

УПРАВЛЯЕМОЕ ПУЛЬСИРУЮЩЕЕ ГОРЕНИЕ

В. С. Северянин

Д. т. н., профессор кафедры теплогазоснабжения и вентиляции
Брестского государственного технического университета, Брест, Беларусь

Аннотация

В статье представлены основные качества высокофорсированного способа сжигания топлив. Показано, что главные затруднения в использовании метода заключаются в сравнительной новизне, когда проявляются не только достоинства, но и недостатки метода. Благодаря имеющимся разработкам способ регулируется, что позволяет рекомендовать использовать его в теплотехнических устройствах.

Ключевые слова: пульсирующее горение.

OPERATED PULSATING COMBUSTION

V. S. Severyanin

Abstract

It is shown that new method of burning fuel has some advantages and defects. Noise and vibrations are obstacles for wide using of pulse combusting in industry. It is proposed some means and equipments for improving of situation.

Keywords: pulsating combustion.

Введение

Особый метод сжигания топлива, так называемое пульсирующее горение, характерен рядом качеств, выделяющих его из общепринятых способов получения теплоты высокотемпературным окислением.

Метод известен и достаточно изучен сравнительно давно [1, 2, 3]. Подчеркивалось резкое повышение плотности тепловыделения, усиление конвективного теплообмена на ограничивающих поверхностях, самонаддув воздухом, очищающее действие на поверхности нагрева, отсутствие недожогов, распыливающее действие на жидкое топливо, широкий диапазон используемого топлива, уменьшение эксергетических потерь. Вместе с тем, проявились два весьма отрицательные действия – вибрации и сильное акустическое излучение. Это обусловило недопущение таких пульсационных режимов в высокофорсированных агрегатах, например в ракетных двигателях. Но существует множество слабонапряженных огневых устройств в энергетике, коммунальном хозяйстве и т. д., где требуется интенсификация рабочих процессов. Состояние метода пульсирующего горения в какой-то мере сравнимо с термоядерными проблемами, где широкое внедрение стопорится практической управляемостью. В связи с этим целесообразно рассмотреть вопросы регулируемости, конструкционной и прикладной диверсификации на базе известных и новых исследований.

Регулируемость процесса

Под регулируемостью понимается получение желаемого результата при определенном заданном воздействии на рабочую систему.

Процесс горения обусловлен подачей топлива, воздуха, удалением продуктов сгорания, поддержанием определенной температуры и давления в зоне реакции. Это обеспечивается конструкцией и действием вспомогательных механизмов и устройств.

Скорость горения зависит от эффективности обдувания топлива, обеспечивающим диффузию кислорода. Относительная скорость обдувания [4] частицы топлива:

$$W = \frac{W'}{2fu\tau} + \frac{z}{\sqrt{2}}, \quad (1)$$

по которой определяется критерий Пекле, $Pe = Wd/\Delta$, при амплитуде колебательной относительной скорости $z = z' \cdot W_{пульс}$,

$$\text{где } W_{пульс} = P/(\rho c),$$

W' – суммарная скорость газа и начальной скорости частицы,

u – параметр ослабления начальной скорости частицы,

$$z' = \frac{1}{\sqrt{1+A^2}},$$

$$A = k\rho_{\Gamma}v / (\rho_z f d^2),$$

тогда скорость горения K_s тел зависит от обдувания:

$$2\lg K_s / (cD) = \lg Pe + \exp(-5,5\lg Pe) - 1 \quad (2)$$

где P – переменное давление,

A – параметр увлечения частицы газом,

f – частота,

τ – время ослабления начальной скорости,

V – вязкость газа;

ρ_{Γ} , $\rho_{\text{ч}}$ – плотности газа и частицы.

Поэтому очевиден путь регулирования скорости горения – это рост амплитуды переменного давления P . Эта амплитуда переменного давления $P = QG / (4Vf)$ [5],

где Q – теплота сгорания топлива,

G – его расход,

V – объем горения, легко изменяемые параметры.

Одним из трудно предотвращаемых вредных компонентов газообразных выбросов при горении являются окислы азота. Равновесная концентрация NO^P определяется формулой Я. Б. Зельдовича [6]:

$$NO^P = 4,6 \cdot 10^3 \sqrt{C_{N_2} \cdot C_{O_2}} \exp\left(\frac{-10800}{T}\right), \quad (3)$$

т. е. зависит от температуры процесса T при заданных исходных концентрациях азота C_{N_2} и кислорода C_{O_2} . При пульсирующем горении, вследствие затрат внутренней энергии на колебания, температура несколько снижается, и снижение окислов азота может достигнуть нескольких процентов, что дается выражением [6]:

$$NO_x = k \frac{\Delta T}{T_a - T''} Q^{0,5} \cdot \Gamma^{0,5} \cdot \tau \sqrt{C_{N_2} \cdot C_{O_2}} \exp\left(10,5 - \frac{38060}{T}\right), \quad (4)$$

Кроме того, длительность процесса τ сокращается, и при той же адиабатной температуре T_a температура на выхлопе T'' из-за интенсивного теплообмена так же снижается на внешнем периметре Π при заданной зоне реакции ΔT .

Важным свойством пульсирующего горения является возможность совмещения в одном объекте процессов горения и теплоотдачи, т. е. объединения топки и теплообменника. Оказалось [7], что в этом случае развиваются условия возбуждения автоколебаний давления и скорости течения газа в устройстве, т. е. повышается устойчивость рассматриваемого процесса. Это условие выражается следующим образом:

$$\left| \frac{I}{T_1} \cdot \frac{dT_2}{dW} \cdot \frac{W^2}{2} \rho \right| > \left[\zeta + \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right) \right] \left(W\rho + \frac{W^2}{2} \cdot \frac{d\rho}{dW} \right) \quad (5)$$

где T_1, T_2 – температуры газа до и после теплообменника,

W – скорость газа,

ρ – его плотность,

ζ – коэффициент гидравлического сопротивления теплообменника.

Регулировать частоту пульсаций можно изменением длины резонансной трубы камеры пульсирующего горения [8], это наиболее простой метод изменения в процессе работы устройства частоты.

Частоту можно регулировать также колеблющимися шиберами [9] или периодической подачей воздуха в топку [10].

Вводом в пульсирующую газовую струю различных тел и приспособлений, например - порция воды, дробь, порошок и пр. изменяется не только внутренний процесс, но и воздействие на окружающие предметы [11], или сочетать с другими технологическими процессами (нагрев на вибрирующей плоскости [12]).

Вышеприведенные зависимости (1, 2, 3, 4, 5) и ряд физических указанных особенностей подтверждают высокую регулируемость процесса пульсирующего горения различных топлив.

Конструкционная и прикладная диверсификация

Разнообразие (диверсификация) технической реализации метода пульсирующего горения является следствием управляемости этого высокофорсированного метода, т. е. возможности решения многих практических задач.

Общие зависимости, связывающие конструкционные и режимные характеристики материальной реализации метода, можно дать следующей системой уравнений и физических связей [3]:

$$\begin{aligned} f &= \frac{20\sqrt{T}}{4L} = a \sqrt{\frac{S_0}{V_G}} \\ P &= \frac{L_{AK}}{L_{PT}} \cdot \frac{V_B^\circ \cdot G}{S_{AK}} \\ S_{AK} &= G(V_G^\circ - V_B^\circ) \frac{\rho_B}{\rho_G} \cdot \frac{L_{PT}}{L_{AK}} \cdot \frac{1}{10\sqrt{T}} \\ a &= \lambda f = \lambda / T; \lambda = 4L_{PT} \\ \frac{4df\rho_G a}{P} &= \frac{1}{\sqrt{1+A^2}} \\ A &= k \frac{\rho_G \cdot v}{\rho_G \cdot fd^2} \\ \tau &\leq \frac{L_{PT} \cdot S_{PT}}{V_G^\circ G \cdot T/273}, \tau = \frac{\rho_A}{2} \int_0^2 \frac{d(d)}{K_S} \\ S_{PT} &= \frac{\tau V_G^\circ \cdot G}{L_{PT}}, S_{AK} = \frac{2G\rho_B L_{PT}}{\rho_G L_{AK} 10\sqrt{T}} \\ L_{AK} &= \frac{2S_{AK} \cdot G \cdot \rho_B \cdot L_{PT}}{\rho_G \cdot 10\sqrt{T}}, L_{PT} = \frac{\tau V_G^\circ G}{S_{PT}} \\ L_{AK} &= 0,04\lambda; S_{AK} = 0,6S_{PT}; L_{PT} \neq d_{PT} > 5 \end{aligned}$$

где L, S – длины сечения резонансных труб и аэродинамических клапанов,

a – скорость звука,

λ – длина волны,

d – диаметр,

V° – удельные объёмы,

V – вязкость газа.

Теоретические выкладки и экспериментальные проверки, опробование в опытных установках и в ряде промышленных приложений показали следующие качества метода пульсирующего горения:

- 1) Видимое отсутствие топki. Высокая интенсификация химических реакций позволяет без опасения недожогов выводить теплоту непосредственно из факела.
- 2) Гибкость компоновочных решений. Кроме малых удельных по мощности габаритов устройства допускают любую ориентацию, изменение формы, различные взаимные компоновки.
- 3) Пониженные требования к топливу. Мощная турбулизация, распыляющее действие колеблющегося газового потока дает возможность подавать на форсунки (горелки) низконапорное слабоочищенное топливо.
- 4) Возможное выделение конденсата. Охлаждение продуктов сгорания при интенсивном теплообмене повышает КПД горения, но требует защиты элементов устройства.
- 5) Снижение расхода энергии на собственные нужды. Реализуемый режим «самовсаса» воздуха объясняется работой аэродинамических клапанов. Поэтому в ряде случаев можно обходиться без дутьевых вентиляторов и дымососов.
- 6) Унификация по топливу. Одно и то же устройство, например в виде камеры пульсирующего горения, обеспечивает режим как на разнообразном жидком, так и газообразном топливе.
- 7) Модульный принцип увеличения мощности теплогенератора с пульсирующим горением. Отдельные автономные агрегаты могут при необходимости группироваться в компактной сборке [13].

Всё это увеличивает управляемость метода, что необходимо для разработки способов воздействия. Однако перечисленные достоинства подчеркивают экологические и механические затруднения – шум и вибрации. Если устранение недопустимых вибраций можно считать решенной проблемой,

то акустическое загрязнение окружающей среды требует особого внимания. Физическая особенность пульсирующего горения – колебательный характер термодинамического состояния рабочего тела – газообразных продуктов сгорания. Подача воздуха и удаление газа определяют открытую связь с внешней средой, и на этой линии необходимы специальные устройства или мероприятия, снижающие акустическое излучение. Если для космических условий можно резко увеличивать амплитуды пульсаций (как в детонационных двигателях), то промышленное применение пульсирующего горения, чтобы оставить достоинства метода, невозможно без акустической защиты. Это не должно снижать управляемость, т. е. широкую применимость высокофорсированного процесса сжигания топлив. Ведущая разработка в этом направлении обнадеживает.

В качестве примера, достаточно простого для использования в коммунальной технике или малой энергетике, можно указать на способ подавления излучаемых акустических колебаний при помощи поглощения энергии колебаний массой воды, разбиваемой пульсирующей воздушной или газовой струей [14]. Эксперимент показал снижение звукового давления со 125 Дб до 102 Дб на объеме воды 30–50 л, расход топлива 20 кг/час. Изменением подачи воды регулировался уровень шума.

Предложено механическое устройство [15], в котором фаза повышенного акустического давления совмещается с перекрытием подачи воздуха, а фаза пониженного давления совмещается с временем подачи воздуха, частота перекрытия и подача воздуха сравнивается с частотой пульсаций в устройстве пульсирующего горения. Так решается задача уменьшения излучения звука в окружающую среду по потоку подаваемого воздуха.

В глушителе по [16] используется крутка пульсирующего газового потока на поглотительных патронах. Таких глушителей устанавливается несколько параллельно для устройств повышенной мощности.

Для уменьшения шума при вибрациях клапанов используются шаровидные мягкие элементы [17], своей формой позволяющие увеличить общий ресурс установки.

Весьма перспективным теплогенератором является устройство пульсирующего горения, скопированное с циклонной топкой [18] в качестве дожигающего элемента, или в качестве механизма наддува [19].

Устройство пульсирующего горения может выполнять роль газовой турбины [20]. Выполнен воздухоподогреватель на этой основе, показавший удобство его использования при строительстве, сушке сельхозпродукции.

Отдельное самостоятельное направление в точечной технике – так называемое слоевое пульсирующее горение [21] с уменьшенной шумностью. Предложена топка [22] для твердого кускового топлива и для жидкого топлива [23, 24].

Снижение акустического загрязнения устройствами пульсирующего горения можно также применением противофазных схем (соответствующая настройка нескольких устройств [25]), применением звуковых экранов, звукопоглощающих покрытий.

Следует указать, что особых требований к материалу конструкций описываемые установки не требуют. Избегать вибраций можно конструктивным путем, а тепловые нагрузки выдерживаются соответствующими материалами.

Регулирование действия устройств пульсирующего горения производится обычными теплотехническими приемами.

Выводы

- 1) Несмотря на сложные физические процессы при пульсирующем горении топлив, промышленное его использование доступно с целью интенсификации многих технологических направлений благодаря ряду положительных качеств метода.
- 2) Имеющиеся и проводимые исследования по пульсирующему горению позволяют выбрать требуемое техническое решение для конкретных применений.
- 3) Акустические недостатки метода имеют пути их преодоления.

Список цитированных источников

1. Раушенбах, Б. В. Вибрационное горение / Б. В. Раушенбах. – М. : Физматгиз, 1961. – 325 с.
2. Подымов, В. Н. Прикладные исследования вибрационного горения / В. Н. Подымов, В. С. Северянин, Я. М. Щелоков. – Казань : Изд.-во Казанского ун-та, 1978. – 215 с.
3. Попов, В. А. Технологическое пульсационное горение / В. А. Попов, В. С. Северянин, А. М. Аввакумов. – М. : Энергоатомиздат, 1993. – 316 с.
4. Северянин, В. С. Горение частицы топлива в пульсирующем потоке / В. С. Северянин // Известия вузов. Серия Энергетика. – 1975. – № 6. – С. 144–147.
5. Северянин, В. С. Оценка амплитуды давления при пульсирующем горении / В. С. Северянин, В. М. Яскевич // Известия вузов. Серия Энергетика. – 1983. – № 2. – С. 89–90.
6. Горбачева, М. Г. О снижении выхода окислов азота при пульсирующем горении / В. С. Северянин, М. Г. Горбачева // Известия вузов. Серия Энергетика. – 1987. – № 1. – С. 77–79.
7. Северянин, В. С. О нагревателях с пульсирующим горением / В. С. Северянин // Известия вузов. Серия Энергетика. – 1974. – № 5. – С. 142–146.
8. Камера пульсирующего горения горением / В. С. Северянин. Авторское свидетельство СССР № 348821, F 23 C 3/02, 1972.
9. Устройство для сжигания топлива горением / В. С. Северянин. Авторское свидетельство СССР № 251742, F 23 D.
10. Способ подачи воздуха в топку : пат. 5867 ВУ : МПК⁷ F 23G 5/00 / Северянин В. С., Черников И. А. (ВУ) ; заявитель и патентообладатель учреждения образования "Брестский государственный технический университет" (ВУ). – № а 20000961 ; заявл. 25.10.2000 ; опубл. 30.03.04. – 4 с. : ил.
11. Способ очистки наружных поверхностей нагрева / В. С. Северянин. Авторское свидетельство СССР № 362981, F 28 G 1/16, 1972.
12. Способ нагрева жидкостей / В. С. Северянин. Авторское свидетельство СССР № 1813979-A1, F 23 C 11/04, 1992.
13. Северянин, В. С. Котлы с пульсирующим горением / В. С. Северянин // Известия вузов. Серия Энергетика. – 2001. – № 1. – С. 79–86.
14. Северянин, В. С. Способ работы камеры пульсирующего горения / В. С. Северянин, М. Г. Горбачева, Л. Д. Субботкин. Авторское свидетельство СССР № 1192468-A1, F 23 C 11/04, 1983.
15. Способ глушения шума в устройстве пульсирующего горения : пат. 14942 ВУ : МПК F 23C 15/00 (2006.01) / Северянин В. С. (ВУ) ; заявитель и патентообладатель учреждения образования "Брестский государственный технический университет" (ВУ). – № а 20091082 ; заявл. 17.07.09 ; опубл. 30.10.2011. – 4 с. : ил.
16. Глушитель шума : а. с. 1483059 SU : МКИ⁴ F 01 N 1/08 / В. Н. Донской [и др.] (SU). – № 4320525/25-06 ; заявл. 26.10.87 ; опубл. 30.05.89, Бюл. № 20. – 6 с. : ил.
17. Устройство пульсирующего горения : пат. 5191 ВУ : МПК⁷ F 23C 11/04 / Северянин В. С. (ВУ) ; заявитель и патентообладатель учреждения образования "Брестский государственный технический университет" (ВУ). – № а 19990978 ; заявл. 01.11.99 ; опубл. 30.06.03. – 3 с. : ил.
18. Способ сжигания топлива / В. В. Лариошин, В. Д. Ельшов, В. С. Северянин. Патент РБ № 3337-C1, F 23 C 11/04, 2000.
19. Циклонная топка : пат. 976 ВУ : МПК⁷ F 23C 11/04 / Северянин В. С. (ВУ) ; заявитель и патентообладатель учреждения образования "Брестский государственный технический университет" (ВУ). – № а 20020356 ; заявл. 27.11.02 ; опубл. 30.09.03. – 2 с. : ил.
20. Устройство для пульсирующего сжигания топлива : а. с. 870854 SU : М. Кл.³ F 23 C 11/04, F 24 N 3/02 / В. С. Северянин, И. Н. Наливайко (SU). – № 2827708/24-06 ; заявл. 10.10.79 ; опубл. 07.10.81, Бюл. № 37. – 2 с. : ил.
21. Камерная топка / В. С. Северянин, П. Я. Лысков. Авторское свидетельство СССР № 228216, F 23 C 11/01, 1968.
22. Топка ПУЛЬСАР-10 / В. С. Северянин. Авторское свидетельство СССР № 1768869-A1, F 23 D 11/04, 1992.

23. Горелка : пат. 5192 BY : МПК⁷ F 23D 5/00 / Северянин В. С. (BY) ; заявитель и патентообладатель учреждение образования "Брестский государственный технический университет" (BY). – № а 19990996 ; заявл. 10.11.99 ; опубл. 30.06.03. – 3 с. : ил.
24. Горелка : пат. 10751 BY : МПК F 23D 5/00 (2006.01) / Северянин В. С. ; заявитель и патентообладатель учреждение образования "Брестский государственный технический университет" (BY). – № u 20150063 ; заявл. 10.02.15 ; опубл. 30.08.15. – 3 с. : ил.
25. Северянин, В. С. Антифоны в теплотехнике / В. С. Северянин // Инженер-механик. – 2019. – № 4. – С. 4–11.
13. Severyanin, V. S. Kotly s pul'siruyushchim goreniem / V. S. Severyanin // Izvestiya vuzov. Seriya Energetika. – 2001. – № 1. – С. 79–86.
14. Severyanin, V. S. Sposob raboty kamery pul'siruyushchego goreniya / V. S. Severyanin, M. G. Gorbacheva, L. D. Subbotkin. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 1192468-A1, F 23 S 11/04, 1983.
15. Sposob glusheniya shuma v ustrojstve pul'siruyushchego goreniya : pat. 14942 BY : МПК F 23C 15/00 (2006.01) / Severyanin V. S. (BY) ; заявитель i patentoobladatel' uchrezhdenie obrazovaniya "Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet" (BY). – № а 20091082 ; заявл. 17.07.09 ; опубл. 30.10.2011. – 4 с. : ил.
16. Glushitel' shuma : a. s. 1483059 SU : MKI⁴ F 01 N 1/08 / V. N. Donskoj [i dr.] (SU). – № 4320525/25-06 ; заявл. 26.10.87 ; опубл. 30.05.89, Byul. № 20. – 6 с. : ил.
17. Ustrojstvo pul'siruyushchego goreniya : pat. 5191 BY : МПК⁷ F 23C 11/04 / Severyanin V. S. (BY) ; заявитель i patentoobladatel' uchrezhdenie obrazovaniya "Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet" (BY). – № а 19990978 ; заявл. 01.11.99 ; опубл. 30.06.03. – 3 с. : ил.
18. Sposob szhiganiya topliva / V. V. Larioshin, V. D. El'shov, V. S. Severyanin. Patent RB № 3337-S1, F 23 S 11/04, 2000.
19. Ciklonnaya topka : pat. 976 BY : МПК⁷ F 23C 11/04 / Severyanin V. S. (BY) ; заявитель i patentoobladatel' uchrezhdenie obrazovaniya "Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet" (BY). – № u 20020356 ; заявл. 27.11.02 ; опубл. 30.09.03. – 2 с. : ил.
20. Ustrojstvo dlya pul'siruyushchego szhiganiya topliva : a. s. 870854 SU : M. Kl.³ F 23 S 11/04, F 24 N 3/02 / V. S. Severyanin, I. N. Nalivajko (SU). – № 2827708/24-06 ; заявл. 10.10.79 ; опубл. 07.10.81, Byul. № 37. – 2 с. : ил.
21. Kamernaya topka / V. S. Severyanin, P. YA. Lyskov. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 228216, F 23 C 11/01, 1968.
22. Topka PUL'SAR-10 / V. S. Severyanin. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 1768869-A1, F 23 D 11/04, 1992.
23. Gorelka : pat. 5192 BY : МПК⁷ F 23D 5/00 / Severyanin V. S. (BY) ; заявитель i patentoobladatel' uchrezhdenie obrazovaniya "Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet" (BY). – № а 19990996 ; заявл. 10.11.99 ; опубл. 30.06.03. – 3 с. : ил.
24. Gorelka : pat. 10751 BY : МПК F 23D 5/00 (2006.01) / Severyanin V. S. ; заявитель i patentoobladatel' uchrezhdenie obrazovaniya "Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet" (BY). – № u 20150063 ; заявл. 10.02.15 ; опубл. 30.08.15. – 3 с. : ил.
25. Severyanin, V. S. Antifony v teplotekhnike / V. S. Severyanin // Inzhener-mekhanik. – 2019. – № 4. – С. 4–11.

References

1. Raushenbah, B. V. Vibracionnoe gorenie / B. V. Raushenbah. – М. : Fizmatgiz, 1961. – 325 s.
2. Podymov, V. N. Prikladnye issledovaniya vibracionnogo goreniya / V. N. Podymov, V. S. Severyanin, YA. M. SHCHelokov. – Kazan' : Izd.-vo Kazanskogo un-ta, 1978. – 215 s.
3. Popov, V. A. Tekhnologicheskoe pul'sacionnoe gorenie / V. A. Popov, V. S. Severyanin, A. M. Avvakumov. – М. : Energoatomiz-dat, 1993. – 316 s.
4. Severyanin, V. S. Gorenie chasticy topliva v pul'siruyushchem potoke / V. S. Severyanin // Izvestiya vuzov. Seriya Energetika. – 1975. – № 6. – С. 144–147.
5. Severyanin, V. S. Ocenka amplitudy davleniya pri pul'siruyushchem goreanii / V. S. Severyanin, V. M. YASkevich // Izvestiya vuzov. Seriya Energetika. – 1983. – № 2. – С. 89–90.
6. Gorbacheva, M. G. O snizhenii vyhoda kislov azota pri pul'siruyushchem goreanii / V. S. Severyanin, M. G. Gorbacheva // Izvestiya vuzov. Seriya Energetika. – 1987. – № 1. – С. 77–79.
7. Severyanin, V. S. O nagrevatelyah s pul'siruyushchim goreniem / V. S. Severyanin // Izvestiya vuzov. Seriya Energetika. – 1974. – № 5. – С. 142–146.
8. Kamera pul'siruyushchego goreniya goreniem / V. S. Severyanin. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 348821, F 23 S 3/02, 1972.
9. Ustrojstvo dlya szhiganiya topliva goreniem / V. S. Severyanin. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 251742, F 23 D.
10. Sposob podachi vozduha v topku : pat. 5867 BY : МПК⁷ F 23G 5/00 / Severyanin V. S., CHernikov I. A. (BY) ; заявитель i patentoobladatel' uchrezhdenie obrazovaniya "Brestskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet" (BY). – № а 20000961 ; заявл. 25.10.2000 ; опубл. 30.03.04. – 4 с. : ил.
11. Sposob oчитки naruzhnyh poverhnostej nagreva / V. S. Severyanin. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 362981, F 28 G 1/16, 1972.
12. Sposob nagreva zhidkostej / V. S. Severyanin. Avtorskoe svidetel'stvo SSSR № 1813979-A1, F 23 C 11/04, 1992.

Материал поступил в редакцию 06.12.2021