



## ENERGY EFFICIENCY OF HIGH-INTENSITY PROCESSES OF MICROWAVE PROCESSING OF MATERIALS

**Natalia AI. KOLESNYCHENKO, Irina L. BOSKOVA**

The Department of power engineering and pipeline transport energy carriers, Institute of Refrigeration, Cryogenic Technologies and Eco Energetic, Odessa National Academy of Food Technologies

**Abstract** – *The microwave processing of materials is promising due to the possibility of process intensification essential that, in particular, to achieve high energy efficiency. One of the most advanced applications of microwave radiation - the production of ceramic materials. Using microwave heating offers the possibility of developing a fundamentally new technology development of perspective ceramic, semiconductor and composite materials having significantly higher compared to the existing operational and functional properties.*

*The article deals with the conditions to ensure the uniformity of microwave heating of material and working parameters of processing, limiting the intensity of exposure to microwave fields at which begin to manifest relaxation phenomena in the body. With high-intensity processes the linear relationship between heat flux and temperature gradient is broken. In such cases, the heat flux density is determined by the generalized Fourier law, which takes into account the impact of the relaxation time on the distribution of heat in the body. The nonlinear hyperbolic operator allows you to identify the conditions of strong and weak discontinuities of the thermal field. It is shown that to the solution to problems of heat conduction in this case instead of the hyperbolic heat equation can use a solution of a parabolic equation.*

**Keywords** – *intensity, microwave heating, Fourier law, relaxation time, thermal conductivity.*

## EFICIENȚA ENERGETICĂ A PROCESELOR CU INTENSITATE ÎNALTĂ LA PRELUCRAREA MATERIALELOR CU MICROUNDĂ

**Natalia COLESNICENCO, Irina BOȘCOVA**

Departamentul de energie termică și transport prin conducte a resurselor energetice  
Institutul de frig, criotehnologii și ecoenergetică  
Academia națională a tehnologiilor alimentare din Odessa

**Rezumat** – *Prelucrarea materialelor cu microunde este un domeniu de perspectivă grație oportunității intensificării esențiale a procesului, ce permite atingerea eficienței energetice sporite. Una din cele mai performante ramuri de aplicare a procesului de iradiere cu microunde este obținerea materialelor din ceramică. Utilizarea energiei iradierii cu microunde deschide posibilități de elaborare a tehnologiilor principale noi la crearea materialelor de perspectivă din ceramică, compozite și de semiconductori, care posedă proprietăți de exploatare și funcționale mai performante comparativ cu cele existente.*

*În lucrare sunt examinate condițiile asigurării uniformității încălzirii materialului cu microunde și parametrii operaționali de prelucrare, limitând intensitatea acțiunii câmpului cu microunde, la care încep a se manifesta fenomene de relaxare în corp. În cazul proceselor cu intensitate sporită dependența liniară a fluxului de căldură de gradientul de temperatură încetează de a se respecta. Atunci, densitatea fluxului termic se determină prin legea generalizată a lui Fourier, care consideră influența timpului de relaxare asupra răspândirii căldurii în corp. Operatorul nelinear de tip hiperbolic permite identificarea condițiilor de apariție a rupturilor mici și mari ale câmpului termic. Este arătat, că pentru soluționarea problemelor de conductibilitate termică în cazul examinat în loc de ecuația hiperbolică poate fi folosită ecuația parabolică.*

**Cuvinte cheie** – *intensitate, încălzire cu microunde, legea lui Fourier, timpul de relaxare, conductibilitatea termică.*

## ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОЦЕССОВ МИКРОВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

**Н.А. Колесниченко, И.Л. Бошкова**

Кафедра теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей  
Институт холода, криотехнологий и экоэнергетики  
Одесская национальная академия пищевых технологий

**Реферат** – *Микроволновая обработка материалов является перспективной благодаря возможности существенной интенсификации процесса, что позволяет достичь высокой энергетической эффективности. Одна из*

самых развитых областей применения микроволнового излучения – получение керамических материалов. Использование энергии микроволнового излучения открывает возможности разработки принципиально новых технологий создания перспективных керамических, композиционных и полупроводниковых материалов, обладающих существенно более высокими по сравнению с существующими эксплуатационными и функциональными свойствами.

В статье рассматриваются условия обеспечения однородности микроволнового нагрева материала и рабочие параметры обработки, ограничивающие интенсивность воздействия микроволнового поля, при которой начинают проявляться релаксационные явления в теле. При высокоинтенсивных процессах линейная связь между тепловым потоком и градиентом температур нарушается. В таких случаях плотность теплового потока определяется обобщенным законом Фурье, который учитывает влияние времени релаксации на распространение теплоты в теле. Нелинейный оператор гиперболического типа позволяет выявить условия возникновения сильных и слабых разрывов теплового поля. Показано, что для решения задач теплопроводности в рассматриваемом случае вместо гиперболического уравнения теплопроводности можно использовать решение параболического уравнения.

**Ключевые слова** – интенсивность, микроволновой нагрев, закон Фурье, время релаксации, теплопроводность.

## 1. ЭФФЕКТЫ МИКРОВОЛНОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ КЕРАМИКИ

Одна из самых развитых областей применения микроволнового излучения – получение керамических материалов [1]. Использование нагрева микроволновым излучением открывает возможности разработки принципиально новых технологий создания перспективных керамических, композиционных и полупроводниковых материалов, обладающих существенно более высокими по сравнению с существующими эксплуатационными и функциональными свойствами [2, 3]. Отмечается, что высокая скорость нагрева в микроволновом поле позволяет получать керамические и композиционные материалы с тонкой и однородной микроструктурой, имеющих, как следствие, повышенную прочность, твердость, трещиностойкость [4], предложен термодиффузионный механизм ускорения массопереноса в керамике и порошковых компактах при воздействии мощных ВЧ и СВЧ-полей. Утверждается, что на границах раздела фаз с разным уровнем диэлектрических потерь возникают локальные градиенты температуры, которые обуславливают появление термодиффузионных потоков, стимулирующих твердофазные реакции. В настоящее время отмечается интерес к применению МВ нагрева, совместного с конвективным методом. Такая термообработка в [5] получила название гибридной. На рис. 1 представлена схема распределения температуры при конвективном, микроволновом и гибридном подводе теплоты [6].

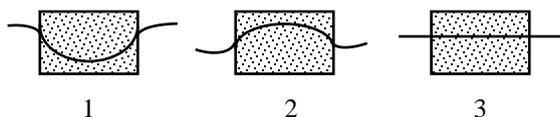


Рис. 1. Профили температур в материале при различных способах нагрева

1 – конвективный нагрев, 2 – микроволновой, 3 – гибридный

Экспериментальные исследования микроволновой и гибридной термообработки [5] глиняных материалов показали, что структура готового керамического изделия отличается однородностью, поверхность остается цельной, в то время как при электрическом обжиге с тем же темпом нагрева поверхность была покрыта трещинами, а само

изделие деформировалось. Сравнение гибридного нагрева с электрическим при различном составе материала для производства керамики показало, что энергозатраты снижаются на 30-50%. Также может быть в два раза снижена продолжительность обжига. В [7] отмечается, что низкое значение числа Био для  $Al_2O_3$  приводит к равномерности распределения температур по толщине, однако большие изменения в абсорбируемой мощности в образцах SiC приводят к отклонениям порядка  $30^\circ C$  по температуре на толщине 5 см и около  $50^\circ C$  на толщине 10 см. При толщине 12 см в образце расчетным путем были обнаружены резонансные явления, которые проявлялись в возникновении стоячей волны.

При одинаковой плотности образцы, спеченные в микроволновом поле, характеризуются значительно меньшими размерами кристаллитов [8]. Данная особенность микроволнового спекания связана с интенсификацией зернограничной диффузии, что приводит к превалированию процессов уплотнения за счет удаления открытой пористости над процессами роста зерна керамики.

Сопоставление многочисленных экспериментальных данных позволяет высказать предположение о том, что влияние микроволновой обработки на процессы усадки и роста зерен при спекании сильнее проявляется в веществах, обладающих ионной проводимостью, чем в диэлектриках [8]. По-видимому, это можно связать с интенсификацией диффузионных процессов за счет возбуждения микроволновым полем ионных токов в обрабатываемых веществах с ионной проводимостью.

Особый интерес представляет применение микроволнового поля для получения функционально-градиентных материалов (ФГМ). ФГМ, как новый класс материалов, характеризуются плавным изменением механических свойств или химического состава по глубине от поверхности, они находят широкое применение в различных устройствах с большими термомеханическими нагрузками. Благодаря своим особенностям, эти материалы имеют более высокую степень устойчивости к износу и растрескиванию при воздействии скользящего контакта [9]. Применение ФГМ дает возможность значительно улучшить срок службы и надежность теплозащитных покрытий газовых турбин [10]. Детали, выполненные с применением ФГМ, более долговечны, чем керамические. Разрушение

структуры и материала деталей машин в основном наблюдается вблизи поверхностей и обусловлено возникновением концентрации напряжений при воздействии внешних нагрузок. Применение специальных покрытий на основе ФГМ позволяет существенно уменьшить износ и усталость деталей машин [9]. Для производства ФГМ применяют ряд методов: спекание в печи, индукционный нагрев, нагрев в электромагнитном поле микроволнового и миллиметрового диапазона. Микроволновое поглощение в композиционно градиентных материалах приводит к неоднородному выделению тепла. Композиционная избирательность микроволнового нагрева позволяет создавать распределения температуры, способствующие уменьшению термических напряжений. Эффективность получения таких материалов зависит от знания точных законов распределения неоднородности [11]. В настоящее время получение ФГМ при использовании микроволнового нагрева (МВН) находятся на ранней стадии. Однако целесообразность применения МВН продемонстрирована для многих практически важных металлокерамических композиций [12]. В работе [13] уделяется особое внимание термодиффузионному механизму ускорения массопереноса в керамике и порошковых компактах при воздействии мощных ВЧ и МВ-полей. Утверждается, что на границах раздела фаз с разным уровнем диэлектрических потерь возникают локальные градиенты температуры, которые обуславливают появление термодиффузионных потоков, стимулирующих твердофазные реакции. Таким образом, избирательный характер взаимодействия микроволнового поля с различными веществами определяет перспективность применения метода микроволнового нагрева для производства керамики, спекания ФГМ и оксидных порошков.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МВ ПОЛЯ НА ГЛИНУ

Экспериментальный стенд [14] состоял из рабочей камеры размерами 306×201×322 мм, в которую поступала энергия через волновод от магнетрона с частотой генерации 2,45 ГГц и регулируемой мощностью 90...800 Вт. Рационально подобранные режимы дают возможность получать качественные материалы. Существенную роль в процессе микроволнового нагрева играют теплофизические свойства обрабатываемого образца, поскольку эффективность и равномерность нагрева зависит не только от диэлектрических свойств образца, но и от его способности распределять выделившуюся теплоту по своему объему.

Для исследования образец помещался в МВ камеру, включался магнетрон на заданную мощность. Поскольку непосредственно во время опытов измерять температуру и массу было невозможно, предполагалось, что каждый последующий образец будет выдерживаться в камере на выбранный шаг времени  $\Delta t$  больше предыдущего, а по результатам

измерения температуры и массы, полученным во время выемки очередного образца, получались данные для МВ нагрева единичной пластины. Однако было обнаружено, что погрешность не увеличилась при использовании одного образца, если измерения проводить в течение короткого промежутка времени, при этом образец практически не остывал. Производились замеры температуры на поверхности образца, в его центре и крае, а также массы керамического изделия. Температура измерялась с помощью цифрового мультиметра М 4581Ц с пределом допускаемой погрешности  $\pm(0,01a+30 \text{ }^\circ\text{C})$ , где  $a$  – измеряемое значение. Процедура МВ обработки с последующими замерами температуры и массы повторялась до тех пор, пока масса образца не стабилизировалась. Начальная толщина образца составляла 6,9 мм. Было замечено, что температура центра образца и поверхности существенно отличались, несмотря на то, что расстояние между ними составляло 3,5 мм. Средний темп нагрева материала в эксперименте составлял 1,03 К/с (61,6 К/мин), что выше значений, полученных в [3] для микроволнового нагрева, и существенно превышает величину, рекомендуемого для конвективного нагрева: на уровне 0,5 К/с. При этом не наблюдалось образования трещин и деформации формы образца. Это связано с непрерывным увлажнением поверхности влагой, которая под действием МВ поля выходила на поверхность, благодаря чему она не пересыхала и механические напряжения не возникали. Наивысшая скорость сушки наблюдалась в первые 30 с, после чего наблюдалось ее падение. Наивысшая скорость нагрева была в этом же периоде и составляла  $\frac{\Delta t}{\tau} = 2,07 \text{ К/с}$ , затем температура падает вследствие испарения влаги, после чего снова начинает повышаться. В интервале 90 – 120 с скорость нагрева также была высокой, однако, вследствие значительной потери влаги, ее значение было ниже первоначального:  $\frac{\Delta t}{\tau} = 1,43 \text{ К/с}$ . Далее темп нагрева снижается, а после 150 с температура образца начинает падать. На этом же участке, как отмечено выше, испарение влаги прекратилось. Отсутствие нагрева можно объяснить снижением диэлектрических характеристик материала – тангенса угла потерь и диэлектрической проницаемости, вследствие чего количество микроволновой энергии, преобразованной материалом во внутреннюю энергию, резко снижается и образец начинает остывать, не воспринимая падающую на него энергию микроволнового поля. Следовательно, сам материал не является полярным диэлектриком, и дальнейшая его обработка в МВ камере нецелесообразна. Таким образом, микроволновой нагрев следует осуществлять только на этапе сушки глиняных изделий, а в дальнейшем обжиг проводить с использованием традиционных методов. При производстве технической керамики возможен обжиг в микроволновой печи, поскольку химический состав материала для ее изготовления позволяет интенсивно

преобразовывать энергию микроволнового поля во внутреннюю. Результаты экспериментов представлены на рис. 1.

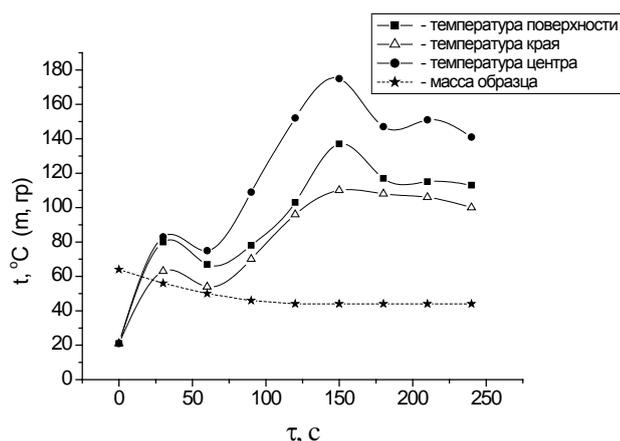


Рис. 1. Изменение температуры и массы образца (глина) при микроволновом нагреве

Эксперименты на образцах большей толщины ( $\delta \geq 30$  мм) и при большей выходной мощности магнетрона (600 Вт) показали, что при нагреве со скоростью выше 0,5 К/с в материале возникают трещины, поверхность становится неоднородной, а испарившаяся в объеме влага формирует внутренние микроканалы, вследствие чего наблюдается существенная неравномерность процесса спекания.

Для оценки энергетической эффективности проводились тепловые расчеты, в которые входил расчет полезного теплового потока, определяемого теплотой испарения влаги и нагрева материала (1) и потери теплоты, определяемые лучистой  $Q_{луч}$  и конвективной  $Q_{конв}$  составляющей.

$$Q_{пол} = \left[ \Delta m \cdot r + \frac{m_0 + m_k}{2} c_{вл.м} (t_k - t_0) \right] / \tau, \text{ Вт} \quad (1)$$

где  $c_{вл.м}$  — теплоемкость влажного материала, Дж/(кг·К)

Теплота преобразования микроволновой энергии в материале определяется суммой полезного теплового потока и тепловых потерь:

$$Q_{\Sigma} = Q_{пол} + Q_{конв} + Q_{луч} \quad (2)$$

Энергетическая эффективность МВ нагрева определяется значением КПД, представляющим собой отношение теплоты преобразования к выходной мощности магнетрона:

$$\eta_k = \frac{Q_{\Sigma}}{P_{вых}} \quad (3)$$

Значение  $\eta_k$  находится по эмпирическим зависимостям, полученных в результате обработки экспериментальных данных. Для оценки теплоты, преобразованной в материале при взаимодействии с микроволновым полем, можно применить следующую зависимость:

$$q = \frac{P_{вых} \cdot \eta_k}{V}, \text{ Вт/м}^3, \quad (4)$$

где  $V$  — объем, занимаемый материалом.

### 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ

Нахождение решений прямых задач нестационарной теплопроводности позволяет получить информацию о тепловом состоянии тела, которое определяется температурным полем исследуемого объекта. На основе применения теории обобщенных функций путем сведения задачи теплопроводности для многослойной конструкции к однослойной с переменными (разрывными) физическими свойствами среды в замкнутом виде получено точное аналитическое решение задачи нестационарной теплопроводности с переменными во времени внутренними источниками теплоты [15]. Наиболее общий и результативный подход к решению краевых задач теплопроводности с внутренними источниками теплоты был предложен А.В. Лыковым [16]. В этом труде академик Лыков привел решения задач теплопроводности при непрерывно действующих источниках теплоты, постоянных и переменных, для основных тел: полуограниченный массив, неограниченная пластина, сплошной цилиндр, шар при граничных условиях I и III рода. Так, для расчета температурного поля в полуограниченном теле с действующими источниками теплоты приводится решение системы дифференциальных уравнений при граничных условиях I рода и III рода. Приведенные решения получены из дифференциальных уравнений параболического типа. Как отмечено в [17], конкретному виду изотермической поверхности соответствует определенный дифференциальный оператор теплопроводности, среди которых оператор параболического типа является частным случаем. Этому оператору соответствует строго определенный класс изотермических поверхностей, и выйти за его пределы нельзя изменением начальных и граничных условий. Изучение вопроса, при каких условиях нельзя пренебрегать конечной скоростью распространения теплоты, показало, что для решения задач теплопроводности в случае производства керамических материалов и пластических масс, можно использовать решение параболического уравнения, поскольку темп нагрева здесь ограничивается значениями 0,4 – 1,5 К/с. Как следует из [18], граничная скорость нагрева для квазистационарного режима может быть определена по зависимости:

$$\left. \frac{dT}{dt} \right|_{\max} = \frac{T_w - T_0}{9\tau_r} \quad (5)$$

Для глинистых материалов с преобладанием каолина в соответствии с [19] время релаксации ориентировочно принято равным  $\tau_r = 15$  мс. Тогда  $\left. \frac{dT}{dt} \right|_{\max} = 13185$  К/с

(в качестве  $T_w$  принята температура плавления каолина (1800°C), начальная температура  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ ).

Такая скорость нагрева в технологиях производства

керамических изделий неприемлема, ее величина значительно выше всех допустимых значений. Это является обоснованием применения уравнений параболического типа при составлении математических моделей теплопереноса любой интенсивности при термообработке рассматриваемых материалов.

## 7. СИМВОЛЫ И СОКРАЩЕНИЯ

$m$  – масса материала,

$Q$  – тепловой поток,

$t$  – температура, °С;

$T$  – температура, К;

$P$  – мощность,

$V$  – объем,

$\tau$  – время,

$\eta$  – коэффициент полезного действия;

$\delta$  – толщина слоя, м;

$c$  – теплоемкость,

$\rho$  – плотность,

МВ – микроволновое;

луч – лучистый,

конв – конвективный,

к – камера,

вых – выходная,

пол – полезный.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нагрев шликера в микроволновом поле при производстве керамических изделий позволяет с высокой интенсивностью при сохранении качества получаемых материалов проводить тепловую обработку. Образцы из глины без добавки связывающих веществ интенсивно сушатся в микроволновом поле, однако после извлечения влаги их нагрев прекращается, что исключает возможность обжига. Для глиняного образца толщиной 6,9 мм максимальная скорость нагрева составляла 2,07 К/с, что в четыре раза превышает скорость нагрева при конвективном способе подвода теплоты.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] L.M. Sheppard. *Manufacturing ceramics with microwave: the potential for economical production*, Am. Ceram. Soc. Bull, 1988, Vol. 67, pp. 3041-3086
- [2] Yu. V. Bykov, S. V. Egorov, A. G. Eremeev. *Fabrication of Metal-Ceramic Functionally Graded Materials by Microwave Sintering*, Inorganic Materials: Applied Research, 2012, Vol. 3, № 3, pp. . 261-269.

- [3] Yu.V. Bykov, K.I. Rybakov, V.E. Semenov. *High-temperature microwave processing of materials*, J. Phys. D: Appl. Phys., 2001, Vol. 34, pp. 55-75.
- [4] Ю.М. Анненков, А.С. Ивашутенко. *Физическая модель спекания и модифицирования керамики в высокочастотных и сверхвысокочастотных полях*, Изв. Томского политех. ун-та, 2005, Т.308, №7, с. 30-35.
- [5] Lukas Robak. *Mikrowellenunterstuetze Waerme- und Stoffuebertragung beim Troken und Entbindern Technischer Keramik*, Dissertation zur Erlangung des akademisches Grades Doktor-Ingenier. Technischen Universitaet Bergakademie Freiburg, Freiburg, 2005, 125 p.
- [6] S. Komarneni, Q. Li, K.M. Steffansson, R. Roy *Microwave-hydrothermal processing for synthesis of electroceramic powders*, J. Mater, 1993, Vol. 8, № 12, pp. 3176-3183.
- [7] Anindita Chatterjee, Tanmay Basak, K.J. Ayappa. *Analysis of microwave sintering of ceramics*, AIChE Journal, 1998, Vol. 44, № 10, pp. 2301-2311.
- [8] А. С. Ванецев. *Спекание оксидных порошков с использованием микроволнового воздействия*, М.: МГУ, 2011, 32 с.
- [9] С.М. Айзикович, В.М. Александров, А.С. Васильев, Л.И. Крнев, И.С. Трубчик. *Аналитические решения смешанных осесимметричных задач для функционально-градиентных сред*, М: Физматлит, 2011, 192 с.
- [10] R. C. Wetherhold, S. Seelman, J. Wang. *The use of functionally graded materials to eliminated or control thermal deformation*, Composites Science and Technology, 1996, № 56, pp. 1099–1104.
- [11] S.A. Lukasiewicz, R. Babaei, R. E. Qian. *Detection of material properties in a layered body by means of thermal effects*, J. of Thermal Stresses, 2003, Vol. 26, № 1, pp. 13–23.
- [12] M.A. Willert-Porada, R. Borchert. *Microwave sintering of metal-ceramic FGM*, Functionally Graded Materials, 1996, P. 349–354.
- [13] Yu. V. Bykov, S. V. Egorov, A. G. Eremeev. *Fabrication of Metal-Ceramic Functionally Graded Materials by Microwave Sintering*, Inorganic Materials: Applied Research, 2012, Vol. 3, № 3, pp. 261-269.
- [14] І.Л. Бошкова, Н.В. Волгушева, Ю.В. Корнієнко. *Вивчення термічних явищ при взаємодії глини з мікрохвильовим полем*, Наукові праці ОНАХТ. – Одеса:ОНАХТ, 2009, Вип. 35, т.1, С. 8-10.
- [15] Аверин Б. В. *Математическое моделирование внутренних источников теплоты, температурных полей и термических напряжений в многослойных радиопрозрачных укрытиях мощных передающих антенн*: Автореф. дисс. канд. техн. наук, Моск. госуд. акад. тонкой хим. Технол, М., 1999, 20 с.
- [16] А. В. Лыков. *Теория теплопроводности*, М., 1967, 559 с.
- [17] А.Г. Шашков, В.А. Бубнов, С.Ю. Яновский. *Волновые явления теплопроводности*, М., Эдиториал УССР, 2004, 296 с.
- [18] К. Б. Исаев. *К вопросу об учете конечной скорости распространения тепла в твердом теле*, Тр. V Минского межд. форума по теплообмену ММФ-2004, Минск: ИТМО НАНБ, 2004, С. 1-6.
- [19] М.Й. Шумскайте, В.Н. Глинских. *Анализ влияния объемного содержания и типа глинистых минералов на релаксационные характеристики песчано-алевритовых образцов керна*, Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. Всесоюзн. НИИ организации, управления и экономики нефтегазовой промышленности, 2015, №7, с. 35-38.

**Колесниченко Наталья Александровна.** Родилась в г. Одессе 28.11.1990. Закончила ОГАХ, ф-т холодильных машин и технологий в 2013 г. Аспирант каф. Теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей Одесской государственной академии пищевых технологий.