

1

ТОМ 28

2020

ISSN 2077-1304 PRINT  
ISSN 2706-5529 ONLINE

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

**МЕТАЛ  
ТА ЛІТТЯ  
УКРАЇНИ**  
METAL AND CASTING OF UKRAINE



Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України

[steelcast.com.ua](http://steelcast.com.ua)

[steelcastjournal@gmail.com](mailto:steelcastjournal@gmail.com)

Науково-технічний журнал  
Зареєстровано в Міністерстві юстиції України  
Свідоцтво про державну реєстрацію  
засобу масової інформації: КВ № 24088-13928 ПР  
від 06.08.2019 р.

Виходить 4 рази на рік  
Видається з червня 1993 року

Рекомендовано до друку Вченою радою  
Фізико-технологічного інституту металів  
та сплавів НАН України

Журнал входить до Переліку наукових фахових видань  
України (категорія "Б"), затвердженого Наказом № 409 від  
17.03.2020 р. Міністерства науки та освіти України, в яких  
можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на  
здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук  
(технічні науки).

Том 28  
№1(320)'2020

# МЕТАЛ ТА ЛИТТЯ України

## METAL AND CASTING OF UKRAINE

**Засновник:** Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України

**Видавці:** Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України

Асоціація ливарників України

Українська асоціація сталеплавильників

### РУДОТЕРМІЧНІ ПРОЦЕСИ

**Кащесв М.А., Владі В.О., Руденко М.Р.**

Підвищення ефективності роботи газоочистного обладнання в агломераційному виробництві. . . . . 8

### ВИРОБНИЦТВО ЧАВУНУ ТА СТАЛІ

**Низяев К.Г., Стоянов А.Н., Молчанов Л.С., Семирягин С.В., Эконго Муэль Одрея Макс**

Характеристика материал- и энергозатрат при производстве стали в конвертерных цехах Украины, Германии и Китая. . . . . 16

**Бондарь В.И., Мельник С.Г.**

Использование элементов искусственного интеллекта при исследовании физико-химических процессов производства конвертерной стали. . . . . 24

### ОБРОБКА СТАЛІ У КОВШІ

**Вергун А.С., Чернятевич А.Г., Нестеров А.С., Чайка А.Л., Тогобицкая Д.Н.,**

**Кисляков В.Г., Молчанов Л.С.**

Современный технологический маршрут конвертерного производства качественного железобудородистого полупродукта в сырьевых и энергетических условиях Украины . . . . . 30

**Іванова Л.Х., Колотило Є.В., Хитько О.Ю., Терехін В.О.**

Отримання і застосування комплексних модифікаторів з рідкісноземельними металами. . . . . 38

**Плохих П.А., Хавалиц Ю.В., Плохих П.А., Плохих А.А.**

Эффективность десульфурации при применении различных вариантов внепечной обработки стали. . 42

### ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА І ПРОЦЕСИ ЛИТТЯ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

**Смирнов А.Н., Ухин В.Е., Верзилов А.П., Ali Naseri**

Исследование причин формирования внутренних дефектов медной заготовки, полученной на роторной машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). . . . . 48

|  |    |
|--|----|
| <b>Лысенко Т.В., Ясюков В.В., Тур М.П., Бежанова А.Н.</b>  |    |
| Инновационные технологии выплавки стали для фасонных отливок . . . . .   | 55 |
| <b>Дорошенко В.С.</b>  |    |
| Моделювання формувальних та очисних технологій для ЛТО-процесу, що полягає в термообробці виливків, видалених в гарячому стані із піщаних форм . . . . . | 62 |
| <b><u>ПРОЦЕСИ, ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕРІАЛИ ЛИВАРНОГО ВИРОБНИЦТВА</u></b>   |    |
| <b>Солоненко Л.И.</b>  |    |
| Некоторые особенности сушки литейных форм и стержней в области стоячих волн сверхвысококачественного излучения . . . . .                                 | 69 |
| <b>Гнатуш В.А., Дорошенко В.С.</b>   |    |
| Світовий ринок металевих виливків 2014–2018 рр.: виробництво, країни, сплави . . . . .   | 79 |
| <b>Вітаємо!</b>  |    |
| 80 років Бубликову Валентину Борисовичу . . . . .  | 86 |
| Перелік конференцій у 2020 році . . . . .  | 88 |
| Перелік статей, опублікованих у науково-технічному журналі «Метал та лиття України» у 2019 році. . .   | 90 |

Scientific and technical Journal  
Registered by the Ministry of Justice of Ukraine  
State registration certificate of print media:  
KB № 24088-13928 ПП  
from 6.08.2019  
Published 4 times a year  
Issued since June 1993

Recommended for print by Scientific Council of the Physico-  
technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of  
Ukraine

The journal is included into the List of Scientific Professional  
Editions of Ukraine (category "B"), approved by Decree  
no. 409 of 17.03.2020 of the Ministry of Education and  
Science of Ukraine, in which the results of PhD and Doctoral  
theses (in Technical Sciences) may be published.

Vol. 28  
№1(320)'2020

# METAL & CASTING of Ukraine METAL AND CASTING OF UKRAINE

**Founder:** Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine

**Publishers:** Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the National Academy of Sciences of Ukraine

Foundry Association of Ukraine

Ukrainian Steelmakers Association

## **ORE SMELTING PROCESSES**

***Kashev M.A., Vladi V.A., Rudenko N.R.***

Improving the effectiveness of the gas purification equipment in agglomerative production. . . . . 8

## **PRODUCTION OF IRON AND STEEL**

***Niziaiev K.G., Stoianov A.N., Molchanov L.S., Semyriahyn S.V., Ekongo Mouele Audrey Max***

Characteristics of material and energy consumption for steel production in the BOF shops of Ukraine,  
Germany and China. . . . . 16

***Bondar V.I., Mel'nik S.G.***

Using artificial intelligence elements in research of physical and chemical processes of production of converter  
steel. . . . . 24

## **REFINING STEEL IN THE LADLE**

***Vergun A.S., Chernyatevich A.G., Nesterov A.S., Chaika A.L., Togobitskaya D.N.,  
Kisliakov V.G., Molchanov L.S.***

Modern technological route of converter production of qualitative iron-carbon semi-product in raw material  
and energy conditions of Ukraine . . . . . 30

***Ivanova L.Kh., Kolotilo E.V., Hitko A.Yu., Terehin V.A.***

Obtaining and application of complex modifiers with rare-earth metals. . . . . 38

***Plokhikh P.A., Khavalits Yu.V., Plokhikh P.A., Plokhikh A.A.***

Efficiency of desulfurization in the application of different options for out-of-furnace treatment of steel. . . . . 42

## **TECHNOLOGIES AND PROCESSES OF CASTING METALS AND ALLOYS**

***Smirnov A.N., Ukhin V.E., Verzilov A.P., Ali Naseri***

Investigation of internal defects formation reasons in copper billet obtained at rotary continuous casting  
machine (CCM). . . . . 48

|   |    |
|---|----|
| <b>Lysenko T.V., Yasyukov V.V., Tur M.P., Bezhanova A.N.</b><br>Innovative steelmaking technologies for shaped castings . . . . .   | 55 |
| <b>Doroshenko V.S.</b><br>Modeling of molding and treatment technologies for the CHT-process, which consists in the heat treatment of castings removed in the hot state from sand molds . . . . . | 62 |
| <b><u>PROCESSES, TECHNOLOGIES AND MATERIALS IN FOUNDRY</u></b>  |    |
| <b>Solonenko L.I.</b><br>Some features of drying casting forms and cores in the field of standing waves of microwave radiation . . . . .  | 69 |
| <b>Gnatush V.A., Doroshenko V.S.</b><br>World market of metal castings 2014–2018: production, countries, alloys . . . . .   | 79 |
| <b><i>Congratulations!</i></b>  |    |
| Bublikov V.B. is 80 years old . . . . .   | 86 |
| List of conferences in 2020 . . . . .   | 88 |
| List of articles published in the scientific and technical journal “Metal and Casting of Ukraine” in 2019. . . . .  | 90 |

**Л.И. Солоненко**, канд. техн. наук, доц. каф. технологии и управления литейными процессами,  
e-mail: solonenkoli14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>

Одесский национальный политехнический университет (Одесса, Украина)

## Некоторые особенности сушки литейных форм и стержней в области стоячих волн сверхвысокочастотного излучения

*В статье рассмотрены некоторые особенности сушки песчано-жидкостекольных литейных форм и стержней в области стоячих волн сверхвысокочастотного излучения малой мощности (700–1200 Вт) с частотой 2450 МГц и длиной волны 122,5 мм.*

*Установлено, что конвективно-тепловая сушка при 90–100 °С песчано-жидкостекольной смеси обеспечивает литейным формам/стержням высокую прочность и газопроницаемость, низкую осыпаемость. В тоже время сушка сверхвысокочастотным излучением малой мощности той же смеси резко снижает прочность и газопроницаемость и повышает ее осыпаемость. Сушка сверхвысокочастотным излучением смеси в литейной оснастке не приводит к полному удалению из нее влаги. При этом характер распределения остаточной влаги вдоль формы/стержня не зависит от длительности его обработки сверхвысокочастотным излучением в литейной оснастке, мощности магнетрона и частоты вращения стола СВЧ-печи.*

*По результатам безотносительного нагрева и испарения воды в рабочем пространстве СВЧ-печи установлено, что в группе одновременно нагреваемых навесок воды разной массы, но одинаковых геометрических размеров и равноудаленных от оси вращения стола СВЧ-печи, длительность испарения воды будет практически одинаковой. Для аналогичных навесок воды одинаковой массы при этих же условиях длительность испарения воды будет различаться на  $\pm (4-16) \%$ , что объясняется различием в начальном положении навесок по отношению к распределению стоячих волн в рабочем пространстве СВЧ-печи. То есть, начальное положение навесок на столе в области стоячих волн СВЧ-печи является одним из основных факторов, который предопределяет длительность нагрева и испарения из них воды. При этом увеличение мощности магнетрона СВЧ-печи от 700 до 1200 Вт повышает степень равномерности длительности испарения воды из навесок, сокращая эту разницу во времени с 16 % при мощности магнетрона 700 Вт до 3,6 % при мощности магнетрона 1200 Вт.*

**Ключевые слова:** стержень, форма, сушка, вода, нагрев, испарение, излучение, магнетрон.

**Анализ литературных данных.** Одной из наиболее продолжительных и энергоемких технологических операций изготовления литейных форм и стержней из влагосодержащих смесей является их сушка. В числе задач, решаемых проведением сушки литейных форм и стержней, – повышение их прочности, газопроницаемости, снижение газотворной способности, осыпаемости и т. д. [1]. Как правило, сушку влагосодержащих литейных форм и стержней проводят при 165–400 °С в сушилах камерного типа с конвекционным, радиационным или конвективно-радиационным нагревом. В ряде случаев сушку проводят с использованием переносных газовых горелок, электровентиляторов и т. п. Продолжительность конвекционно-тепловой обработки для мелких литейных форм и стержней, как правило, составляет до 6–7 часов и возрастает с увеличением толщин стенок и массы высушиваемых форм и стержней.

Общими для указанных выше способов сушки является перенос тепла от поверхности в глубину и перенос влаги из глубины к поверхности литейной формы/стержня, существенная зависимость длительности сушки от конфигурации и толщины их стенок, коэффициента теплопроводности и удельной теплоемкости материала высушиваемой смеси.

Указанные выше особенности конвекционно-тепловой сушки не единственные, от которых зависит ее длительность, поскольку, например, влагосодержание высушенных литейных форм и стержней при камерной сушке также зависит от интенсивности циркуляции в камере горячих потоков воздуха/газов и их влажности, разницы температуры между верхней и нижней частями камеры, которая может достигать 100–150 °С и т. д. [2]. При этом переносные инфракрасные сушила при сушке жидкостекольных смесей вызывают обгар отдельных поверхностей литейных форм/стержней [3].

При сушке инфракрасным излучением сырых песчано-глинистых смесей вследствие интенсивного поверхностного испарения воды, внутренние части литейной формы/стержня, насыщаясь парами воды, снижают проникающую способность инфракрасных лучей в 2–2,5 раза, что способствует существенному увеличению длительности сушки. Газовые горелки по ряду причин, присущих данному способу, также не всегда обеспечивают требуемого качества поверхности литейных форм/стержней, при сушке жидкостекольных смесей – резко повышают осыпаемость литейных форм/стержней и т. д. [4, 5].

В отличие от рассмотренных выше способов, сушка литейных форм и стержней в поле сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения проходит по всему объему литейной формы/стержня одновременно. При этом, совпадение векторов градиента температуры и концентрации влаги (из глубины к поверхности) во всем периоде сушки формы/стержня в разы сокращает ее длительность. Это обстоятельство позволяет не только в разы сократить длительность сушки, но и энергетические затраты, избежать пережога и пересушивания структурированных смесей, делает процесс сушки экологически безопасным и безотходным.

Глубина проникновения СВЧ-излучения в обрабатываемую формовочную/стержневую смесь может быть рассчитана по известной из курса физики формуле:

$$\Delta = \frac{9,55 \cdot 10^9}{f \cdot tg\delta \cdot \sqrt{\epsilon_0}}, \quad (1)$$

где  $\Delta$  – глубина проникновения СВЧ-излучения в смесь, см;  $f$  – частота СВЧ-излучения, МГц;  $tg\delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  $\epsilon_0$  – относительная диэлектрическая проницаемость смеси.

При этом количество тепла, генерируемое СВЧ-излучением в единице объема формовочной/стержневой смеси, рассчитывают по формуле [6]:

$$Q = 0,278 \cdot 10^{-10} \cdot \epsilon_0 \cdot tg\delta \cdot f \cdot E^2, \quad (2)$$

где  $\epsilon_0$  – действительная часть комплексной диэлектрической проницаемости (относительная диэлектрическая проницаемость) формовочной/стержневой смеси;  $\delta$  – угол диэлектрических потерь формовочной/стержневой смеси;  $f$  – частота электромагнитного поля, Гц;  $E$  – напряженность электрического поля, В/м.

Из анализа формул (1) и (2) следует, что под действием СВЧ-излучения нагрев литейных форм/стержней из диэлектрических материалов зависит исключительно от величины их диэлектрических параметров  $\epsilon_0$  и  $tg\delta$ , напряженности электромагнитного поля и частоты СВЧ-излучения.

СВЧ-излучение в высушиваемой смеси инициирует появление взаимодействующих между собой полей температуры, влагосодержания и газового давления. Обобщенное уравнение, описывающее при этом перемещение влаги в смеси под действием СВЧ-излучения, имеет вид [7]:

$$q_m = -a_m \cdot \rho_2 \cdot \nabla_u - a_m \cdot \rho_2 \cdot \delta \cdot \nabla_t - k_p \cdot \nabla_p, \quad (3)$$

где  $\nabla_u$ ,  $\nabla_t$ ,  $\nabla_p$  – соответственно, градиенты влагосодержания, температуры и газового давления;  $a_m$  – коэффициент диффузии влаги, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_2$  – кажущаяся плотность сухого зернистого материала смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $k_p$  – коэффициент фильтрации.

В случае быстрого нагрева смеси, содержащей значительное количество воды, при ее обработке СВЧ-излучением возникает градиент давления водяного пара. Этот градиент инициирует появление как интенсивного потока влаги из глубины к поверхности смеси, так и может стать причиной разрушения (надрывов – сквозных и локальных трещин) литейной формы/стержня. В таком случае вклад градиентов  $\nabla_u$  и  $\nabla_t$  на массоперенос в смеси будет незначительным и формулу (3) можно записать в виде:

$$q_m = -k_p \cdot \nabla_p. \quad (4)$$

В этом случае, процесс массопереноса водяного пара или пароводяной смеси (фильтрационного потока) в капиллярно-пористой среде (формовочной/стержневой смеси) можно описать, используя формулу Дарси.

Для решения данной задачи, прежде всего, необходимо располагать значениями объемной скорости или времени испарения воды в смеси. В настоящее время для определения длительности нагрева и испарения воды, нагреваемой СВЧ-излучением, используют формулу [8], например, записанную в виде:

$$\tau = \frac{(c_p \cdot \Delta t + L) \cdot m}{P_M}, \quad (5)$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·°С);  $\Delta t$  – температурный интервал нагрева воды, °С;  $L$  – удельная теплота испарения воды, Дж/кг;  $m$  – масса воды, кг;  $P_M$  – номинальная мощность магнетрона СВЧ-печи, Вт.

При этом следует учитывать, что приведенные выше уравнения и формулы носят обобщенный характер и не учитывают особенности СВЧ-излучения в той или иной СВЧ-печи, возможные изменения структуры и состава обрабатываемых материалов, физические процессы, сопровождающие испарение жидких компонентов смеси и т. п. В свою очередь, эти особенности оказывают решающее влияние на скорость нагрева диэлектрических материалов [9, 10] и, соответственно, продолжительность испарения из них воды.

**Постановка задачи.** Современная теория диэлектрического нагрева и испарения материалов под действием СВЧ-излучения обобщила закономерности протекания этих процессов. Тем не менее, в ней не учитываются частные особенности рассматриваемых процессов. К числу таких особенностей, например, относится пространственно-волновое строение поля СВЧ-излучения, конструкционные особенности рабочих камер СВЧ-печей, возможные физико-химические процессы, сопровождающие нагрев материалов и т. п. Отсутствие или фрагментарный характер такой информации для СВЧ-излучения малой мощности (до 1,2 кВт) не

## Параметры СВЧ-печей

| Номинальная мощность магнетрона, Вт | Объем рабочей камеры, м <sup>3</sup> | Стол в рабочей камере               |             | Частота СВЧ-излучения, МГц |
|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-------------|----------------------------|
|                                     |                                      | частота вращения, мин <sup>-1</sup> | диаметр, мм |                            |
| 700                                 | 0,023                                | 6,0                                 | 220         | 2450                       |
| 900                                 | 0,032                                | 2,5                                 | 280         |                            |
| 1200                                | 0,023                                | 6,0                                 | 220         |                            |

позволяет обеспечить стабильность качества и гибкость управления технологий производства литейных форм/стержней, сдерживает развитие данного способа как в части создания нового оборудования, так и разработки новых технологий производства экологически безопасных и относительно недорогих литейных форм и стержней из материалов отечественного производства. Поэтому работа, направленная на изучение кинетики, закономерностей и особенностей нагрева и испарения воды в СВЧ-печах малой мощности является актуальной.

**Цель работы.** Изучение кинетики, закономерностей и особенностей нагрева и испарения воды в СВЧ-печах.

**Объект и методика исследований.** В работе использовали карьерный кварцевый песок с содержанием глины менее 0,1 % по массе и средним размером частиц 0,16–0,20 мм, водопроводную воду, натриевое жидкое стекло плотностью 1450 кг/м<sup>3</sup> и с силикатным модулем 2,9, серебристый графит, лист пенопласта, картонные стаканы с размерами (Ø75xØ50)x85 мм, стержневой полипропиленовый ящик вытряхного типа с толщиной стенок 2 мм, СВЧ-печи с вращающимся столом из боросиликатного стекла, основные параметры которых приведены в таблице.

Время фиксировали по секундомеру с точностью 1 с, массу определяли на электронных весах с точностью 0,01 г.

Для определения характера распределения остаточной влаги в высушенных СВЧ-излучением стержнях использовали смесь кварцевого песка с 5 % (по массе) жидкого стекла (ЖС). Приготовленной песчано-жидкостекольной смесью (ПЖС) заполняли стержневой

ящик и вручную уплотняли ее, что схематично представлено на рис. 1, а.

После уплотнения смеси стержневой ящик укладывали на рабочий стол СВЧ-печи таким образом, чтобы в начальный момент времени сушки его положение было перпендикулярно по отношению к направлению движения СВЧ-излучения, то есть перпендикулярно оси 0-X, схематично представленной на рис. 1, б. Длительность сушки смеси в СВЧ-печах составляла 3, 6 и 9 минут. По окончании сушки стержень извлекали из стержневого ящика и разрезали на 4 части в соответствии со схемой на рис. 1, а. Каждую часть стержня взвешивали и вторично обрабатывали СВЧ-излучением в течение 5 минут, после чего выдерживали на воздухе 1 час и проводили повторное взвешивание. Содержание остаточной влаги (Вл) в различных частях высушенного СВЧ-излучением стержня рассчитывали по формуле, %:

$$Вл_i = \frac{(m_{i1} - m_{i2})}{m_{i1}} \cdot 100, \quad (6)$$

где  $m_{i1}$ ,  $m_{i2}$  – масса участка стержня после его сушки в стержневом ящике и вне стержневого ящика соответственно, г.

Прочность на сжатие структурированных смесей определяли по ГОСТ 23409.7-78, газопроницаемость – по ГОСТ 23409.6-78, осыпаемость – по ГОСТ 23409.9-78.

Определение влияния массы, количества и места положения навесок воды на длительность ее испа-

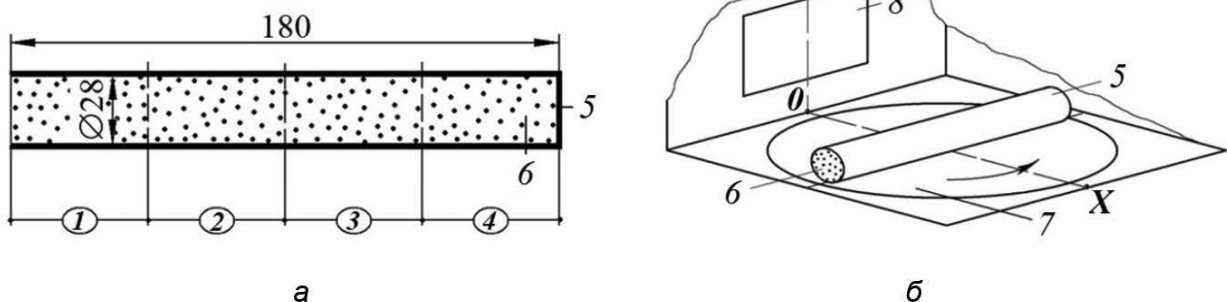
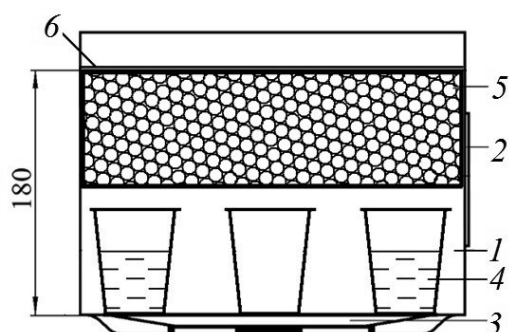


Рис. 1. Схема участков стержня в стержневом ящике (а), расположение стержневого ящика на вращающемся столе СВЧ-печи в момент начала сушки (б): 1-4 – номера участков стержня; 5 – глухой стержневой ящик вытряхного типа; 6 – смесь; 7 – вращающийся стол; 8 – выходное окно волновода СВЧ-печи в ее рабочей камере



рения проводили с использованием картонных стаканов, которые наполняли различным (по массе) количеством воды и устанавливали на вращающийся стол СВЧ-печи. Изменение массы навесок проводили путем их взвешивания через каждые 1–4 минуты обработки СВЧ-излучением.

Для построения схемы поля теплового воздействия СВЧ-излучения на расстоянии 180 мм от днища камеры СВЧ-печи устанавливали горизонтально лист пенопласта с плотностью  $15 \text{ кг/м}^3$  и толщиной 80 мм. Перед установкой на верхнюю поверхность листа насыпали слой серебристого графита толщиной 1,0–1,5 мм. Под листом пенопласта размещали в 4 картонных стаканах навески воды массой по 100 г каждая, что схематично представлено на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема расположения навесок воды и листа пенопласта со слоем серебристого графита в рабочей камере СВЧ-печи: 1 – рабочая камера СВЧ-печи; 2 – выход волновода в камеру СВЧ-печи; 3 – вращающийся стол; 4 – навеска воды; 5 – лист пенопласта; 6 – слой серебристого графита

Навески воды устанавливали равноудаленно друг от друга на краю стола. Длительность нагрева навесок в СВЧ-печи с магнетроном мощностью 700 Вт составляла 80 с. По окончании обработки лист пенопласта извлекали из печи и с его верхней поверхности снимали гипсовый отпечаток, на котором участки с наиболее глубокими выемками соответствуют местам пучностей волн, возникающих в результате прохождения и отражения СВЧ-волн в камере от ее

стенок и их частичного поглощения непрерывно меняющими свое положение навесками воды.

**Результаты исследований.** Гистограммы остаточной влажности в зонах высушенных песчано-жидкостекольных стержней в СВЧ-печи с мощностью магнетрона 700 и 900 Вт представлены на рис. 3.

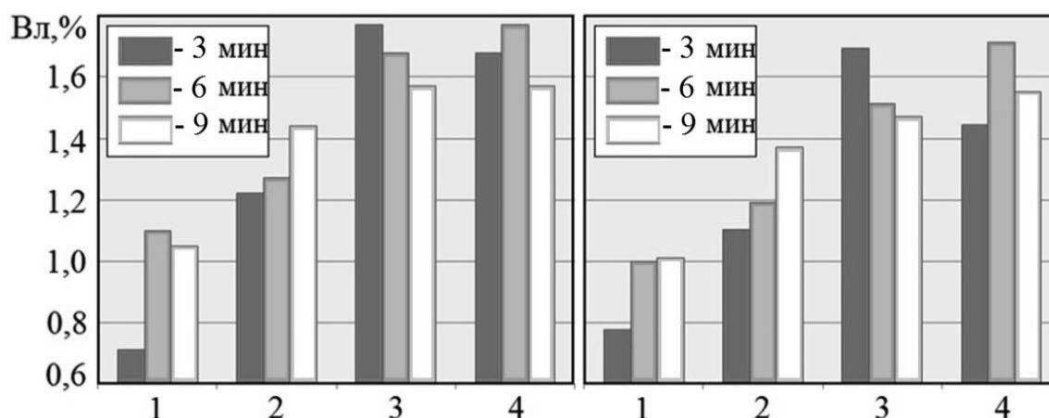
Из анализа гистограмм на рис. 3 следует, что:

- обработка ПЖС СВЧ-излучением малой мощности в течение 8–14 минут не приводит к полному удалению из нее влаги, относительное количество которой составляет 1,18–1,22 % от массы смеси;
- характер распределения остаточной влаги вдоль стержня не зависит от длительности его обработки СВЧ-излучением и его мощности, частоты вращения стола СВЧ-печи;

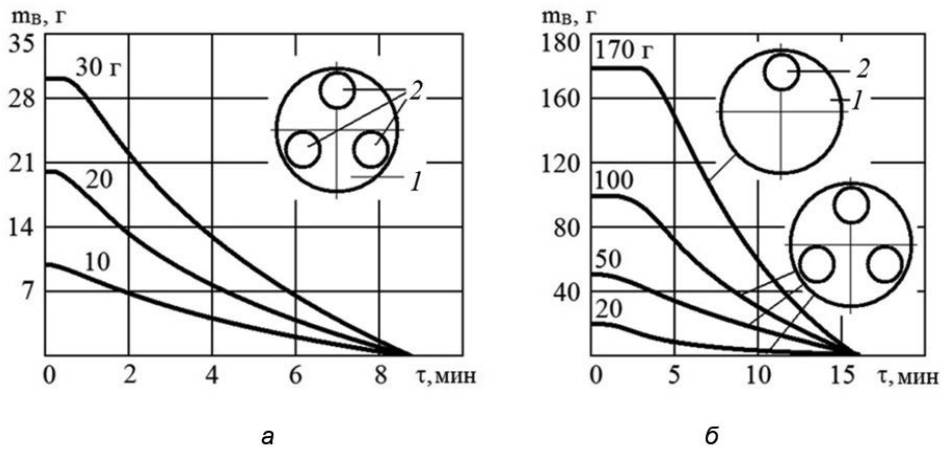
- с приближением к открытой поверхности стержневого ящика уровень остаточной влажности в стержнях понижается и в своем минимальном значении достигает 0,7–0,8 % от массы высушенного стержня.

Причиной существенного содержания влаги в стержне из ПЖС, по-видимому, является пенная структура затвердевшего ЖС. Быстрый объемный нагрев ЖС в составе смеси СВЧ-излучением приводит к его вспениванию, которое сопровождается потерей воды и подвижности ЖС, то есть его переходом в вязкое, а затем и в твердое состояние. При этом твердение пленок ЖС, обусловленное их дегидратацией, очевидно, проходит без их значительных разрушений. Как результат, такие сплошные пленочные структуры ЖС приводят к закупорке капиллярных каналов структурированной смеси. По сравнению с аналогичной ПЖС, отвержденной в результате проведения тепловой сушки при 90–100 °С в течение 24 часов, это способствует не только сохранению испарившейся в ней воды (~1,2 %, по массе), но и увеличению осыпаемости (с 0,01–0,03 до 1,2–1,4 %, по массе), уменьшению прочности (с  $\sigma_{сж} = 2,9\text{--}3,2$  МПа до  $\sigma_{сж} = 0,34\text{--}0,42$  МПа) и газопроницаемости (с 200–220 до 20–40 ед.) литейных форм и стержней.

Исследования особенностей кинетики изменения массы испаряющейся воды и длительности ее испарения при ее нагреве СВЧ-излучением в области сто-



**Рис. 3.** Гистограммы остаточной влажности в зонах высушенных песчано-жидкостекольных стержней в СВЧ-печи с мощностью магнетрона 700 (а) и 900 (б) Вт



**Рис. 4.** Зависимость массы воды в навесках от длительности их нагрева в СВЧ-печи при общей суммарной массе воды в трех навесках 60 г (а), при исходной массе воды в одной навеске 170 г и той же суммарной массе воды в трех навесках (б): 1 – вращающийся стол СВЧ-печи; 2 – навеска воды

ячих волн исследовали безотносительно зернистой составляющей формовочной/стержневой смеси.

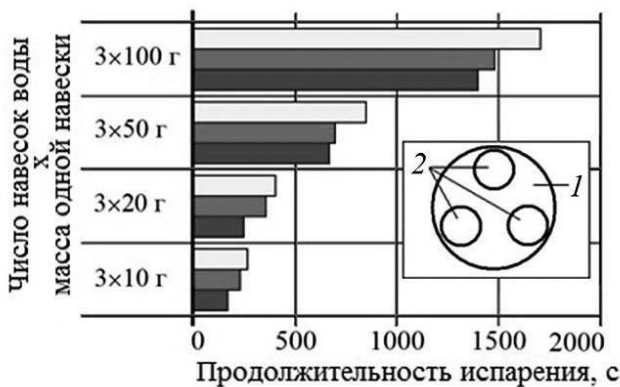
Из формулы (5) следует, что при постоянной массе тела (материала), длительность его нагрева и фазового превращения в СВЧ-излучении не зависит от размеров, формы и числа кусков (навесок) этого тела, его расположения в рабочем пространстве СВЧ-печи [6]. Подтверждением данного положения являются зависимости, изменения массы навесок воды разной начальной массы от длительности их нагрева в СВЧ-печи с мощностью магнетрона 900 Вт, представленные на рис. 4.

Анализ хода зависимостей на рис. 4 показывает, что независимо от исходной массы воды и числа навесок, вода из каждой навески испарится практически за то же время, за которое бы вода испарилась из одной навески массой, равной сумме всех навесок. То есть, независимо от исходной массы воды в навеске скорость ее испарения из каждой одновременно нагреваемой навески будет одинаковой и практически неизменной за все время нагрева и испарения. При этом следует отметить, что основным условием такого синхронного завершения испарения воды из навесок является равенство их геометрических размеров в плане и удаления от оси вращения стола

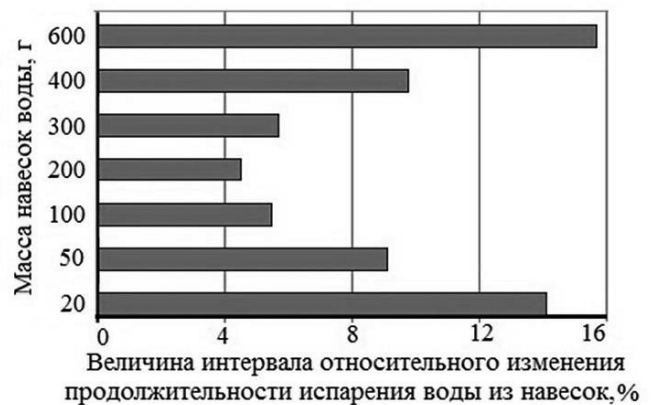
СВЧ-печи. В свою очередь равноудаленность навесок от оси вращения является основным, но недостаточным фактором для строгого соблюдения одновременности завершения испарения воды из навесок. В частности, об этом свидетельствуют данные рис. 5, где представлены гистограммы длительности испарения воды из трех навесок воды одинаковой исходной массы с одинаковым удалением их от оси вращения стола СВЧ-печи.

Из анализа гистограмм на рис. 5 следует, что длительность испарения воды при СВЧ-нагреве возрастает с увеличением массы нагреваемой воды в печи. При этом относительное отклонение показателей длительности испарения от их среднего значения зависит от исходной массы испаряемой воды и достигает  $\pm (4-16) \%$ , что следует из гистограммы на рис. 6.

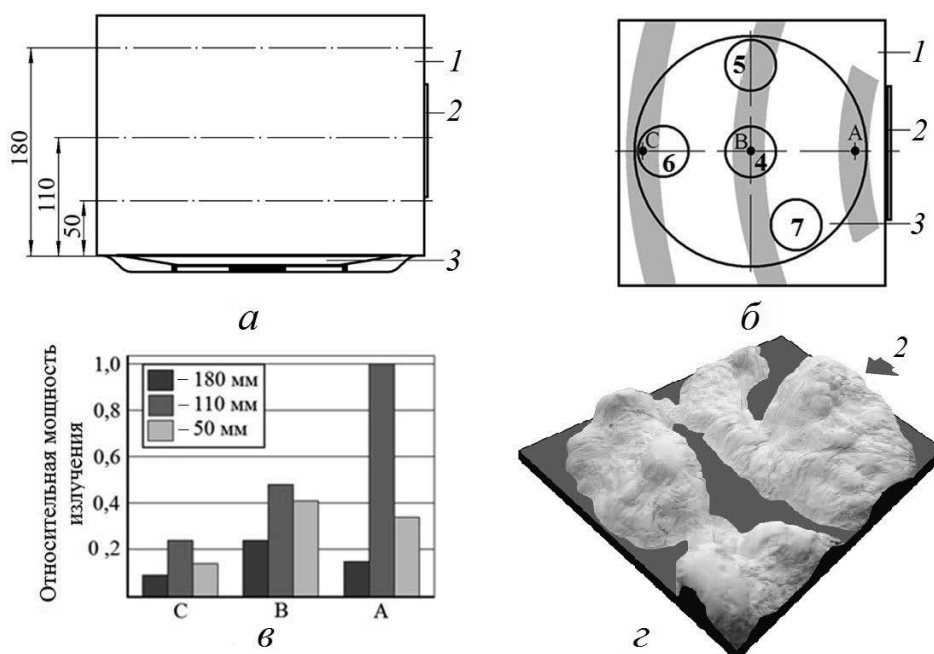
Такая закономерность отклонений величин интервалов нагрева и испарения воды из навесок, очевидно, обусловлена характером пространственного распространения и положения волн СВЧ-излучения. То есть, в пределах рабочего пространства используемых в экспериментах СВЧ-печей имеют место плоские стоячие волны СВЧ-излучения. Соответственно, в зависимости от частоты вращения стола в СВЧ-печи, начального положения навесок на сто-



**Рис. 5.** Длительность испарения воды из трех навесок одинаковой исходной массы, расположенных на вращающемся столе СВЧ-печи с мощностью магнетрона 900 Вт: 1 – стол СВЧ-печи; 2 – навески воды



**Рис. 6.** Гистограмма интервала относительного изменения длительности испарения воды из навесок от их исходной массы



**Рис. 7.** Схема рабочей камеры СВЧ-печи (а) и расположения навесок нагреваемых тел на столе СВЧ-печи (б), гистограмма относительной мощности в точках А, В, С рабочего пространства в СВЧ-печи на разных уровнях от ее днища (в), схема поля теплового воздействия (поверхность затемнена) СВЧ-излучения на расстоянии 180 мм от днища камеры при нагреве в ней четырех навесок воды по 100 г каждой (г): 1 – рабочее пространство СВЧ-печи; 2 – выход волновода в рабочую камеру; 3 – вращающийся стол СВЧ-печи; 4-7 – навески нагреваемого материала

ле, а также направления вращения стола при работе СВЧ-печи для каждой навески, хоть насколько либо удаленной от центра стола печи, начало и интенсивность нагрева в большинстве случаев будут отличаться. Эту закономерность можно пояснить схемой, представленной на рис. 7.

На рис. 7 (а, б) представлена схема рабочего пространства печи с указанием расстояния от ее днища (см. рис. 7, а) и активные области (пучности) нагрева СВЧ-излучением на расстоянии 110 мм от днища камеры, которые на рис. 7 (б) затемнены серым цветом. На гистограмме рис. 7 (в) представлены данные об относительной (относительно точки «А») мощности СВЧ-излучения на расстоянии 50, 110 и 180 мм от днища рабочей камеры печи, а на рис. 7 (г) – схема поля теплового воздействия (поверхность затемнена) СВЧ-излучения на расстоянии 180 мм от днища камеры.

В соответствии со схемой на рис. 7 (б) навеска нагреваемого материала, например, может быть помещена в места, обозначенные на рисунке цифрами от 4 до 7.

Исходя из полученных результатов, характер нагрева навесок можно разделить на 3 типа:

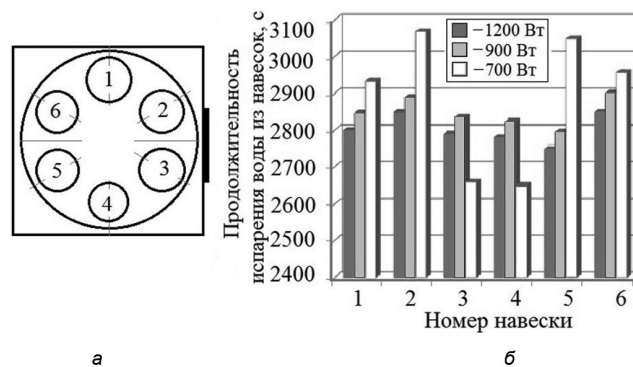
- тип 1 – непрерывный нагрев (навеска 4 на рис. 7, б);
- тип 2 – переменный нагрев с началом нагрева в области пучности (навески 5 и 6 на рис. 7, б);
- тип 3 – переменный нагрев с началом нагрева в узле стоячей волны (навеска 7 на рис. 7, б).

В соответствии с гистограммой на рис. 7 (в) на уровне 110 мм от днища камеры мощность СВЧ-излучения в пучностях по мере удаления от волновода понижается по степенной зависимости. В то же время на уровне 50 и 180 мм мощность в пучностях ниже, чем на уровне 110 мм, а ее изменение носит

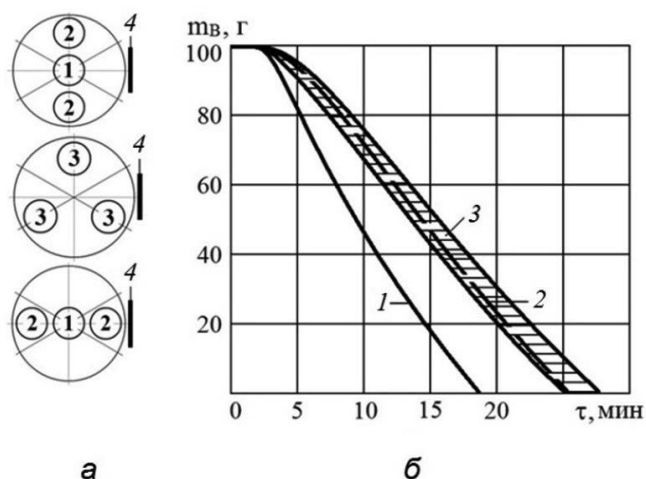
экстремальный характер с максимумом в центральной области. Данные закономерности объясняются тем, что уровень 110 мм соответствует центру окна выхода волновода в камеру СВЧ-печи, а затухание амплитуды волны по мере удаления от волновода носит степенной характер. В то же время уровень 50 мм соответствует положению нижней кромки окна волновода, что, соответственно, приводит к значительному понижению мощности СВЧ-излучения в этой области.

Существенное влияние на длительность нагрева и испарения воды в СВЧ-печах оказывает и начальное положение навесок на столе СВЧ-печи, и номинальная мощность магнетрона печи, о чем свидетельствует данные рис. 8.

В данном эксперименте испытываемые навески воды располагали на вращающемся столе СВЧ-печи в соответствии со схемой на рис. 8, а. Результаты



**Рис. 8.** Схема положения навесок воды массой по 100 г на столе СВЧ-печи (а), гистограмма длительности нагрева и испарения воды из навесок (б): 1-6 – номера навесок воды массой 100 г каждая



**Рис. 9.** Схемы (в плане) исходного положения навесок воды на столе СВЧ-печи (а), зависимости массы воды в навесках от длительности их нагрева (б): 1-3 – навески воды; 4 – выход волновода в камеру СВЧ-печи

определения длительности нагрева и испарения воды из навесок представлены на рис. 8, б.

Из анализа гистограммы на рис. 8 (б) следует, что начальное положение навесок на столе СВЧ-печи существенно влияет на длительность нагрева и испарения из них воды. При этом увеличение номинальной мощности магнетрона СВЧ-печи от 700 до 1200 Вт практически не влияет на среднюю продолжительность нагрева и испарения воды из навесок, но повышает равномерность их нагрева. В частности, в СВЧ-печи с номинальной мощностью магнетрона  $P_M = 700$  Вт длительность нагрева и испарения воды из навесок составила  $2835 \pm 225$  с, при  $P_M = 900$  Вт –  $2832 \pm 67$  с и при  $P_M = 1200$  Вт –  $2797 \pm 51$  с.

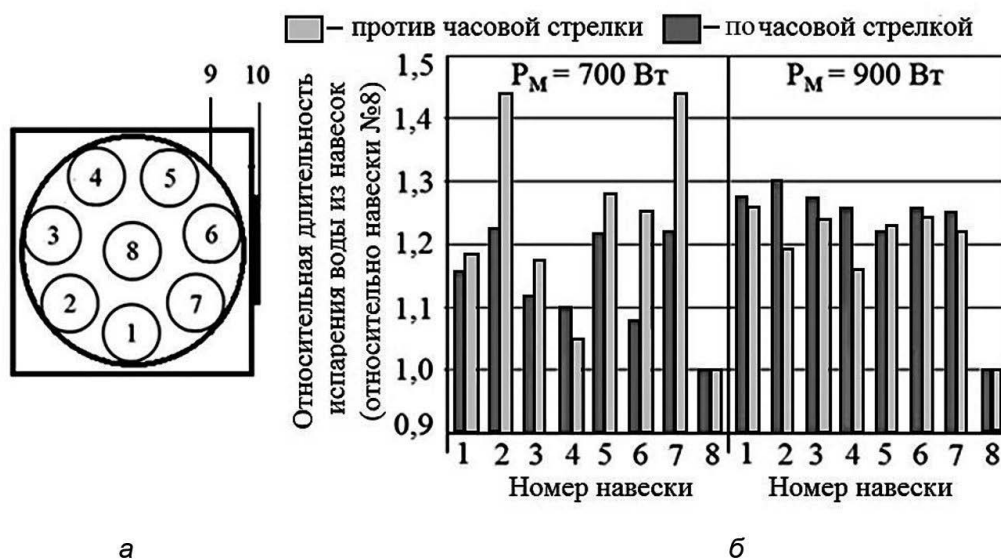
Полученный результат не согласуется с теоретической формулой (5), в соответствии с которой длительность нагрева и испарения воды должна неуклонно уменьшаться с повышением номинальной мощности магнетрона. Тем не менее, полученный

результат в эксперименте вполне предсказуем. Дело в том, что используемые в экспериментах СВЧ-печи предназначены для работы с пищевыми продуктами. В этой связи, конструкция их рабочих камер и волноводов выполнена таким образом, чтобы при обеспечении максимально возможной равномерности нагрева продуктов не допустить их перегрев или пережог. То есть, повышая номинальную мощность магнетрона, предприятия-производители обеспечивают равномерность нагрева продуктов в СВЧ-печи, а ограничивая предельную мощность излучения в ее рабочей камере – предупреждают перегрев и пережог продуктов.

Для оценки влияния расположения навесок одинаковой массы на столе СВЧ-печи на длительность нагрева и испарения из них воды, а также для подтверждения экстремального характера распределения мощности в рабочем пространстве СВЧ-печи с максимумом в ее центре определяли длительность нагрева и испарения воды из навесок одинаковой массы. В исследованиях навески воды одинаковой массы располагали на вращающемся столе СВЧ-печи ( $P_M = 900$  Вт) в соответствии со схемами, представленными на рис. 9, а. Зависимости массы воды в навесках от длительности их нагрева представлены на рис. 9, б.

Анализ зависимостей на рис. 9 (б) показывает, что длительность нагрева и испарения воды из навесок, расположенных на оси (в центре) вращающегося стола СВЧ-печи и на удалении от центра (на краю), различна. Различие для навесок № 1 и навесок № 2 и № 3 достигает 28–35 %. Это означает, что с удалением от центра вращения стола, длительность и интенсивность воздействия СВЧ-излучения на нагреваемое тело (в данном случае – воду) понижается.

Для определения влияния направления вращения навесок на столе СВЧ-печи использовали схему размещения навесок на нем, представленную на рис. 10, а. Результаты исследований представлены в виде гистограммы на рис. 10, б.



**Рис. 10.** Схема расположения (в плане) навесок воды массой по 100 г на вращающемся столе СВЧ-печи (а), гистограмма относительной длительности нагрева и испарения воды из навесок (б): 1-8 – навески воды; 9 – выход волновода в камеру СВЧ-печи; 10 – вращающийся стол СВЧ-печи

В соответствии с гистограммой на рис. 10 (б), где за единицу была принята длительность нагрева и испарения воды в навеске № 8 (в центре стола СВЧ-печи), направление вращения навесок на столе также оказывает определенное влияние на исследуемый параметр. При этом разница длительностей испарения воды из навесок, вращающихся непрерывно в разных направлениях, тем значительнее, чем ниже мощность СВЧ-печи. То есть при увеличении номинальной мощности магнетрона СВЧ от 700 до 1200 Вт повышается равномерность их нагрева.

### Выводы

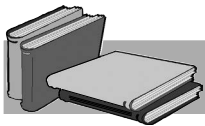
1. Сушка ПЖС СВЧ-излучением малой мощности не позволяет полностью удалить влагу из структурированной смеси, находящейся в стержневом ящике или на модельной оснастке. При этом характер распределения остаточной влаги вдоль стержня/формы не зависит от длительности их обработки СВЧ-излучением в оснастке (в пределах 9 минут обработ-

ки), номинальной мощности магнетрона и частоты вращения стола СВЧ-печи.

2. В группе одновременно нагреваемых навесок воды разной массы, но одинаковых геометрических размеров и равноудаленных от оси вращения стола СВЧ-печи, длительность испарения воды будет практически одинаковой. Для аналогичных навесок воды одинаковой массы при этих же условиях длительность испарения воды будет различаться на  $\pm (4-16) \%$ , что объясняется различием начального положения навесок по отношению к распределению стоячих волн в рабочем пространстве СВЧ-печи.

3. Начальное положение навесок на столе в области стоячих волн СВЧ-печи является одним из основных факторов, который предопределяет длительность нагрева и испарения из них воды.

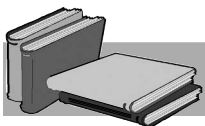
4. Увеличение мощности магнетрона СВЧ-печи от 700 до 1200 Вт повышает степень равномерности длительности испарения воды из навесок, сокращая эту разницу во времени с 16 % при мощности магнетрона 700 Вт до 3,6 % при мощности магнетрона 1200 Вт.



## ЛІТЕРАТУРА

1. Белобров Е.А., Карпенкова О.Л., Белобров Л.Е. и др. Вспомним забытые технологии: упрочнение литейных форм и стержней. *Литье Украины*. 2019. № 4. С. 24–27.
2. Белобров Е.А., Карпенкова О.Л., Белобров Л.Е. и др. Вспомним забытые технологии: упрочнение литейных форм и стержней. *Литье Украины*. 2016. № 3. С. 18–23.
3. Ренжин И.П., Реньш А.А. Совершенствование технологии применения пластичных жидкостекольных смесей. *Литейное производство*. 1984. № 10. С. 14–15.
4. Асташова Р.В., Козлов Л.Н. Применение газовых горелок инфракрасного излучения при подсушке форм. *Литейное производство*. 1980. № 10. С. 28–29.
5. Кечек А.Г. Проходное радиационное сушило для стержней. *Литейное производство*. 1966. № 10. С. 10–11.
6. Окресс А. СВЧ-энергетика. М.: Мир, 1965. 750 с.
7. Мустяца В.Т. Тепло- и массообмен во влажных материалах в электрических полях высокой частоты. Кишинев: Штиинца, 1985. 63 с.
8. Билько М.И., Томашевский А.К., Шаров П.П. Изменение мощности на СВЧ. М.: «Советское радио», 1976. 168 с.
9. Релях С.И., Андреева А.В. Особенности нагрева графитсодержащих формовочных смесей и тел СВЧ-излучением. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2014. № 6. С. 38–41.
10. Релях С.И., Андреева А.В. Оценка равномерности нагрева графитсодержащих формовочных смесей и тел СВЧ-излучением. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 2. С. 29–32.

Надійшла 02.12.2019



## REFERENCES

1. Belobrov, E.A., Karpenkova, O.L., Belobrov, L.E. et al. (2019). Recall forgotten technologies: hardening foundry molds and cores. *Casting of Ukraine*, no. 4, pp. 24–27 [in Russian].
2. Belobrov, E.A., Karpenkova, O.L., Belobrov, L.E. et al. (2016). Recall forgotten technologies: hardening foundry molds and cores. *Casting of Ukraine*, no. 3, pp. 18–23 [in Russian].
3. Renzhin, I.P., Rensh, A.A. (1984). Improving the technology of using plastic liquid-glass mixtures. *Foundry*, no. 10, pp. 14–15 [in Russian].
4. Astashova, R.V., Kozlov, L.N. (1980). The use of gas burners of infrared radiation when drying forms. *Foundry*, no. 10, pp. 28–29 [in Russian].

5. Keчек, A.G. (1966). Radiation feedthrough dryer for rods. *Foundry*, no. 10, pp. 10–11 [in Russian].
6. Okress, A. (1965). Microwave energy. Moscow: Mir, 750 p. [in Russian].
7. Mustiatsa, V.T. (1985). Heat and mass transfer in wet materials in high frequency electric fields. Kishinev: Shtiintsa, 63 p. [in Russian].
8. Bilko, M.I., Tomashevsky, A.K., Sharov, P.P. (1976). Change in microwave power. Moscow: "Sovetskoe radio", 168 p. [in Russian].
9. Repyakh, S.I., Andreeva, A.V. (2014). Features of heating graphite-containing molding sand and bodies with microwave radiation. *Metallurgical and mining industry*, no. 6, pp. 38–41 [in Russian].
10. Repyakh, S.I., Andreeva, A.V. (2015). Evaluation of the uniformity of heating of graphite-containing molding compounds and bodies with microwave radiation. *Metallurgical and mining industry*, no. 2, pp. 29–32 [in Russian].

Received 02.12.2019

**Анотація**

Л.І. Солоненко, канд. техн. наук, доц. каф. технології та управління ливарними процесами, e-mail: solonenkoli14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>

Одеський національний політехнічний університет (Одеса, Україна)

## Деякі особливості сушіння ливарних форм і стрижнів в області стоячих хвиль надвисокочастотного випромінювання

У статті розглянуто деякі особливості сушіння піщано-рідкоскляних ливарних форм і стрижнів в області стоячих хвиль надвисокочастотного випромінювання малої потужності (700–1200 Вт) з частотою 2450 МГц і довжиною хвилі 122,5 мм. Встановлено, що конвективно-теплова сушка при 90–100 °С піщано-рідкоскляної суміші забезпечує ливарним формам/стрижням високу міцність і газопроникність, низьку обсіпальність. У той же час сушка надвисокочастотним випромінюванням малої потужності тієї ж самої суміші різко знижує міцність, газопроникність і підвищує її обсіпальність. Сушка надвисокочастотним випромінюванням суміші в ливарній оснастці не призводить до повного видалення з неї вологи. При цьому характер розподілу залишкової вологи уздовж форми/стрижня не залежить від тривалості його обробки надвисокочастотним випромінюванням в ливарній оснастці, потужності магнетрона і частоти обертання столу НВЧ-печі.

За результатами безвідносного нагріву і випаровування води в робочому просторі НВЧ-печі встановлено, що в групі наважок води різної маси, які одночасно нагріваються, але однакових геометричних розмірів і рівновіддалених від осі обертання столу надвисокочастотної печі, тривалість випаровування води буде практично однаковою. Для аналогічних наважок води однакової маси при цих же умовах тривалість випаровування води буде відрізнятися на  $\pm (4-16) \%$ , що пояснюється різницею в початковому положенні наважок по відношенню до розподілу стоячих хвиль в робочому просторі НВЧ-печі. Тобто, початкове положення наважок на столі в області стоячих хвиль НВЧ-печі є одним з основних факторів, який зумовлює тривалість нагріву і випаровування з них води. При цьому збільшення потужності магнетрона НВЧ-печі від 700 до 1200 Вт підвищує ступінь рівномірності тривалості випаровування води з наважок, скорочуючи цю різницю в часі з 16 % при потужності магнетрона 700 Вт до 3,6 % при потужності магнетрона 1200 Вт.

**Ключові слова**

Стрижень, форма, сушка, вода, нагрів, випаровування, випромінювання, магнетрон.

**Summary**

**L.I. Solonenko**, PhD (Engin.), Associate Professor at the Department of Technology and Management of Foundry Processes,  
e-mail: solonenkoli14@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-2092-8044>

*Odessa National Polytechnic University (Odessa, Ukraine)*

**Some features of drying casting forms and cores in the field of standing waves of microwave radiation**

*The article discusses some of the features of drying sand-liquid glass foundry molds and cores in the region of standing waves of microwave radiation of low power (700–1200 W) with a frequency of 2450 MHz and a wavelength of 122.5 mm.*

*It has been established that convective-thermal drying at 90–100 °C of a sand-liquid glass mixture provides casting molds/cores with high strength and gas permeability, low crumbling. At the same time, drying by microwave radiation of low power of the same mixture dramatically reduces the strength and gas permeability and increases its crumbling. Drying by microwave radiation of the mixture in the foundry tool does not completely remove moisture from it. Moreover, the nature of the distribution of residual moisture along the mold/core does not depend on the duration of its treatment with microwave radiation in the foundry tool, the power of the magnetron and the frequency of rotation of the table of the microwave oven.*

*According to the results of irrelevant heating and evaporation of water in the working space of the microwave oven, it was found that in the group of simultaneously heated water samples of different weights, but of the same geometric dimensions and equally spaced from the axis of rotation of the microwave oven table, the duration of water evaporation will be almost the same. For similar water samples of the same mass, under the same conditions, the duration of water evaporation will differ by  $\pm (4-16) \%$ , which is explained by the difference in the initial position of the samples in relation to the distribution of standing waves in the working space of the microwave oven. That is, the initial position of the hanging on the table in the region of the standing waves of the microwave oven is one of the main factors that determines the duration of heating and evaporation of water from them. An increase in the power of the magnetron of the microwave oven from 700 to 1200 W increases the uniformity of the duration of the evaporation of water from the samples, reducing this time difference from 16 % at a power of a magnetron of 700 W to 3.6 % at a power of a magnetron of 1200 W.*

**Keywords**

*Core, form, drying, water, heating, evaporation, radiation, magnetron.*