которой до начала расчета представлен на рисунке 6. Перед началом непосредственно расчета можно задать шаг расчета (с ростом шага будет расти погрешность) и конечное время расчета, указав секунды в соответствующем поле. Используя окно «Усредненные свойства стали», можно снизить нагрузку на процессор и ускорить расчет.

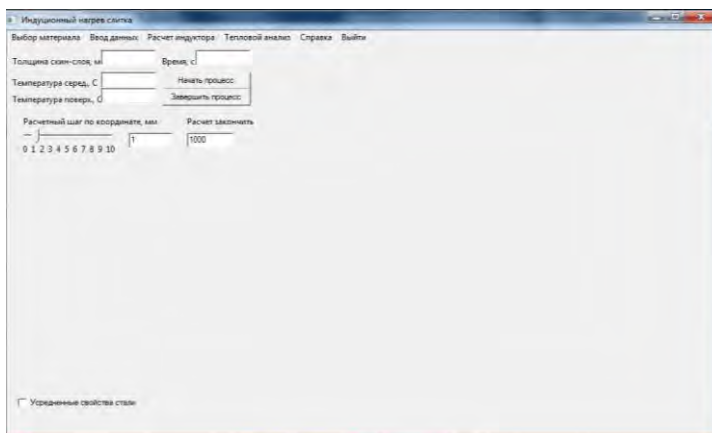


Рисунок 6 – Окно программ до начала теплового анализа

Окно программы в режиме расчета представлено на рисунке 7. Кнопка «Построить график» позволяет строить температурное поле заготовки в момент времени, при котором была нажата кнопка. Кнопка «Завершить процесс» останавливает процесс расчета на текущем моменте времени. Повторное нажатие кнопки «Начать процесс» продолжит расчет с места прерывания.

Ниже представлены некоторые результаты расчета металлических заготовок различной формы с различными теплофизическими свойствами и режимами нагрева.

На рисунке 8 представлена зависимость толщины скин-слоя от частоты магнитного поля для различных материалов. Приведенную зависимость необходимо учитывать при выборе частоты нагрева для различных диаметров заготовки, т.к. чем меньше диаметр, тем

меньше будет толщина скин-слоя. В противном случае существует риск разрушения заготовки из-за большого перепада температур.

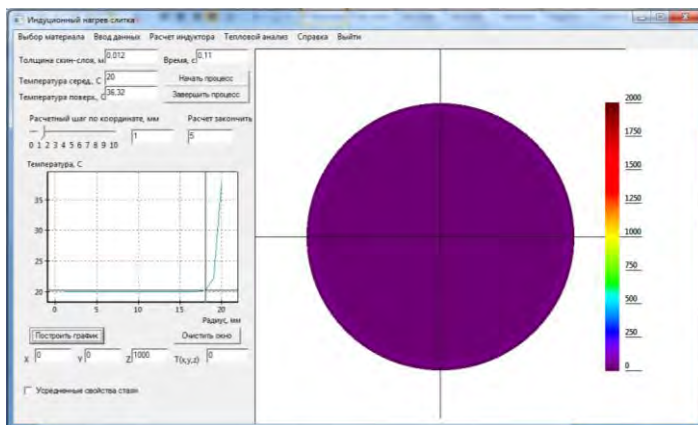


Рисунок 7 – Окно программы в процессе теплового анализа

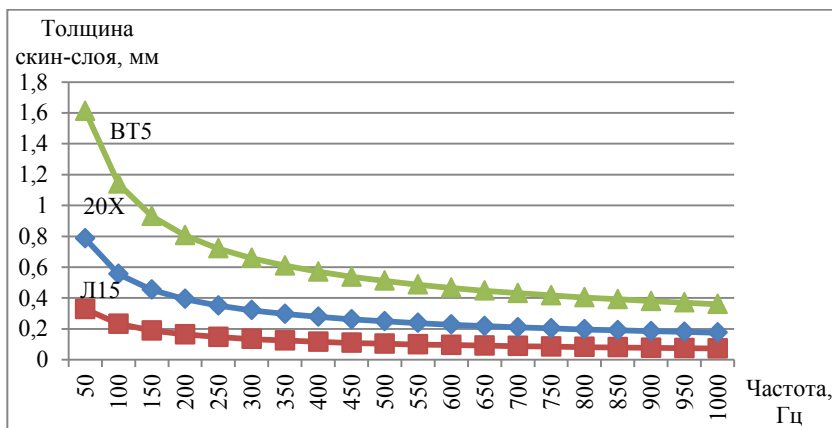


Рисунок 8 – Зависимость толщины скин-слоя от частоты электромагнитного поля

Необходимость правильного выбора частоты нагрева также обусловлена диаметром заготовки. Очевидно, что чем скин-слой больше (толще), тем больше энергии в нем аккумулируется. Следова-

тельно, нагрев заготовок будет идти более интенсивно. Так как затрачиваемая на нагрев мощность прямо пропорциональна массе и размерам заготовки, то целесообразно использовать понижение частоты электромагнитного поля с ростом диаметра заготовки. Однако не следует забывать, что нагрев skin-слоя происходит намного быстрее, чем остальной части заготовки. Значит, имеется вероятность повреждения заготовки из-за слишком большого температурного перепада. Аналогичным образом на вероятность повреждения влияет и подаваемая мощность.

На рисунке 9 представлена зависимость частоты прилагаемого электромагнитного поля в различные моменты времени для разных диаметров заготовки. Приведенный график наглядно демонстрирует, как следует выбирать частоту нагрева в зависимости от диаметра заготовки, и как это влияет на продолжительность нагрева.

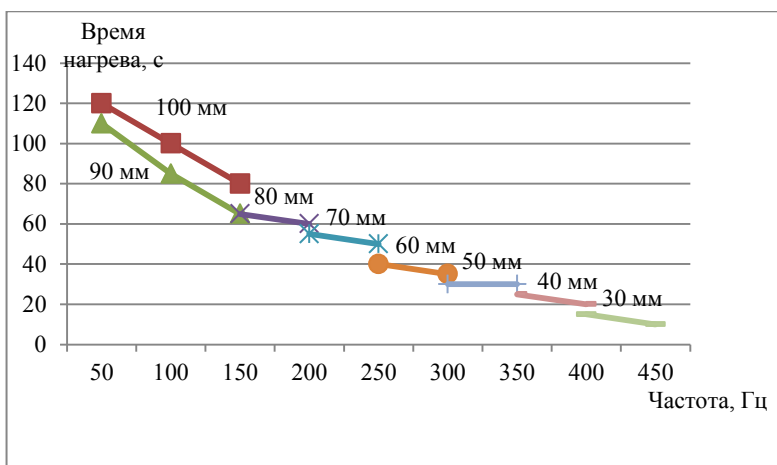


Рисунок 9 – Зависимость частоты магнитного поля от диаметра заготовки по конечному времени нагрева (мощность 50 кВт, марка стали – 15Л)

Рациональные режимы нагрева заготовок из различных сплавов с учетом оптимальной мощности, прилагаемой к заготовке, приведены в таблице 1.

При нагреве трубных заготовок учитывали, что основной особенностью является гораздо меньший нагреваемый объем, в сравнении со сплошной цилиндрической формой. Поэтому нагрев тру-

бы по параметрам сравним со сплошными заготовками малого диаметра. В связи с этим нагревающий скин-слой должен быть тонким, что в свою очередь ведет к росту частоты пропорционально уменьшению толщины трубы. Очевидно, что будет снижаться и мощность, затрачиваемая на нагрев.

Таблица 1 – Оптимальные параметры нагрева заготовок

Марка материала	Диаметр заготовки, мм	Длина заготовки, мм	Частота нагрева, Гц	Время нагрева, с	Полезная мощность, кВт
15Л	42	400	500	60	30
20Х	40	400	10000	30	20
ВТ5	15	400	20000	25	20

Для упрощения анализа и выбора индукционных установок можно считать трубные заготовки заготовками малого диаметра, т.е. приравнивать толщину стенки трубы к радиусу тонкого цилиндра. В то же время необходимо помнить, что мощность накапливается в поверхностном слое, тогда в данном сравнении не должна фигурировать полезная мощность.

Использование низких частот, т.е. приближение толщины скин-слоя к толщине трубы нецелесообразно, т.к. потери энергии будут велики, а излишне быстрый и непропорциональный нагрев приведет к деформации заготовки.

Результаты расчетов показали, что для трубы конечный температурный перепад не так важен, как для сплошного цилиндра. По достижении конечного времени нагрева, к примеру, 1100 °С, температура будет выравниваться быстрее, т.к. весь нагреваемый слой металла достигнет уровня точки Кюри.

Помимо свойств на конечное время нагрева влияют также параметры системы «индуктор–загрузка» (частота, полезная мощность). На рисунке 10 представлены температурные поля трубы из сталей 30Х, 60С2А для различной мощности индуктора (момент времени – 10 с).

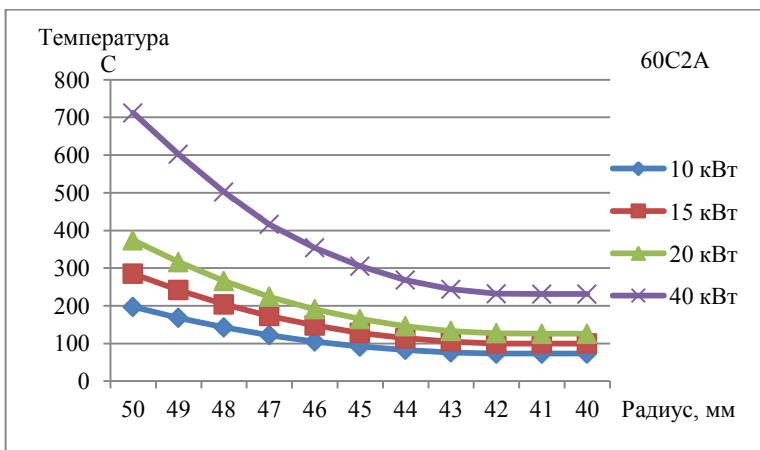
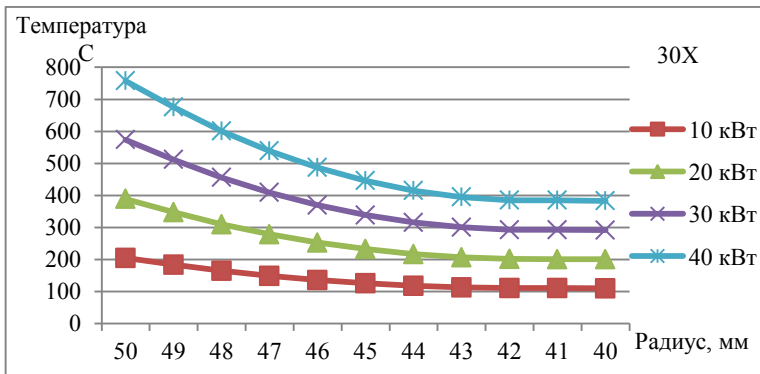


Рисунок 10 – Температурные поля трубных заготовок в различные моменты времени

Из графиков видна зависимость температурного перепада от полезной мощности, полученной заготовкой. Очевидна также независимость требуемой мощности от формы заготовки (сплошной или полый цилиндр). Однако в действительности следует учитывать, что нагреваемый объем, если сравнивать трубу и сплошной цилиндр, в первом случае меньше, что приводит к необходимости изменения мощности в меньшую сторону.

При тепловой обработке изделий из металлов и сплавов с высоким удельным сопротивлением, низкой плотностью и теплоемкостью (например, титановых сплавов), нагрев осуществляется с гораздо меньшей мощностью и большей частотой. Расчеты показали, что из-за низкой температуропроводности основным условием нагрева заготовок из таких сплавов является пониженная мощность и повышенная длительность нагрева во избежание высокого температурного перепада.

Индукционный нагрев прямоугольных заготовок отличается от нагрева цилиндрических заготовок повышенной площадью нагрева, что обусловлено наличием углов. Поэтому применение низких частот с высокой толщиной скин-слоя недопустимо во избежание разрушения заготовки. Распределение температуры внутри прямоугольных заготовок имеет форму эллипса или круга в зависимости от соотношения сторон.

Очевидно, что нагрев прямоугольных заготовок осуществляется быстрее из-за некоторой неравномерности нагрева и повышенной площади концентрации тепла. Но требуется понижение мощности для достижения заданной температуры.

Литература

1. Сборник статей лауреатов и авторов научных работ, получивших первую категорию [Электронный ресурс] / БГУ. – Минск, 2014. – Режим доступа: <http://www.sws.bsu.by/RespKonk.htm>. – Дата доступа: 01.11.2015.

2. Цыкунов, П.Ю. Математическая модель индукционного нагрева ограниченных цилиндрических заготовок / П.Ю. Цыкунов, И.А. Трусова, И.В. Рафальский // Новые материалы и технологии их обработки: сб. науч. работ XVII Республ. студ. науч.-техн. конф., Минск, 20–22 апреля 2016 г. / БНТУ. – Минск, 2016. – С. 119–120.

3. Тимошпольский, В.И. Кольцевые печи / В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, М.Я. Пекарский. – Минск : Высшая школа, 1993. – 248 с.