

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ / CHEMICAL TECHNOLOGY

Оригинальная статья / Original article

УДК 510.8

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-1-133-138>

## Математическая модель процесса горения жидкого органического энергоносителя

© Л.М. Кондратьева, Н.А. Корчевин, О.Л. Свердлова, Л.Г. Евсевлеева

Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация

**Резюме:** Моделирование технологических объектов для сжигания жидких энергоносителей с попыткой точного описания гидродинамики процесса значительно усложняет модель. В статье рассматривается вопрос об эффективности использования органического энергоносителя. Представлена математическая модель процесса горения жидкого топлива. Моделирование ведется с использованием ряда обоснованных упрощающих предположений, что позволяет свести исходную модель к более простым зависимостям между существующими для проведения процесса параметрами. Построенная модель включает стационарную модель процесса горения и модель сжигания жидкого топлива в аппарате. Рассмотрены основные факторы, влияющие на характер протекания процесса. Получена формула для расчета концентрации кислорода у реакционной поверхности. При рассмотрении скорости реакции горения полагали, что она определяется не только концентрацией кислорода в диффузионном слое, но и суммарной поверхностью непрореагировавших частиц, вычисленной с учетом плотности распределения частиц. Составлен материальный баланс кислорода, который включает два уравнения – для диффузионной и плотной части. Результаты расчетов представлены на приведенных графиках. Разработана инженерная вычислительная модель для расчета энергетических характеристик горения жидкого углеводородного топлива в технологической печи. Полученная модель горения может быть использована для оценки масштабов и прогнозирования последствий аварийных ситуаций.

**Ключевые слова:** математическая модель, процесс горения, органический энергоноситель, жидкое топливо, скорость реакции, реакционная зона, плотная часть, диффузионная часть, температура, безразмерный параметр

**Информация о статье:** Дата поступления 26 июля 2018 г.; дата принятия к печати 4 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 29 марта 2019 г.

**Для цитирования:** Кондратьева Л.М., Корчевин Н.А., Свердлова О.Л., Евсевлеева Л.Г. Математическая модель процесса горения жидкого органического энергоносителя // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9, N 1. С. 133–138. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-1-133-138.

## A mathematical model of the combustion process of liquid organic energy products

© Larisa M. Kondratyeva, Nikolay A. Korchevin, Olga L. Sverdlova, Larisa G. Evsevleeva

Angarsk State Technical University, Angarsk, Russian Federation

**Abstract:** Simulation of technological processes involving the combustion of liquid energy products with an attempt to accurately describe their hydrodynamics is known to greatly complicate the model. In this article, we discuss the problem of effective use of organic energy products. A mathematical model describing the combustion process of liquid fuel is presented. The modelling is carried out using a number of justified simplifying assumptions, which permit the original model to be reduced to simpler dependencies between the parameters of the process. The constructed model includes a stationary model of the combustion process and that of liquid fuel burning in a furnace. Key factors affecting the character of the process are investigated. A formula for calculating the oxygen concentration at the reaction surface is obtained. The combustion rate under consideration was assumed to be determined not only by the oxygen concentration in the diffusion layer, but also by the total surface of unreacted particles, calculated taking into account the density of the particle

distribution. The material balance of oxygen is drawn, which includes two equations, i.e. for the diffusion and dense parts. The results of the calculations are presented in the form of diagrams. An engineering computational model has been developed for calculating the energy characteristics of the combustion of liquid hydrocarbon fuel in an industrial furnace. The resulting combustion model can be used for predicting the extent and consequences of emergency situations.

**Keywords:** mathematical model, combustion process, organic energy product, liquid fuel, reaction rate, reaction zone, dense part, diffusion part, temperature, dimensionless parameter

**Information about the article:** Received July 26, 2018; accepted for publication March 4, 2019; available online March 29, 2019.

**For citation:** Kondratyeva L.M., Korchevin N.A., Sverdlova O.L., Evsevleeva L.G. A mathematical model of the combustion process of liquid organic energy products. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]. 2019, vol. 9, no. 1, pp. 133–138. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-1-133-138.

## ВВЕДЕНИЕ

Органическое топливо является основным источником энергии большого числа технологических процессов.

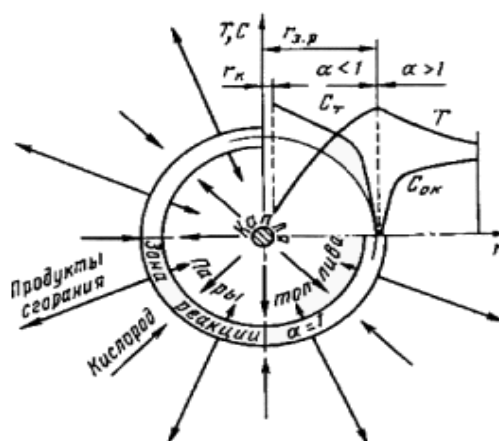
Механизм процесса передачи тепла, протекающего в печи, происходит следующим образом: в топочную камеру печи при помощи форсунки вводится распыленное топливо, а также необходимый для горения нагретый или холодный воздух<sup>1</sup>. Высокая степень дисперсности топлива обеспечивает его интенсивное перемешивание с воздухом и более эффективное горение<sup>2</sup>.

Несмотря на практические достижения в создании технологических печей для сжигания органических жидких энергоносителей, методика расчета еще только разрабатывается. Практика моделирования технологических объектов показывает, что попытка точного описания гидродинамики значительно усложняет модель, не давая существенных результатов по сравнению с практическими исследованиями [1]. Используя ряд обоснованных упрощающих предположений, исходную модель можно свести к более простым зависимостям между параметрами процесса.

Целью настоящей работы являлось создание компактной математической модели горения жидкого органического энергоносителя в технологической печи, учитывающей основные факторы, влияющие на характер протекания процесса. Математическое описание включает дифференциальные уравнения, описывающие материальный баланс в плотной и диффузионной части реакционной зоны (рис. 1).

<sup>1</sup> Ляшков В.И. Теоретические основы теплотехники: учеб. пособие. М.: Машиностроение-1, 2005. 260 с. / Lyashkov V.I. *Teoreticheskie osnovy teplotekhniki* [Theoretical foundations of heating engineering]. Moscow: Mashinostroenie-1 Publ., 2005, 260 p.

<sup>2</sup> Померанцев В.В. Основы практической теории горения. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 312 с. / Pom'erantsev V.V. *Osnovy prakticheskoi teorii goreniya* [Practical combustion theory]. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1973, 262 p.



**Рис. 1. Механизм горения капли жидкого топлива:**  $r_k$  – радиус капли;  $r_z$  – радиус зоны реакции;  $C_T$ ,  $C_{ок}$  – объемная концентрация топлива (пары) и окислителя (кислород)<sup>3</sup>

**Fig. 1. Combustion of a liquid fuel droplet:**  $r_k$  – droplet radius;  $r_z$  – radius of reaction zone;  $C_T$ ,  $C_{ox}$  – volume concentration of fuel (steam) and oxidizer (oxygen)<sup>3</sup>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Определяющими факторами, влияющими на протекание процесса горения жидких органических топлив, являются [2]:

- температура среды;
- состав и скорость подаваемого топлива и газа;
- доли газа, проходящего через плотную и диффузионную фазы;
- скорость химических реакций и их диффузионное торможение;
- скорость выгорания частиц;
- распределение частиц по времени пребывания в реакционной зоне.

<sup>3</sup> Делягин Г.Н., Лебедев В.И., Пермяков М.А., Хаванов П.А. Теплогенерирующие установки: учебник для вузов М: Стройиздат, 1986. 559 с. / Delyagin G.N., Lebedev V.I., Permyakov M.A., Khavanov P.A. *Teplogeneriruyushchie ustanovki* [Heat-generating installations]. Moscow: Stroizdat Publ., 1986, 559 p.

Основные упрощающие предположения:

1. Жидкая капля имеет сферическую форму.
2. Пламя представляет собой сферическую поверхность.
3. Пламя образуется в результате реакции между парами горючего и кислородом, которые реагируют в стехиометрическом соотношении.
4. Рассматривается стационарное состояние при постоянном диаметре капли.
5. Температура капли одинакова по всему объему.
6. Давление в течение всего процесса горения считается постоянным.

Сравнение расчетных данных с имеющимися в литературе проводилось при фиксированном значении температуры<sup>4</sup>. Температура топлива может варьироваться из соображений снижения оксидов и спекания золы, коррозионной и температурной стойкости конструкционных материалов аппарата и т.д.

Для численного решения задачи система дифференциальных уравнений химической кинетики решалась с использованием программы, взятой из библиотеки стандартных программ Slatex, в основу которой заложен метод Гира. Константы скоростей химических реакций рассчитывались по закону Аррениуса с зависящими от температуры коэффициентами.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

*Стационарная модель процесса горения.* Исходя из одномерности движения потоков математическая модель стационарного горения может быть представлена следующими уравнениями, полученными из уравнения диффузии [3]:

$$\frac{D}{\rho^2} \times \frac{d(\rho^2 dC)}{d\rho} = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями

$$D \frac{dC}{d\rho} \Big|_{\rho=r} = \alpha K(T) C(t), \quad C(r_0) = C^d, \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии кислорода;  $r_0$  – радиус капли;  $C^d$  – концентрация кислорода в диффузионном слое, т.е. вне капли;  $K(T) = k_0 \exp(-E / RT)$  – константа скорости реакции;  $k_0$  – предэкспонента;  $E$  – энергия активации;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $\alpha$  – избыток кислорода в смеси.

<sup>4</sup> Белоусов В.Н., Смородин С.Н., Смирнова О.С. Топливо и теория горения: учеб. пособие; в 2 ч. Ч. I. Топливо. СПб.: Изд-во СПбГТУРП, 2011. 84 с. / Belousov V.N., Smorodin S.N., Smirnova O.S. *Toplivo i teoriya gorennya* [Fuel and combustion theory]. St. Petersburg: Saint Petersburg State Technological University of Plant Polymers Publ., 2011, 84 p.

Решая уравнения (1) и (2), получим формулу для расчета концентрации кислорода у реакционной поверхности:

$$C(r) = C^d \left( 1 + \frac{\alpha K(T) r_0}{D} \times \left( \frac{r_0 - r}{r_0} \right) \right)^{-1}. \quad (3)$$

Если полагать, что концентрация кислорода в реакционной зоне не зависит от ее радиуса, то выражение (3) существенно упрощается:

$$C(r) = C^d \left( 1 + \frac{\alpha K(T) r}{D} \right)^{-1}. \quad (4)$$

Функцию скорости реакции горения будем использовать в следующем виде [4]:

$$W = KC^d, \quad (5)$$

где  $K = K(T) \cdot (1 + \alpha r_0 / D \cdot K(T))^{-1}$  – константа скорости реакции с учетом диффузионного торможения.

При этом полагаем, что скорость сгорания топлива определяется не только концентрацией кислорода в диффузионном слое, но и суммарной поверхностью непрореагировавших частиц. Предположение о монодисперсности загружаемого топлива и поверхности непрореагировавших частиц соответствует тому, что плотность распределения частиц в заданном диапазоне определяется явной формулой [5]

$$\rho_1(r) = \begin{cases} \frac{K_1}{r_0} \exp\left(\frac{r-r_0}{r}\right) n p u r \leq r_0, \\ 0 & n p u r > r_0, \end{cases} \quad (6)$$

где  $K_1 = F_0 r_0 / N_s R_1$ ;  $N_s = V_0 / (4/3 \pi r_0^3)$  – число частиц в слое;  $V_0$  – суммарный объем всех частиц;  $F_0$  – скорость загрузки частиц в слой;

$$F_0 = \frac{G_s}{4/3 \pi r_0^3 \rho_s}; \quad \rho_s - \text{плотность};$$

$G_s$  – массовая скорость загрузки;

$$R_1 = \frac{M_c}{P_c \rho_s} \alpha W - \text{коэффициент, учитывающий}$$

потери скорости;  $M_c$  – молекулярная масса углеводородов;  $P_c$  – массовая доля углеводородов.

Используя (6), вычисляем поверхность  $S$  всех непрореагировавших частиц:

$$S = N_s \int_0^{r_0} 4 \pi r^2 \rho_1(r) dt = 3 \frac{V}{r_0} \left( 1 - \frac{2}{K_1} + \frac{2}{K_1^2} (1 - \exp K_1) \right) \quad (7)$$

*Модель сжигания жидкого топлива в аппарате.* Под эффективностью сгорания топлива обычно понимают отношение количества выделившегося в слое тепла к количеству тепла, образующегося при полном выгорании топлива [6]:

$$\eta = \frac{(-\Delta H)P_c G_s / M_c - (-\Delta H)P_c G_s^1 / M_c}{(-\Delta H)P_c G_s / M_c} = \frac{G_s - G_s^1}{G_s}, \quad (8)$$

где  $G_s^1$  – потери топлива, связанные с переток и выгрузкой, определяемые в свою очередь соотношением

$$G_s^1 = G_s - \frac{M_c}{P_c} S \alpha W. \quad (9)$$

Реакционная зона состоит из двух фаз: плотной ( $p$ ) и диффузионной ( $d$ ). Между фазами происходит обмен газом, интенсивность которого определяется коэффициентом  $\beta$ . Полагая, что скорость газа в диффузионной зоне определяется скоростью подачи газа:

$$U^d = |U^f - U^p|, \quad (10)$$

где  $U^f = \frac{G_g}{\rho_g S_R}$ ;

$G_g$  – массовая скорость подачи воздуха;

$\rho_g$  – плотность воздуха;  $U^p$  – скорость начала реакции.

Материальный баланс кислорода включает два уравнения [7]:

– для диффузионной части:

$$U^d \frac{dC^d}{dl} = -\beta f (C^d - C^p), \quad C^p(0) = l; \quad (11)$$

– для плотной части:

$$S_R U^p (C^f - C^p) + S_R \beta f \int_0^l (C^f - C^p) dl - S \alpha W = 0, \quad (12)$$

где  $C^f$  – исходная концентрация кислорода;  $f$  – доля объема, занимаемая диффузионной фазой.

Интегрируя (11), получаем:

$$C^p = C^p + (C^f - C^p) \exp(-\beta l / L_f), \quad (13)$$

где  $\beta = \beta_g f_g L_g / V^d$  – безразмерный параметр, характеризующий интенсивность массообмена между фазами.

Из выражения (12), используя формулу (13) и учитывая (5), найдем концентрацию плотной части:

$$C^p = C^f \left( 1 + \frac{S \alpha K}{S_R (U^p + U^d (1 - \exp(-\beta)))} \right)^{-1}. \quad (14)$$

Окончательная формула для расчета концентрации кислорода в дымовых газах выглядит следующим образом:

$$C = \frac{U^p}{U^f} C^d + \frac{U^p}{U^f} C^p. \quad (15)$$

В качестве примера для расчета воспользуемся исходными данными, приведенными в работе [1]. Кинетические константы выберем в соответствии с [4]:

$L_R$  – высота слоя топлива – 1,2 м;  $S_R$  – площадь сечения аппарата – 35,2 м<sup>2</sup>;  $r_0$  – размер капли – 5·10<sup>-5</sup> м;  $G_s$  – массовая скорость подачи топлива – 1,5 кг/с;  $\rho_s$  – плотность воздуха – 1,293 кг/м<sup>3</sup>;  $k$  – предэкспонента – 1,55·10<sup>7</sup> м/с;  $R$  – универсальная газовая постоянная – 8,314 Дж/моль·К;  $D$  – коэффициент диффузии  $O_2$  в топливе – 0,15·10<sup>-4</sup> м<sup>2</sup>/с;  $E$  – энергия активации – 124,7 кДж/моль;  $A$  – избыток воздуха – 0,2;  $\rho_g$  – плотность газа в рабочих условиях – 353,2 г/м<sup>3</sup>;  $T$  – температура слоя, выбранная для расчетов – 1103 К;  $\rho_{O_2}$  – плотность кислорода – 1,429 кг/м<sup>3</sup>.

Скорость начала реакции  $U^p$  находим по формуле [4]:

$$U^p = \frac{\mu_g}{\rho_g 2r_0} \left[ \left[ (25,25)^2 + 0,0651A_r \right]^{1/2} - 25,25 \right] \quad (16)$$

$$A_r = \rho_g (\rho_s - \rho_g) g \frac{(2r_0)^3}{\mu_g}, \quad (17)$$

$$\mu = 1,34 \times 10^{-6} \sqrt{T}.$$

Доля объема, занимаемого диффузионной фазой, вычисляется по формуле:

$$f = \left( 1 + \frac{8,419 (U^f - U^p)^{0,438} (2r_0)^{1,006} \rho_g^{0,376}}{(U^p)^{0,917} \rho_s^{0,126}} \right)^{-1}. \quad (18)$$

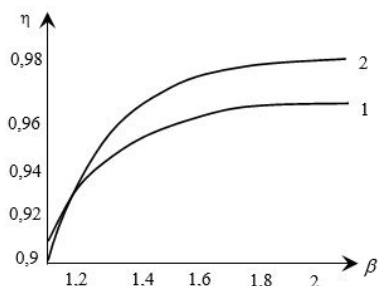
Объем, занятый частицами в реакционном слое, вычисляется как

$$V = f \cdot S_R \cdot l_f. \quad (19)$$

Найденные значения  $V$  используем для вычисления концентрации кислорода на выходе в соответствии с формулой (14).

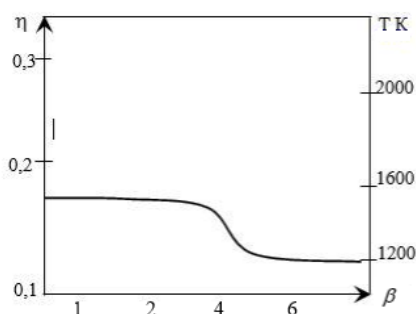
Расчеты проводились по изложенной выше схеме. Проводя расчеты при различных значениях безразмерного параметра массообмена  $\beta$  между фазами от 1,2 до 2 были получены значения, приведенные на рис. 2. Там же приведены данные из работы [8].

Результаты расчетов профилей концентраций кислорода в дымовых газах представлены на рис. 3. Приведенные профили позволяют определить состав газа при выбранной температуре.



**Рис. 2. Влияние безразмерного параметра  $\beta$  на эффективность сжигания топлива  $\eta$ : 1 – модельные результаты; 2 – литературные данные**

**Fig. 2. Influence of a non-dimensional parameter  $\beta$  upon the fuel combustion efficiency  $\eta$ : 1 – model results; 2 – literature indicates**



**Рис. 3. Профиль концентраций, рассчитанный с использованием схемы [9] ( $\rho=1$  МПа, % N=55,6)**

**Fig. 3. Concentrations profile calculated using the scheme [9] ( $\rho=1$  МПа, % N=55.6)**

### ВЫВОДЫ

Разработана инженерная вычислительная модель для расчета энергетических характеристик горения жидкого углеводородного топлива в технологической печи. В вычислительном эксперименте установлено, что скорость сжигания топлива лимитируется подачей кислорода

из диффузионной зоны в плотную даже при значительном его избытке. Модель горения может быть использована в качестве элемента системы «источник горения – объекты окружающего пространства» для оценки масштабов и прогнозирования последствий аварийных ситуаций.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Spalding D.B. The Combustion of Liquid Fuels. In: Proc. 4th Symposium (Intern.) on Combustion, Williams and Wilkins, Baltimore Co., Md, 1953. P. 847–864.
2. Kim J.S., de Ris J.L., Krocser F.Wm. Laminar Free-Convective Burning of Fuel Surfaces // Proc. Combust. Inst. 1971. Vol. 13. P. 949–961.
3. Варшавский Г.А. Горение капли жидкого топлива (диффузионная теория). М.: Гостехиздат. 1945. 17 с.
4. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ / пер. с англ. Г.Л. Агафонова; под ред. П.А. Власова. М.: Физматлит, 2006. 352 с.
5. Akita K., Yumoto T. Heat transfer in small pools and rates of burning of liquid methanol. Tenth Symposium (International) on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa., 1965. P. 943–948.
6. Гиль А.В., Старченко А.В. Математическое моделирование физико-химических процессов сжигания углей в камерных топках котельных агрегатов на основе пакета прикладных программ EIRE 3D // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19. N 5. С. 655–671.
7. Гусаченко Л.Г., Зарко В.Е. Моделирование процессов горения твердых топлив. Новосибирск: Наука, 1985. 183 с.
8. Волков Э.П., Зайчик Л.И., Алешечкин А.И. Расчет выгорания топлив в циркуляционных системах // Инженерно-физический журнал. 1990. Т. 58. N 4. С. 623–630.
9. Демиденко Н.Д., Потапов В.И., Шокин Ю.И. Моделирование и оптимизация систем с распределенными параметрами. Новосибирск: Наука, 2006. 551 с.

**REFERENCES**

1. Spalding D.B. The Combustion of Liquid Fuels. *Proc. 4th Int. Symp. on Combustion*. Williams and Wilkins, Baltimore Co., Md, 1953, pp. 847–864.
2. Kim J.S., de Ris J.L., Krocsher F.Wm. Laminar Free-Convective Burning of Fuel Surfaces. *Proc. Combust. Inst.* 1971, vol. 13, pp. 949–961.
3. Varshavskii G.A. *Gorenie kapli zhidkogo top-liva (diffuzionnaya teoriya)* [Combustion of liquid fuel droplet (Diffusion theory)]. Moscow: Gostekhizdat Publ., 1945, 17 p.
4. Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. *Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*. Berlin: Springer, 2001. (Russ. ed.: Varnatts Yu., Maas U., Dibbl R. *Gorenie. Fizicheskie i khimicheskie aspekty, modelirovanie, eksperimenty, obrazovanie zagryaznyayushchikh veshchestv*. Moscow: Fizmatlit Publ., 2006, 352 p.)
5. Akita K., Yumoto T. Heat transfer in small pools and rates of burning of liquid methanol. *Proc. 10th Int. Symp. on Combustion*. The Combustion Institute, Pittsburgh, Pa., 1965, pp. 943–948.
6. Gil' A.V., Starchenko A.V. Mathematical modeling of physical and chemical processes of coal combustion in the combustion chambers of coal-fired units on the basis of the application programs EIRE 3D. *Teplofizika i aeromekhanika*. 2012, vol. 19, no. 5, pp. 655–671. (In Russian)
7. Gusachenko L.G., Zarko V.E. *Modelirovanie protsessov goreniya tverdykh topliv* [Modeling of solid fuel combustion]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1985, 183 p.
8. Volkov E.P., Zaichik L.I., Aleshechkin A.I. Fuel combustion calculation in the circulatory systems. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal*. 1990, vol. 58, no. 4, pp. 623–630. (In Russian)
9. Demidenko N.D., Potapov V.I., Shokin Yu.I. *Modelirovanie i optimizatsiya sistem s raspredelennymi parametrami* [Modeling and optimization of systems with distributed parameters]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2006, 551 p.

**Критерии авторства**

Кондратьева Л.М., Корчевин Н.А., Свердлова О.Л., Евсевлеева Л.Г. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Кондратьева Л.М., Корчевин Н.А., Свердлова О.Л., Евсевлеева Л.Г. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Кондратьева Лариса Михайловна** ✉, к.х.н., доцент кафедры физико-математических наук Ангарский государственный технический университет e-mail: kondrateva\_lm@mail.ru

**Корчевин Николай Алексеевич**, д.х.н., профессор кафедры технологии электрохимических производств Ангарский государственный технический университет e-mail: chem2007@mail.ru

**Свердлова Ольга Леонидовна**, к.т.н., доцент кафедры физико-математических наук Ангарский государственный технический университет e-mail: olgasv273@mail.ru

**Евсевлеева Лариса Геннадьевна** к.х.н., доцент, учитель математики Ангарский лицей № 2 им. М.К. Янгеля e-mail: evsevleeva67@mail.ru

**Contribution**

Larisa M. Kondratyeva, Nikolay A. Korchevin, Olga L. Sverdlova, Larisa G. Evsevleeva carried out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Larisa M. Kondratyeva, Nikolay A. Korchevin, Olga L. Sverdlova, Larisa G. Evsevleeva have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

**AUTHORS' INDEX**

**Larisa M. Kondratyeva** ✉ Ph.D. (Chemistry), Associate Professor Department of Physics and Mathematics Sciences Angarsk State Technical University e-mail: kondrateva\_lm@mail.ru

**Nikolay A. Korchevin** Dr. Sci. (Chemistry), Professor Electrochemical Sciences Department Angarsk State Technical University e-mail: Chem2007@mail.ru

**Olga L. Sverdlova** Ph.D. (Engineering), Associate Professor Department of Physics and Mathematics Sciences Angarsk State Technical University e-mail: olgasv273@mail.ru

**Larisa G. Evsevleeva** Ph.D. (Chemistry), Associate Professor, Mathematics Teacher Angarsk Lyceum no 2 named after M.K. Yangel e-mail: evsevleeva67@mail.ru