

УДК 663.52, 664.647.3

## Эксергетический анализ технологии получения порошкообразного продукта из фильтрата барды с использованием пароэжекторного теплового насоса

Д-р техн. наук А. А. ШЕВЦОВ<sup>1</sup>, А. С. МУРАВЬЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>shevalol@rambler.ru, <sup>2</sup>79204104299@ya.ru

Воронежский государственный университет инженерных технологий  
394036, г. Воронеж, проспект Революции, 19

*Оценена эффективность использования подведенной в систему энергии и разработаны соответствующие технологические и технические мероприятия на основе результатов анализа для снижения потерь в процессе выпаривания и распылительной сушки. Приведен расчет энергетических показателей технологической линии переработки фильтрата барды на порошкообразный продукт, основанный на теории эксергетического анализа. Для реализации технологии выбрана установка, работающая по принципу теплового насоса, включающая эжектор, как наиболее простой в техническом обслуживании элемент холодильной техники. Определен наиболее эффективный интервал температур работы испарителя пароэжекторной холодильной установки. Установлены зависимости эксергетической эффективности и разрушения эксергии от температуры испарителя. Это позволило выявить, что наибольшей эффективностью установка обладает в диапазоне температур испарителя 278–282 К. Эксергетический КПД линии равен 5,47%, что говорит о повышении термодинамического совершенства системы при использовании пароэжекторной холодильной установки, обеспечивающей использование теплоносителей: воздуха и горячей воды в режиме рециркуляции. По результатам работы разработан программно-логический алгоритм управления технологией утилизации барды.*

**Ключевые слова:** энергетическая эффективность, эжектор, эксергия, тепловой насос, спиртовая барда, фильтрат барды, выпаривание, распылительная сушка.

### Информация о статье

Поступила в редакцию 01.12.2015, принята к печати 29.01.2016

doi: 10.21047/1606-4313-2016-16-1-55-59

### Ссылка для цитирования

Шевцов А. А., Муравьев А. С. Эксергетический анализ технологии получения порошкообразного продукта из фильтрата барды с использованием пароэжекторного теплового насоса // Вестник Международной академии холода. 2016. № 1. С. 55–59.

## Exergy analysis of powdered product from thin stillage technology using steam ejector heat pump

D. Sc. A. A. SHEVTSOV<sup>1</sup>, A. S. MURAVEV<sup>2</sup>

<sup>1</sup>shevalol@rambler.ru, <sup>2</sup>79204104299@ya.ru

Voronezh state university of engineering technologies  
394036, Russia, Voronezh, avenue Revolyutsii, 19

*The article deals with the evaluation of using energy wrapping up and the development of appropriate technology effectiveness and technical measures based on the analysis result to reduce losses in the process of evaporation and spray drying. Calculation of energy performance for technological line of processing thin stillage to powdery product, based on the theory of exergy analysis, is given. Installation working on the heat pump principle, including an ejector as a refrigeration system element simplest to maintain, was chosen to implement the technology. The most effective temperature range of the evaporator steam jet refrigeration system is determined. According to the dependency of exergy efficiency and exergy destruction on the evaporator temperature it is shown that the system is the most efficient at the evaporator temperature range of 278–282 K. Exergy efficiency of line is 5.47%, which indicates an increase of thermodynamic perfection of the system using a steam jet refrigeration plant that ensures the use of heat transfer fluids: air and hot water in the recirculation mode. Software-logical control algorithm of stillage utilization technology control is one of the research results.*

**Keywords:** energy efficiency, ejector, exergy, heat pump, stillage, thin stillage, evaporation, spray drying.

Целью эксергетического анализа запатентованной технологии получения порошкообразного продукта из фильтрата барды [1] является объективная оценка эффективности использования подведенной в систему энергии и разработка соответствующих технологических и технических мероприятий на основе результатов анализа, для снижения эксергетических потерь в процессе выпаривания и распылительной сушки послеспиртовой барды, как самых энергозатратных процессов [2]. Выполнение этих мероприятий должно положительно сказаться на показателе, характеризующем степень затрат, связанных с процессом получения готового продукта, то есть эксергетическом КПД [3, 4].

Эксергетический анализ выполнен по методике [5, 7–9], в соответствии с которой теплотехнологическая система получения порошкообразного продукта из фильтрата спиртовой барды условно отделена от окружающей среды замкнутой контрольной поверхностью, а внутри нее, с учетом теплообменных процессов, выделены контрольные поверхности: I — отделение кека, фильтрация; II — выпаривание; III — эжектор; IV — конденсатор; V — насос холодильной установки; VI — ТРВ; VII — распылительная сушка концентрата; VIII — парогенератор; IX — испаритель; X — теплообменник. Пароэжекторная холодильная машина на схеме выделена штрих-пунктиром.

Схема технологического процесса получения порошка из фильтрата барды показана на рис. 1.

Исходную барду подают в сепаратор 1, далее фильтрат направляют на тонкое разделение в фильтр тонкой очистки 2. Фильтрат подают в вакуум-выпарной аппарат 8 и далее в распылительную сушилку 16. Сушку проводят воздухом, который вентилятором 17 подается в корпус сушилки 16. Разрежение в вакуум-аппарате 8 создают с помощью пароэжекторной установки производительностью 16 т/ч, включающей парогенератор 12, эжектор 6, конденсатор 7, испаритель 14, пароперегреватель 15, насос 10, ТРВ 11, работающих в замкнутом термодинамическом цикле. Полученный в парогенераторе 12 рабочий пар разделяют на две части, одну из которых направляют в редукционный вентиль 9 и далее в греющую камеру вакуум-выпарного аппарата 5, а другую часть рабочего пара в сопло эжектора 6. Смесь отработанного рабочего и эжектируемого паров направляют

в конденсатор 7, в котором осуществляют подогрев отработанного после распылительной сушилки 16 воздуха. Отработанный воздух из сушилки 16 для осушения отводят в теплообменник-рекуператор 18. Затем воздух направляют сначала в конденсатор 7 для подогрева, а затем вновь в распылительную сушилку 16 с образованием замкнутого цикла. Часть образовавшегося конденсата после теплообменника-рекуператора 18 вместе с конденсатом после греющей камеры вакуум-выпарного аппарата 8 и конденсатора 7 направляют в парогенератор 12, оснащенный предохранительным вентилем 13, для пополнения в нем уровня воды. Другую часть конденсата насосом 5 подают в сепаратор 3 и фильтр тонкой очистки 4 для водной регенерации.

В ходе эксергетического анализа определялся наиболее эффективный интервал температур работы испарителя пароэжекторной холодильной установки, схематическое изображение цикла работы и  $T$ - $S$ -диаграмма которой представлены на рис. 2 и 3, соответственно.

Параметры цикла холодильной установки ( $h_i$  — энтальпия, кДж/кг;  $m_i$  — массовый расход, кг/с;  $P_i$  — давление, атм;  $e_i$  — удельная эксергия, кДж/кг;  $s_i$  — энтропия, кДж/кг·К;  $T_i$  — температура, К) в точках 1–12 приведены в табл. 1.

Расчет значений эксергии  $E$ , кВт, разрушения эксергии  $D$ , кВт, эксергетической эффективности элемента схемы  $ex$ , кВт, для точек 1–12, а также КПД холодильной установки  $KPD_{max}$  проводился в соответствии с уравнениями:

$$E_i = m_i(e_i - e_j), \quad (1)$$

где  $i, j$  — последовательные точки элементов схемы.

$$D_i = E_i - E_j \quad (2)$$

$$ex_i = E_i / E_j; \quad (3)$$

$$KPD_{max} = w_{max} \frac{h_2 - h_5}{h_1 - h_4}, \quad (4)$$

где  $w_{max}$  — максимальный коэффициент эжекции:

$$w_{max} = \frac{m_3}{m_1}. \quad (5)$$

В интервале температур испарителя  $T_2 = 278$ – $289$  К был определен  $KPD_{max}$  установки, графические зависимости показаны на рис. 4.

Таблица 1

Параметры цикла холодильной установки

Параметр	$h_i$	$m_i$	$P_i$	$e_i$	$s_i$	$T_i$
1	2735,827	0,0764	6,000	771,2	6,712	432,013
2	2522,276	0,0434	0,009	-70,32	8,854	285,000
3	1289,167	0,1198	0,694	205,5	3,706	362,883
4	192,486	0,1198	0,101	4,455	0,651	319,123
5	222,812	0,0434	0,009	-4,566	0,786	285,000
6	193,836	0,0764	6,000	5,112	0,654	319,323
7	2763,324	0,0949	7,000	799,8	6,708	438,133
8	697,353	0,0949	7,000	116,1	1,993	438,133
9	83,580	3,517	0,023	0,000	0,295	293,089
10	167,570	3,517	0,074	2,728	0,572	313,146
11	83,580	2,975	0,023	0,000	0,295	293,089
12	50,238	2,975	0,014	0,3686	0,180	285,120

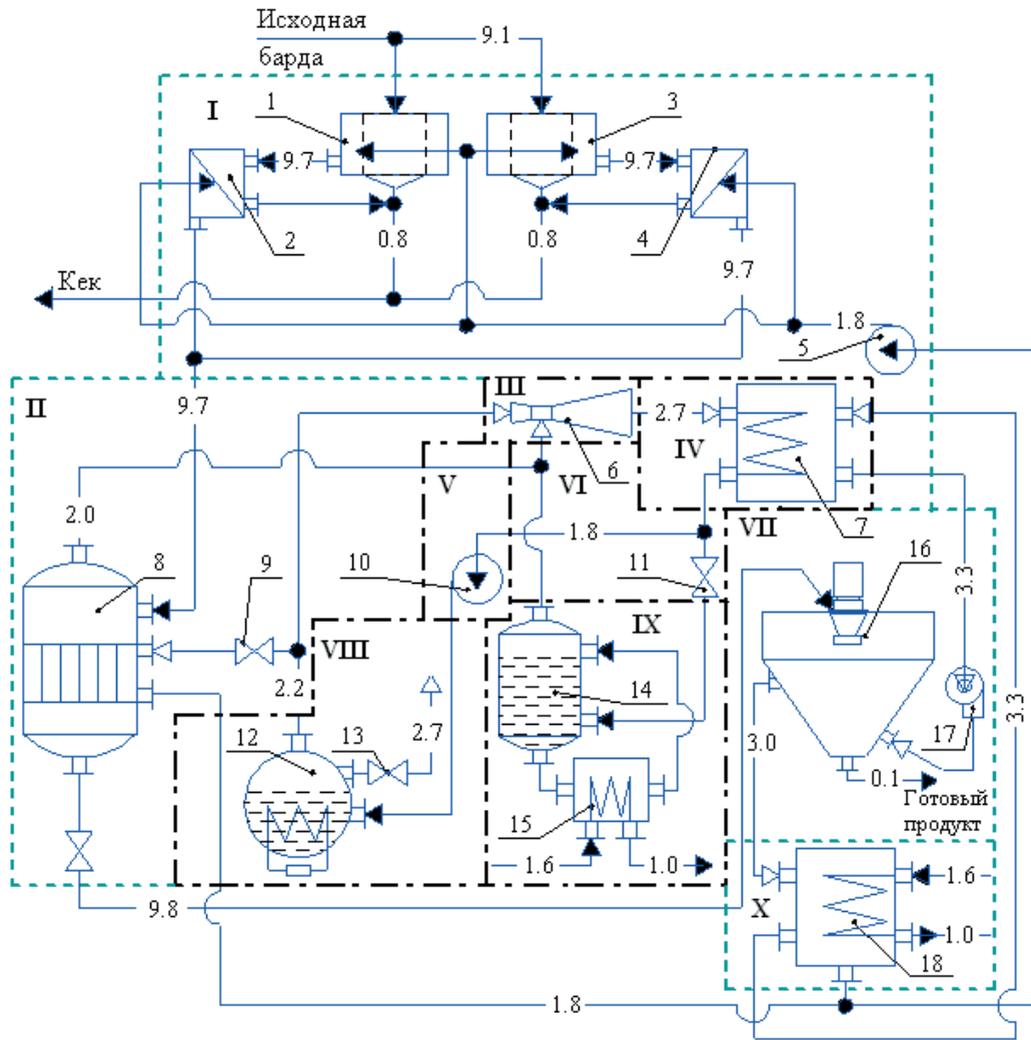


Рис. 1. Технологическая схема получения порошка из фильтра барды:

1, 3 — сепараторы; 2, 4 — фильтры тонкой очистки; 5, 10 — насосы; 6 — вакуум-выпарной эжектор; 7 — конденсатор; 8 — аппарат; 9 — вентиль редукционный; 11 — ТРВ; 12 — парогенератор; 13 — вентиль предохранительный; 14 — испаритель; 15 — пароперегреватель; 16 — распылительная сушилка; 17 — вентилятор; 18 — теплообменник-рекуператор; линии материальных потоков: 0.1 — порошкообразный продукт; 0.8 — кек барды; 1.0 — отработанная вода; 1.6 — холодная вода; 1.8 — конденсат; 2.0 — пар отработанный; 2.2 — рабочий пар; 2.7 — смесь рабочего и отработанного пара; 3.0 — отработанный сушильный агент; 3.3 — сушильный агент; 9.1 — исходная барда; 9.7 — фильтр барды; 9.8 — сгущенный фильтр

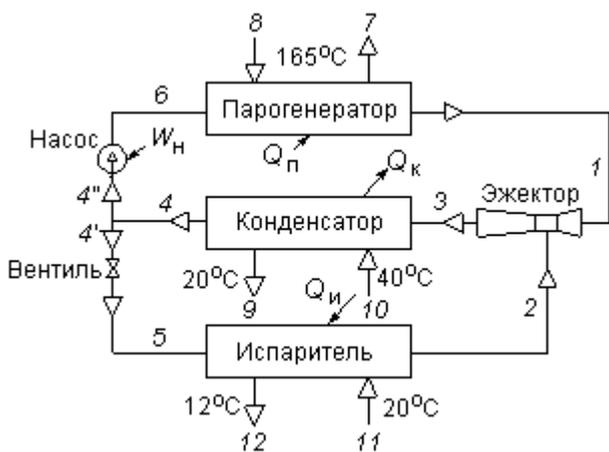


Рис. 2. Цикл холодильной установки

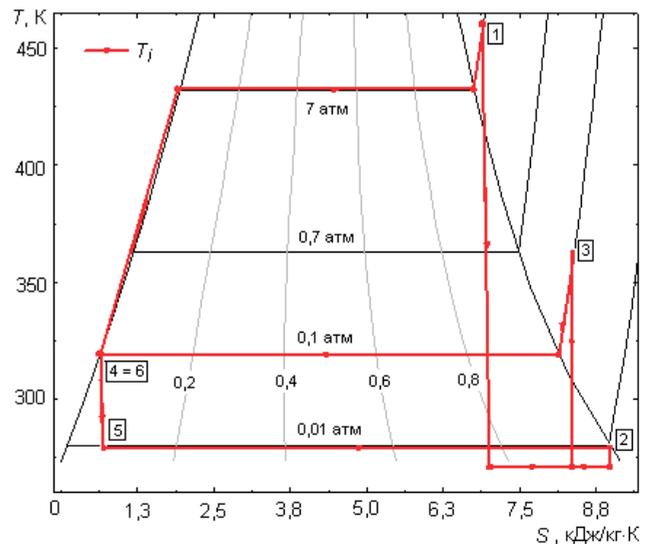


Рис. 3. T-S-диаграмма цикла холодильной установки

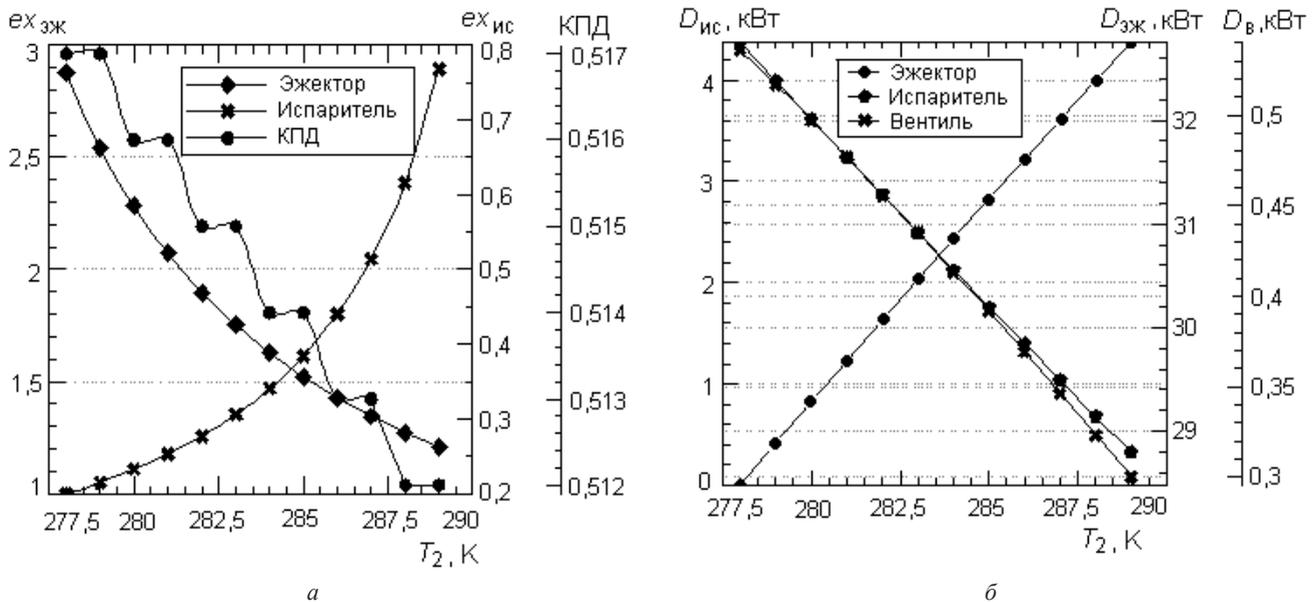


Рис. 4. Зависимость эксергетической эффективности  $ex$ , КПД (а) и разрушения эксергии  $D$  (б) от температуры испарителя  $T_2$

Таблица 2

#### Значения эксергии контрольных поверхностей

Контрольная поверхность	Приход эксергии, кДж/кгч	Расход эксергии, кДж/кгч
Отделение кека, фильтрация	13,72	18,32
Выпаривание	12,44	10,53
Эжектор	43,21	-11,97
Конденсатор	24,09	9,593
Насос	0,00	0,00
ТРВ	0,19	-0,328
Распылительная сушка концентрата	0,05	17,15
Парогенератор	80,00	0,00
Испаритель	-2,85	-1,097
Теплообменник	0,19	0,178

Полученные значения  $KПД_{max}$  свидетельствуют о том, что наибольшей эффективностью, с учетом значений разрушения эксергии  $D$ , установка обладает в диапазоне температур  $T_2 = 278-282$  К. Учитывая это, результаты расчетов эксергии сведены в табл. 2.

Полученный эксергетический КПД равен 5,47%, что говорит о повышении термодинамического совершенства системы при использовании парожеторной холодильной установки, обеспечивающей использование теплоносителей — воздуха и горячей воды — в режиме рециркуляции, что исключило потери эксергии в атмосферу с отходящими потоками. Результаты расчетов легли в основу разработки программно-логического алгоритма управления технологией утилизации барды [6].

Таким образом, эксергетический анализ технологической линии получения порошка из фильтра барды с использованием теплонасосной установки подтвердил

практическую возможность и энергетическую эффективность предложенного решения, и позволил определить основные рабочие режимы установки.

#### Список литературы

1. Шевцов А. А., Дранников А. В., Муравьев А. С. Энергосберегающая технология утилизации фильтра послеспиртовой барды // Известия вузов. Пищевая технология. 2014. № 4. С. 78–80.
2. Шевцов А. А., Дранников А. В., Муравьев А. С. Технология получения порошка из фильтра спиртовой барды как система взаимосвязанных процессов. — Воронеж: ВГУИТ, С. 40.
3. Антаненкова И. С., Сухих А. А., Сычев В. В. Экспериментальное исследование энергетической эффективности теплонасосных установок на новых рабочих веществах // Холодильная техника. 2014. № 10. С. 44–49.
4. Добромиров В. Е., Шахов С. В., Некрылова Т. И., Бокадаров С. А. Эксергетический анализ вакуум-сублимационной установки // Вестник Международной академии холода. 2011. № 4. С. 46–48.
5. Эксергетический анализ работы промышленных установок. / Б. С. Сажин, А. П. Булеков, В. Б. Сажин. — М., 2000. 297 с.
6. Пат. РФ 2546214 РФ МПК<sup>7</sup> А23К1/06 А23К1/00 (2006.1) Способ автоматизации технологии получения порошкообразного продукта из фильтра спиртовой барды / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, А. С. Муравьев, заявитель и патентообладатель Воронеж. гос. университет. инж. техн. № 2013144104/13, заявл. 02.10.2013, опубл. 10.04.2015.
7. Шевцов С. А. Компенсация теплоэнергетических потерь в производстве варено-сушеных круп с использованием теплового насоса // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2015. № 2 (64). С. 14–20.
8. Adrian Bejan, Fundamentals of exergy analysis, entropy generation minimization, and the generation of flow

architecture // International Journal of Energy Research. 2002. V. 26. No 7. P. 40–43.

9. George Tsatsaronis, Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics // Energy. 2007. V. 32. No 4. P. 249–253.

### References

1. Shevtsov A. A., Drannikov A. V., Muravev A. S. Thin stillage recycling energy-saving technology. *Izvestija vuzov. Pishhevaja tehnologija*. 2014. № 4. P. 78–80. (in Russian)]
2. Shevtsov A. A., Drannikov A. V., Muravev A. S. Powder from the thin stillage as a system of interrelated processes producing technology. Voronezh, P. 40. (in Russian)
3. Antanenkova I. S., Sukhikh A. A., Sychev V. V. Experimental study of energy efficiency of heat pump plants operating on new working substances. *Holodilnaja tehnika*. 2014. No 10. P. 44–49. (in Russian)
4. Dobromirov V. E., Shahov S. V., Nekrylova T. I., Bokadarov S. A. Vacuum freeze system exergy analysis. *Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda*. 2011. No 4. P. 46–48. (in Russian)
5. Sazhin B. S., Bulekov A. P., Sazhin V. B. Exergy analysis of industrial plants. — Moscow, 2000. 297 p. (in Russian)
6. Patent RF 2546214 РФ МПК<sup>7</sup> А23К1/06 А23К1/00 (2006.1) Thin stillage powdered product process technology obtaining / A. Shevtsov, A. Drannikov, A. Muravev, applicant and the patentee For Voronezh. state university ing. techn. — № 2013144104/13, appl. 02.10.2013, publ. 04/10/2015. (in Russian)
7. Shevtsov S. A. Compensation of heat power losses in production of boiled and dried grain with use of the thermal pump. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii*. 2015. No 2 (64). p. 14–20. (in Russian)
8. Adrian Bejan. Fundamentals of exergy analysis, entropy generation minimization, and the generation of flow architecture. *International Journal of Energy Research*. 2002. V. 26. No 7. P. 40–43.
9. George Tsatsaronis. Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. *Energy*. 2007. V. 32. No 4. P. 249–253.

## Требования к рукописям, представляемым в журнал «Вестник МАХ»

- В начале статьи, слева – УДК;
- После названия статьи – авторы с указанием места работы и контактной информации (e-mail);
- Отдельно указываются ключевые слова на русском и английском (не более десяти);
- Одновременно со статьей представляется аннотация на русском и английском языках. Аннотация должна содержать от 200 до 250 слов (приблизительно 1500 печатных знаков). **Аннотация должна быть полноценной и информативной, не содержать общих слов, отражать содержание статьи и результаты исследований, строго следовать структуре статьи.**
- Статьи представляются набранными на компьютере в текстовом редакторе Word 97-2007 на одной стороне листа через 1,5 интервала, размер шрифта 14.
- Объем статьи не более 15 страниц (формат А4, вертикальный, 210x297 мм; поля: левое - 2 см, правое - 2 см, верхнее - 2 см, нижнее - 2 см);
- Иллюстрации представляются на магнитном носителе в следующем формате: растровые - TIFF-CMYK-300 dpi, TIFF-BM-800 dpi, векторные - EPS-CMYK4
- Формулы и отдельные символы набираются с использованием редактора формул MathType (Microsoft Equation). (не вставлять формулы из пакетов MathCad и MathLab).
- В статьях необходимо использовать Международную систему единиц (СИ);
- Список литературных источников должен быть оформлен по ГОСТу и содержать ссылки только на опубликованные работы. Номера ссылок в тексте должны идти строго по порядку их цитирования и заключаться в квадратные скобки. **Количество пристатейных ссылок не менее 10-15**

*Статьи, оформленные с нарушением правил, редакцией не принимаются и возвращаются авторам без рассмотрения по существу. Автор гарантирует отсутствие плагиата и иных форм неправомерного заимствования результатов других произведений.*

### Данные об аффилировании авторов (author affiliation).

На отдельной странице и отдельным файлом: – сведения об авторах на русском и английском языках: фамилия, имя, отчество полностью, ученая степень, звания (звания в негосударственных академиях наук и почетные звания не указывать), должности основного места работы (учебы); наименование и почтовые адреса учреждений, в которых работают авторы, e-mail.

Статьи принимаются на магнитном носителе и в печатном экземпляре или высылаются на электронный адрес редакции [vestnikmax@rambler.ru](mailto:vestnikmax@rambler.ru)

Плата за публикации не взимается

Дополнительная информация для авторов на сайте <http://vestnikmax.com>