

УДК 621.31

В. Б. Демидович, А. И. Михлюк, В. В. Андрушкевич  
 Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
 университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Исследования одновременного способа индукционной термообработки труб большого диаметра

*Рассматривается одновременный способ индукционной термообработки труб большого диаметра. Исследуется влияние частоты, основных конструктивных параметров индукторов, скорости технологического возвратно-поступательного движения труб на энергетические показатели установки и температурное поле в трубе.*

### Термообработка труб, индукционный нагрев, возвратно-поступательное движение

Основными видами термической обработки труб являются отжиг, нормализация, закалка и закалка с отпуском. В последние годы доля термообработанных труб в общем их производстве резко возросла – это связано с интенсивным развитием областей промышленности, в которых предъявляются высокие требования к качеству труб.

Современная термообработка подразумевает строгое соблюдение режима нагрева, выдержки, контролируемого охлаждения и, возможно, повторного нагрева (рис. 1 представляет типичную форму температурного режима термообработки).

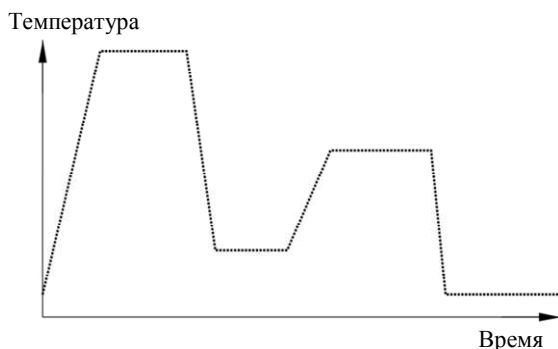


Рис. 1

В заводских условиях термическую обработку обычно выполняют в газовых пламенных или электрических печах. Выдержать необходимые режимы нагрева в газовых печах в силу их инерционности проблематично. К тому же продукты сгорания в пламенных печах содержат газы, которые взаимодействуют с металлом, что приводит к ухудшению его качества и уменьшению срока службы за счет окисления и обезуглероживания. В электрических индукционных печах и печах с

нагревателями сопротивления окисление и обезуглероживание происходят в меньшей степени, чем в пламенных [1]–[4]. Для труб небольшого диаметра наибольшее распространение получили индукционные установки непрерывного действия, когда легко реализуется режим «нагрев-охлаждение» с помощью непосредственного размещения зоны охлаждения за индуктором. Однако для труб большого диаметра реализация необходимого режима термообработки за счет пространственного распределения зон нагрева и охлаждения при постоянной скорости перемещения труб во многих случаях затруднительна и требует неоправданно больших мощностей нагрева. И в этом случае предпочтительно реализовывать периодический способ индукционной термообработки длинномерных труб, что обеспечивает гибкость при реализации режимов термообработки.

Данная статья посвящена исследованиям периодического индукционного нагрева труб большого диаметра из сталей аустенитного класса и высококачественных углеродистых сталей, выплавляемых дуплекс-процессом. Диаметр нагреваемых изделий – от 1016 до 1574.8 мм, толщина стенки – от 6 до 25 мм. Проводились численные исследования сквозного нагрева указанных труб до температур 800, 1000 и 1200 °С с максимально достижимой равномерностью распределения температуры как по длине заготовки, так и по толщине стенки.

Исследования проводились с помощью численного моделирования в среде анализа индукционных систем Universal 2D [5]. Целью расчетов была разработка рекомендаций для проектирова-

ния индукционной нагревательной установки труб длиной до 13 м с производительностью установки до 5 т/ч.

Индукционная нагревательная установка представляет собой систему из двенадцати цилиндрических индукторов. Между индукторами располагаются ролики, на которые загружается труба. Для обеспечения максимально однородного распределения температуры в конце нагрева труба совершает возвратно-поступательные движения по определенному алгоритму [6].

Первым этапом численного моделирования системы индуктор–заготовка стало определение оптимальной частоты тока для нагрева труб из всего требуемого диапазона. С этой целью были проведены численные эксперименты для определения зависимостей электрического КПД от частоты для нагрева заготовок из всего исследуемого сортамента. Расчет проводился для труб различного диаметра с различными толщинами стенок, что соответствовало в первом приближении параметрам реальных заготовок. Графики зависимостей электрического КПД от частоты представлены на рис. 2 (кривая 1 – труба 1525 × 25, зазор 100 мм; 2 – труба 1250 × 15, зазор 100 мм; 3 – труба 1250 × 15, зазор 235 мм; 4 – труба 1060 × 6, зазор 100 мм; 5 – труба 1060 × 6, зазор 200 мм; 6 – труба 1250 × 15, зазор 330 мм).

Все зависимости имеют максимумы, которые находятся в диапазоне 50...150 Гц.

В связи с большой площадью поверхности трубы, имеющей максимальный диаметр (около 65 м<sup>2</sup>), значительное влияние на возможность нагрева до требуемой температуры и эффективность нагрева оказывает тепловая изоляция. С этой целью проводились численные эксперименты по выяснению влияния толщины футеровки на тепловые потери. Расчеты проводились для трубы длиной 13 200 мм максимального из заданных диаметров 1575 мм при толщине стенки 25 мм на частоте тока 150 Гц. Материал трубы – немагнитная сталь. Нагрев трубы осуществлялся с возвратно-поступательным движением трубы в установке из 12 одинаковых индукторов: длина каждого индуктора по меди 800 мм, расстояние между индукторами 400 мм, общая длина нагревателя 14 000 мм. В качестве материала футеровки использовалась минеральная вата на основе муллитокремнеземистого волокна (МКРВ) с теплопроводностью 0.15 Вт/(м · °С) (МКРВ-200). К каждому индуктору подводилась мощность в диапазоне от 100 до 300 кВт. Рассматривался процесс нагрева до 1200 °С при различных толщинах футеровки и различной мощности, подводимой к индуктору (на рис. 3 представлена зависимость температуры трубы от времени нагрева при различных толщинах слоев футеровки из

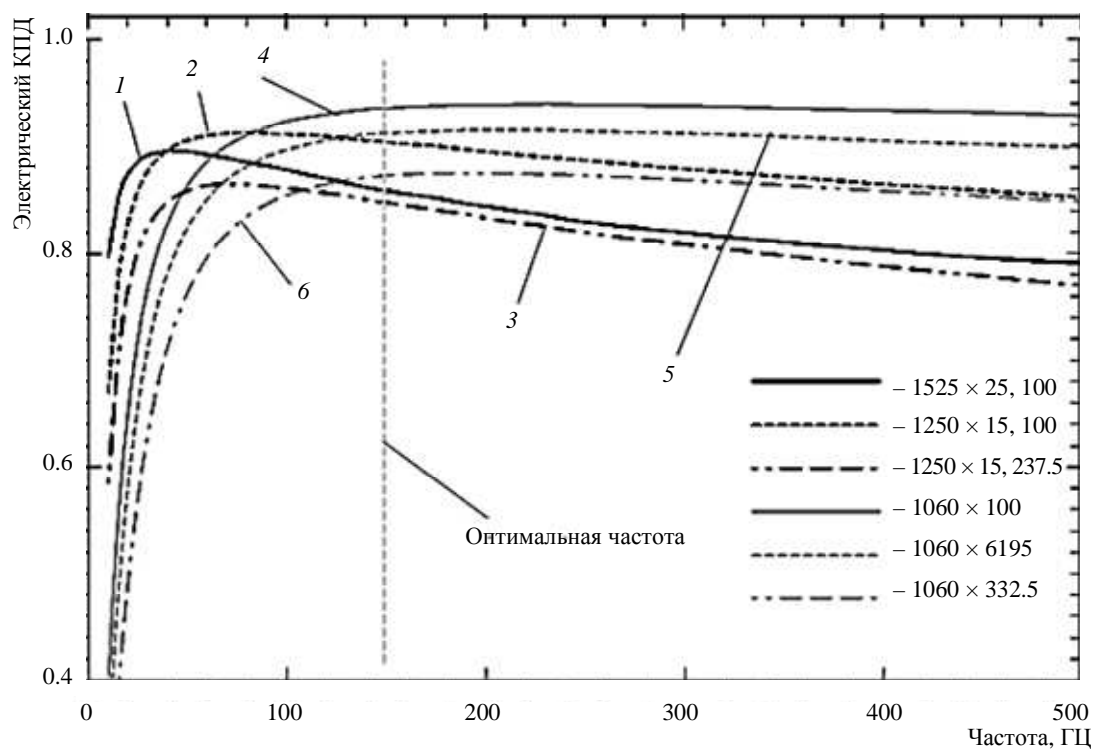


Рис. 2

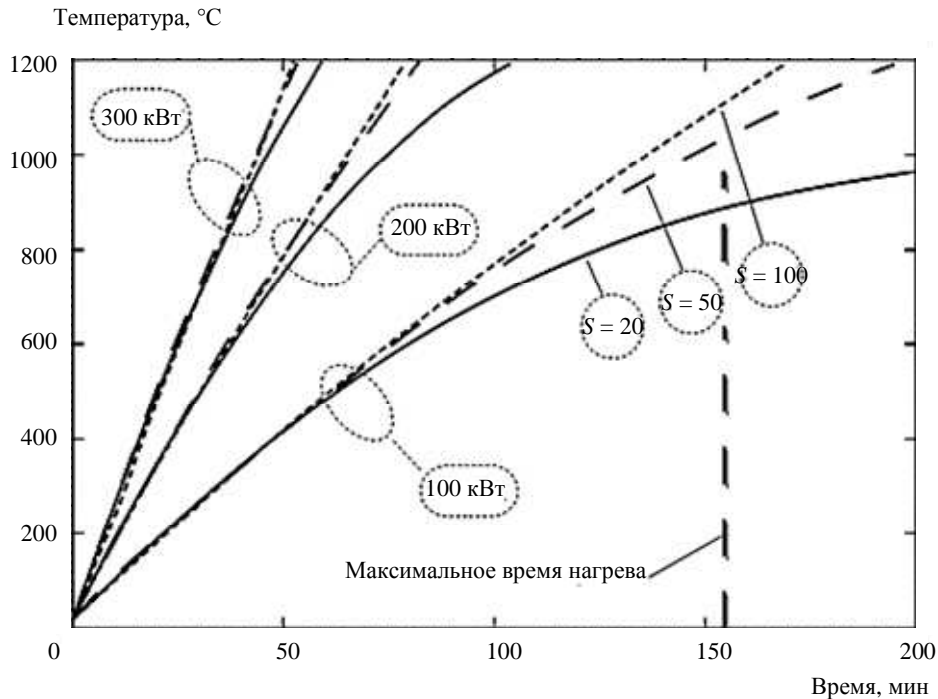


Рис. 3

МКРВ и различной мощности, подаваемой на индуктор). Вертикальная черта на рис. 3 показывает время нагрева для обеспечения необходимой производительности 5 т/ч. Рекомендуемая мощность каждого индуктора, необходимая для достижения заданной температуры, составляет около 200 кВт. Высокие энергетические показатели достигаются при толщине футеровки 50...60 мм.

Технология индукционного нагрева длинномерных труб с возвратно-поступательным движением приводит к периодически повторяющемуся температурному полю с температурным перепадом, зависящим от скорости движения трубы. Целью исследований служила определение скорости возвратно-поступательного движения, при которой температурный перепад снизится до приемлемых 10...20 °C. С этой целью были проведены численные исследования нагрева трубы 1575 × 25 длиной 13 200 мм до температуры 1200 °C при различной скорости движения. При скорости движения трубы 2 мм/с температурный перепад составлял 100 °C (на рис. 4 представлена зависимость перепада температуры по длине трубы в регулярной части от скорости). Увеличение скорости покачиваний до 5 мм/с позволило уменьшить температурный перепад до 20 °C. При дальнейшем увеличении скорости покачивания с шагом в 1 мм/с температурный перепад уменьшается с шагом 0,4 °C, т. е. зависимость температурного перепада от скорости покачивания становится линейной.

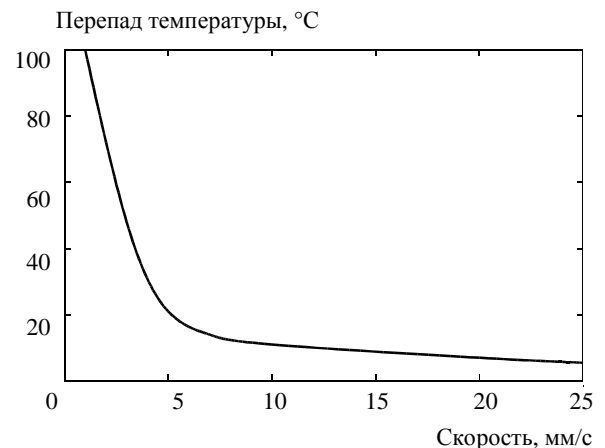


Рис. 4

Большое значение для практики индукционного нагрева труб с широкой номенклатурой диаметров труб имеет выбор количества сменных индукторов. Расчеты полного КПД, приведенные на рис. 5 (а — три сменных индуктора; б — два сменных индуктора; в — один сменный индуктор), показывают, что в одном индукторе невозможно нагреть с приемлемым КПД всю номенклатуру рассматриваемых труб. При двух сменных индукторах КПД при нагреве всей номенклатуры лежит в диапазоне 0,6...0,8, а при трех сменных индукторах — в диапазоне 0,67...0,8.

Примерное расположение и состав оборудования для рассмотренной системы представлен на рис. 6: 1 — система индукторов, образующих общую камеру; 2 — колесный рольганг (подача, вы-

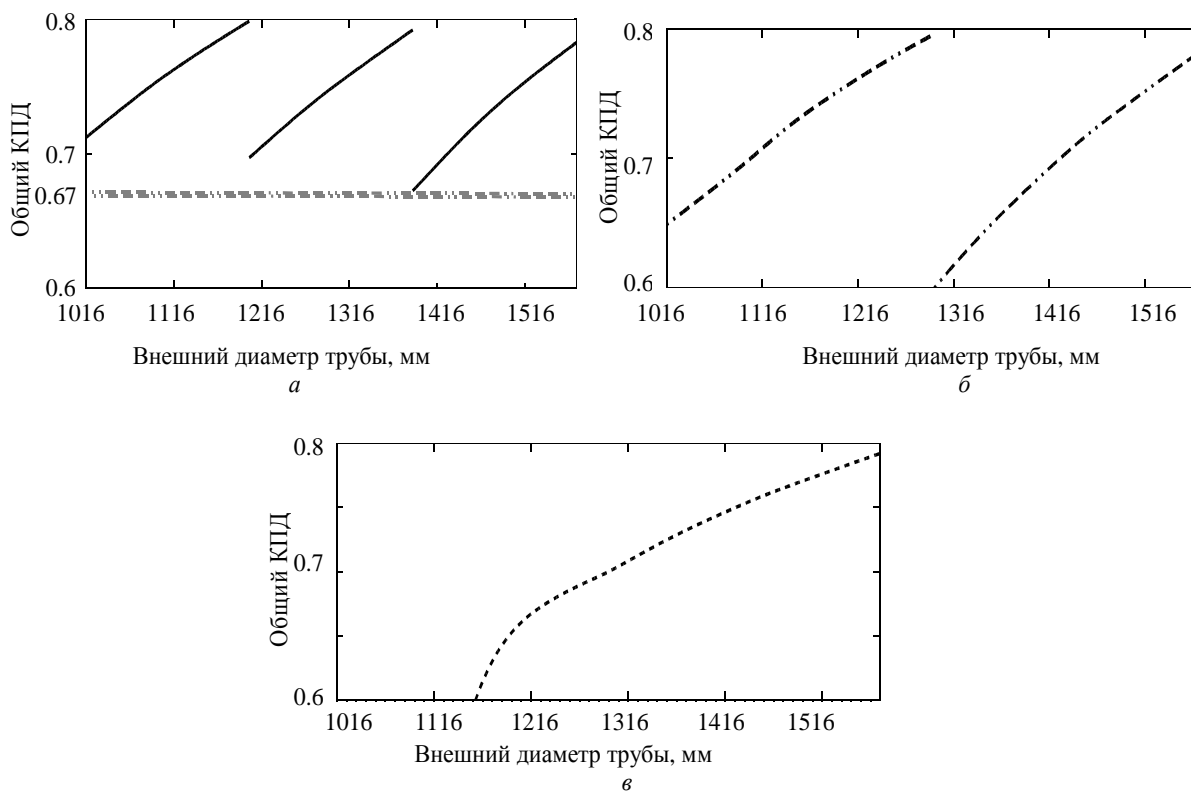


Рис. 5

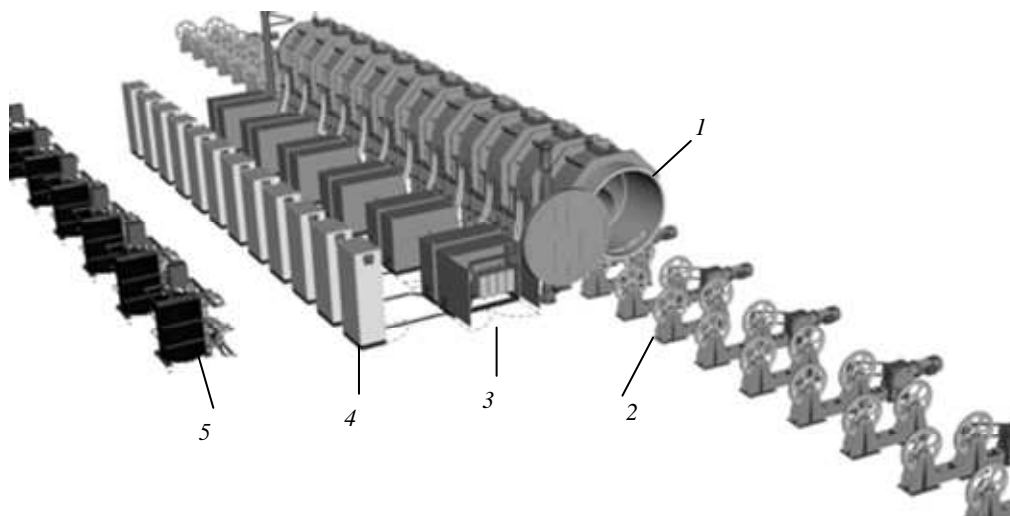


Рис. 6

дача, технологическое перемещение); 3 – батарея конденсаторов (12 шт.); 4 – преобразователи частоты (12 шт.); 5 – станция охлаждения). Данная схема позволяет перемещать трубу во время технологического процесса одновременно с вращением, что сильно уменьшает неизбежную неравномерность нагрева трубы связанную с «отсосом» теплоты в местах контакта ее поверхности с транспортными роликами. Практические значения скоростей перемещения трубы в данной конструкции больше представленных минимальных расчетных значений. Так, при угле косога колесного ролика  $5^\circ$ , диаметре колеса 750 мм и рабо-

чей частоте его оборотов  $10 \text{ мин}^{-1}$  скорость перемещения трубы составит около 2000 мм/мин (33.3 мм/с).

Выводы:

1. Для каждого диаметра и толщины стенки труб существует оптимальная частота тока, при которой достигается максимум электрического КПД. Поэтому при построении энергоэффективных систем индукционного нагрева труб особое внимание должно уделяться выбору частоты.

2. В условиях широкой номенклатуры диаметров и толщин стенки труб энергоэффективные сменные индукторы должны выбираться для гаран-

тии нагрева любой трубы с электрическим КПД не ниже 10–15 % от максимального.

3. При высокотемпературной термообработке из-за большой поверхности теплоизлучения особое внимание следует уделять выбору футеровки.

Поскольку температурные перепады по толщине стенки трубы обычно не ограничивают мощность, то выбор мощности индукторов определяется не только производительностью, но и требованием высокого термического КПД.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бернштейн М. Л., Рахштадт А. Г. *Металловедение и термическая обработка стали: справ. в 3 т.* М.: Металлургия, 1983. Т. 3. С. 87.
2. Антикайн П. А. *Металлы и расчет на прочность котлов и трубопроводов.* М.: Энергоатомиздат, 1990. Т. 3. С. 134–135.
3. Бодажков В. А. *Индукционный нагрев труб.* Л.: Машиностроение, 1989. 14 с.
4. Автоматизация технологических процессов индукционного нагрева длинномерных изделий перед прокаткой или с целью термической обработки / В. В. Андрушкевич, Г. П. Киреева, М. В. Севергин, А. А. Меркушев // *Индукционный нагрев.* 2009. № 1 (7). 42 с.
5. Демидович В. Б., Чмиленко Ф. В. *Численное моделирование устройств индукционного нагрева.* СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. 158 с.
6. Пат. № 2333618, РФ, МПК H05B 6/02. *Способ индукционного нагрева длинномерных заготовок* / В. Б. Демидович, В. А. Оленин, Ф. В. Чмиленко; опубл. 10.09.2008. Бюл. № 25. 5 с.

V. B. Demidovich, A. I. Mikhluk, V. V. Andrushkevich  
*Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»*

#### INVESTIGATION OF THE STAGE INDUCTION HEAT TREATMENT OF PIPES WITH BIG DIAMETERS

*The stage induction heat treatment of pipes with big diameters is considered. The choice of frequency, the key design data of inductors, speed of technological oscillating motion of pipes for the achievement of the maximum power efficiency and quality of heating is made.*

**Heat treatment of pipes, induction heating, power efficiency, oscillating motion**