

**ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА  
ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ  
ТОКАМИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ**

**LABORATORY INSTALLATION  
FOR PILOT STUDIES OF THERMAL TREATMENT  
OF MATERIALS AND PRODUCTS  
BY CURRENTS OF THE INCREASED FREQUENCY**

*С.В. ФЕДОСОВ, Н.В. КРАСНОСЕЛЬСКИХ, А.Н. КУЗНЕЦОВ, Д.В. ЛАКЕЕВ,  
А.М. СОКОЛОВ, АБЕЛЬ ТАНКОЙ*  
*S.V. FEDOSOV, N.V. KRASNOSELSKIKH, A.N. KUZNETSOV, D.V. LAKEEV,  
A.M. SOKOLOV, ABEL TANKOI*

(Ивановский государственный политехнический университет)  
(Ivanovo State Polytechnical University)  
E-mail: are@ivgpu.com

*В статье рассматривается оригинальная лабораторная установка, предназначенная для экспериментального исследования различных методов тепловой обработки материалов с использованием токов повышенной частоты. Установка разработана и изготовлена в Ивановском государственном политехническом университете, выполнена на основе полупроводникового преобразователя напряжения с применением IGBT модулей, имеет мощность 1 кВт, частоту выходного напряжения 8...20 кГц, ступенчатое и плавное изменение величины выходного напряжения. С помощью этой установки выполнено предварительное исследование индукционного и электродного методов термической обработки материалов. Результаты демонстрируют высокую эффективность такого технологического процесса применительно к рассматриваемым объектам, они позволили разработать программу дальнейших исследований, а также приступить к созданию линейки подобных установок большой мощности для опытно-промышленного применения.*

*The article discusses the original laboratory installation is designed for experimental investigation of various methods of thermal processing of materials using high-frequency currents. This installation is designed and manufactured in Ivanovo State Polytechnic University, based on semiconductor voltage Converter with IGBT modules, has rated power of 1 kW, the frequency of the output voltage 8...20 kHz, speed and smooth change of the magnitude of the output voltage. Prior studies of the induction and electrode methods heat treatment of materials using this setup are made. The results of these studies demonstrate the high efficiency of the technological process for used objects and allowed to develop a program of further research and to begin the creation a line of such units of large rated power for pilot use in industry.*

**Ключевые слова:** магнитное поле, индуктор, индукционный нагрев, электродный нагрев, тепловая обработка, электромагнитная индукция, электрический ток, повышенная частота, преобразователь напряжения.

**Keywords:** magnetic field, inductor, induction heating, electrode heating, thermal treatment, electromagnetic induction, electric current, increased frequency, voltage converter.

В технологических процессах различных отраслей народного хозяйства все шире применяется тепловая (термическая) обработка материалов с использованием электрических токов и напряжений повышенной частоты (13...17 кГц): пропарка и сушка тканей, обработка железобетонных изделий, контактная сушка шпона и др. Перспективными способами такой обработки является применение электродного (то есть посредством пропуска через обрабатываемый материал или изделие электрического тока) и индукционного методов [1...3]. Причем в последнем случае нагрев может проводиться либо непосредственным воздействием электромагнитного поля

на обрабатываемый материал, либо посредством нагрева металлической поверхности, контактирующей с этим материалом [2]. В настоящее время для выполнения такой тепловой обработки в основном используется водяной пар или горячая вода, и этот технологический процесс имеет очень низкую энергетическую эффективность (8...12%), что требует применения сложного и дорогостоящего специального оборудования [4]. Создание и применение технологических процессов с использованием тепловой обработки токами повышенной частоты в полной мере соответствуют современным направлениям научно-технического прогресса [5].

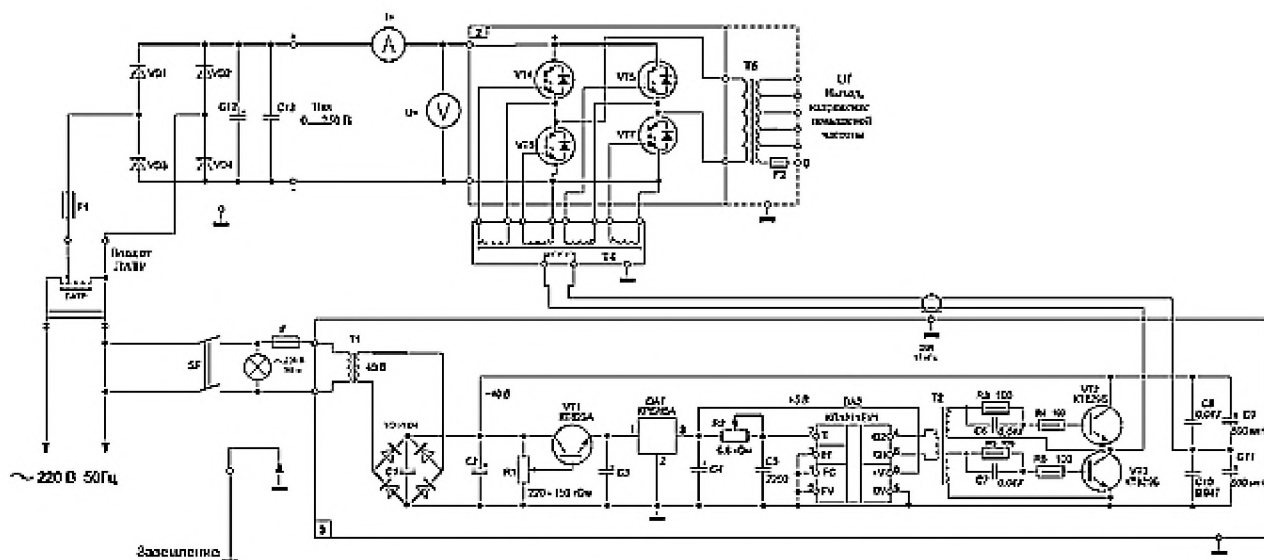


Рис. 1

В целях получения возможности экспериментальных исследований по применению термических методов обработки материалов и изделий в различных технологических процессах с использованием индукционного и электродного нагрева была разработана и изготовлена универсальная установка в виде источника несинусоидального напряжения повышенной частоты (13...17 кГц), выполненная на основе полупроводникового преобразователя напряжения с использованием IGBT модулей (рис. 1 – принципиальная электрическая схема установки на основе IGBT модулей: 1 – выпря-

митель; 2 – транзисторный мостовой преобразователь напряжения; 3 – задающий генератор 17 кГц на KP1211EY1).



Рис. 2

Разработанная установка позволяет выполнять экспериментальные исследования процессов электротепловой (электротермической) обработки как электродным, так и индукционным методом. Внешний вид установки, применяемой в экспериментах представлен на рис. 2: 1 – макет образца газобетона размером  $150 \times 150 \times 150$  мм; 2 – лабораторная установка на основе IGBT модулей; 3 – электронный термометр с термопарой.

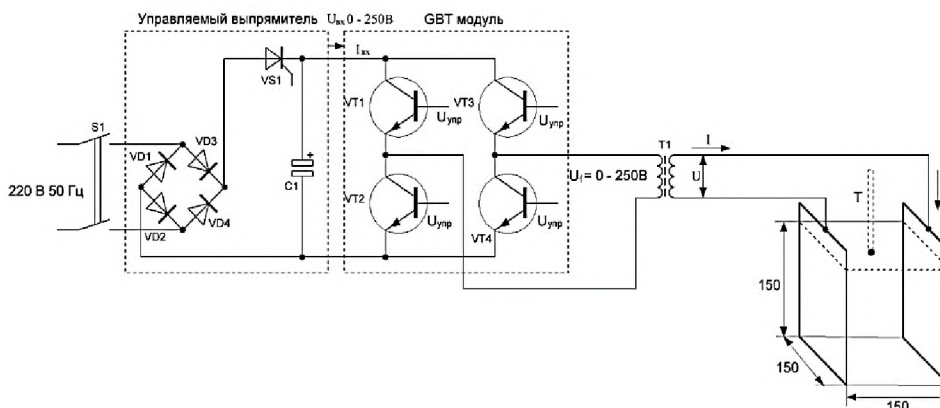


Рис. 3

Ячеистый бетон был залит в опалубку на участке WECOMIX производственной линии WEHRHANN в соответствии техническим регламентом, рецептом и программой испытаний. После набора пластической прочности в течение 180 мин созревания образец доставлялся в лабораторию ООО "Главстрой-Усть-Лабинск" для эксперимента по электротепловой обработке электродным методом (схема представлена на рис. 3).

Разогрев образца проводили от начальной температуры ( $\sim 50^\circ\text{C}$ ) до максимально возможного значения в процессе обработки

при атмосферном давлении  $100^\circ\text{C}$ . Изменением электрической мощности, подводимой к образцу, посредством плавного и ступенчатого изменения приложенного напряжения (рис. 2) можно в широких пределах регулировать скорость разогрева материала (от  $250 \dots 300^\circ\text{C/ч}$  до  $5 \dots 10^\circ\text{C/ч}$ ). В результате при различных режимах обработки изготовлено несколько опытных образцов газобетона  $150 \times 150 \times 150$  мм (рис. 2).

Для исследования индукционного метода электротепловой обработки материалов в лабораторных условиях применяли схему, представленную на рис. 4.

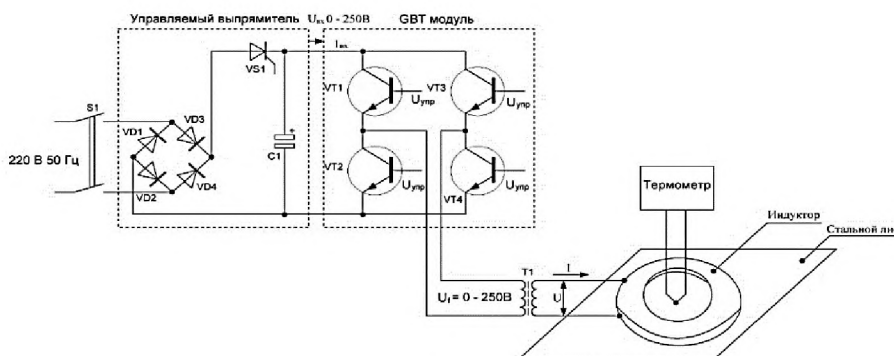


Рис. 4

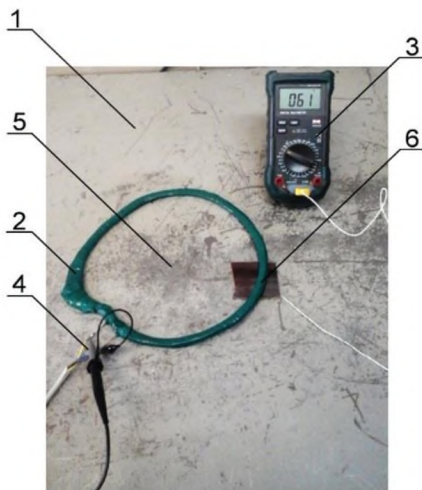


Рис. 5

В качестве нагрузки на выходе установки вместо образца газобетона включается индуктор в виде плоской катушки,

установленной на поверхности обрабатываемого материала, либо на металлической (греющей) поверхности при контактном нагреве обрабатываемого материала.

В последнем случае для проведения экспериментов, как показано на рис. 5 (внешний вид установки в ходе опыта по индукционному нагреву: 1 – стальной лист; 2 – индуктор; 3 – электронный термометр с термопарой; 4 – осциллограф для регистрации напряжения повышенной частоты, приложенного к индуктору; 5 – точка измерения температуры  $t_1$  стального листа (в центре индуктора); 6 – точка измерения температуры  $t_2$  стального листа (под обмоткой индуктора)), был использован стальной лист толщиной 2 мм приблизительно квадратной формы, имеющий площадь около 1 м<sup>2</sup>.

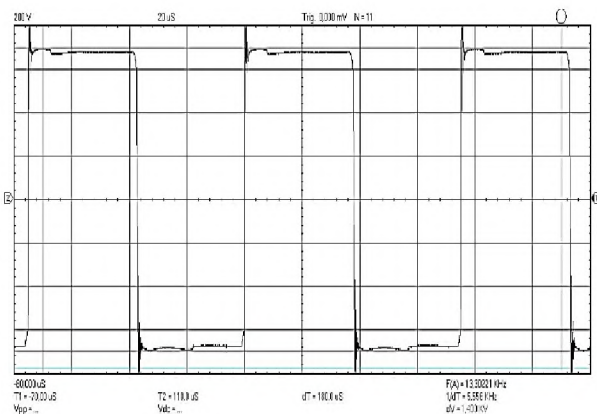


Рис. 6

Осциллограмма напряжения повышенной частоты, приложенного к индуктору, представлена на рис. 6. На рис. 7 показаны полученные в этом опыте графики зависимости изменения температуры от времени, которые в полной мере соответствуют качественным представлениям о протекающих электротепловых процессах [6].

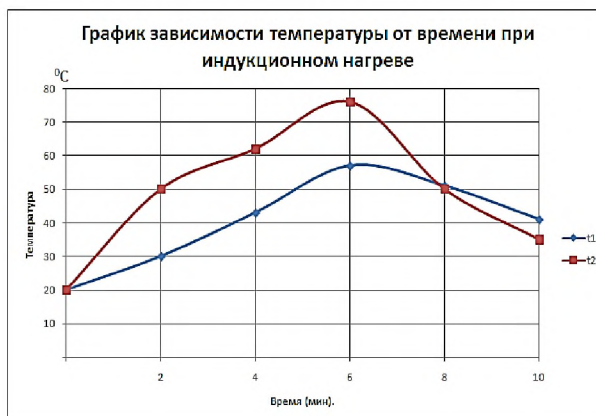


Рис. 7

## ВЫВОДЫ

1. Разработанная, изготовленная и испытанная лабораторная установка показала себя как очень удобный, эффективный и универсальный инструмент для выполне-

ния экспериментальных исследований и опытной проверки теоретических разработок, направленных на создание и широкое применение перспективных технологических процессов электротепловой обработки материалов и изделий токами повышенной частоты. К настоящему времени разработана и реализуется программа научных исследований с использованием этой установки.

2. Анализ федеральных государственных образовательных стандартов и учебных планов позволяет сделать вывод, что представленная лабораторная установка может быть эффективно использована при изучении целого ряда учебных дисциплин

различных направлений подготовки специалистов высшего и среднего профессионального образования.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях/ Под ред. Б.А. Крылова, С.А. Амбарцумяна, А.И. Звезда – М.: НИИЖБ, 2005.

2. *Красносельских Н.В., Федосов С.В., Соколов А.М., Лакеев Д.В.* К вопросу о методике расчета температурных характеристик при термическом воздействии электромагнитного поля на металлические материалы // Сб. мат.: Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера. "Поиск – 2016". – Часть 2, 2016. С. 298.

3. *Девликов Э.О., Тарабаев В.И., Толкачев Э.А., Боровский А.Г., Пименов М.Н.* Гладильный пресс с индукционным нагревом сушильной плиты // Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 1983, №2.

4. *Баженов Ю.М.* Технология бетона. – М.: Изд-во АСВ, 2003.

5. *Алоян Р.М., Петрухин А.Б., Федосеев В.Н.* Возможность внедрения экологической и энергосберегающей технологии в текстильной энергетике// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2016, № 2. С. 188...192.

6. *Федосов С.В., Акулова М.В., Кошкиров С.А., Метелева О.В.* Теоретические основы теплопереноса в перспективных технологиях производства материалов текстильной и строительной отраслей промышленности// Изв. вузов. Технология текстильной промышленности. – 2015, № 6. С.170...175.

7. *Родигин Н.М.* Индукционный нагрев стальных изделий. – Свердловск - Москва: Металлургия, 1950.

#### REFERENCES

1. Rukovodstvo po progrevu betona v monolitnyh konstrukcijah/ Pod red. B.A. Krylova, S.A. Ambarcumjana, A.I. Zvezdova – M.: NIIZhB, 2005.

2. *Krasnosel'skich N.V., Fedosov S.V., Sokolov A.M., Lakeev D.V.* K voprosu o metodike rascheta temperaturnyh harakteristik pri termicheskom vozdejstvii jelektromagnitnogo polja na metallicheskie materialy // Sb. mat.: Molodye uchenye – razvitiju tekstil'no-promyshlennogo klastera. "Poisk – 2016". – Chast' 2, 2016. S. 298.

3. *Devlikov Je.O., Tarabaev V.I., Tolkachev Je.A., Borovskij A.G., Pimenov M.N.* Gladil'nyj press s indukcionnym nagrevom sushil'noj plity // Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 1983, №2.

4. *Bazhenov Ju.M.* Tehnologija betona. – M.: Izd-vo ASV, 2003.

5. *Alojan R.M., Petruhin A.B., Fedoseev V.N.* Vozmozhnost' vnedrenija jekologicheskoy i jenergo-sbergajushhej tehnologii v tekstil'noj jenergetike// Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2016, № 2. S. 188...192.

6. *Fedosov S.V., Akulova M.V., Koksharov S.A., Meteleva O.V.* Teoreticheskie osnovy teplomassoprenosa v perspektivnyh tehnologijah proizvodstva materialov tekstil'noj i stroitel'noj otraslej promyshlennosti// Izv. vuzov. Tehnologija tekstil'noj promyshlennosti. – 2015, № 6. S.170...175.

7. *Rodigin N.M.* Indukcionnyj nagrev stal'nyh izdelij. – Sverdlovsk - Moskva: Metallurgizdat, 1950.

Рекомендована кафедрой автоматизации и радиоэлектроники. Поступила 07.04.17.