

А. Е. Брестер, В. И. Жуков

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ В МАКЕТЕ ИСПАРИТЕЛЯ ДИФФУЗИОННОГО НАСОСА

*Ключевые слова: тонкий слой жидкости, теплообмен, кипение, испарение, субатмосферное давление, пульсации, диффузионный насос, n-додекан, спектр мощности.*

*В работе представлены результаты экспериментального исследования влияния высоты горизонтального слоя жидкости на характеристики пульсаций давления при испарении/кипении в условиях пониженного давления. Эксперименты выполнены на термосифонной установке, моделирующей работу испарителя диффузионного насоса. В качестве рабочей жидкости использован n-додекан, выбранный в качестве модельной среды для вакуумного масла. Диапазон исследованных давлений составлял от 33 Па до 20 кПа, высота слоя жидкости варьировалась от 1,4 до 40 мм. Установлено, что при давлениях выше 1 кПа наблюдается пузырьковое кипение, тогда как в области давлений ниже 1 кПа пузырьковое кипение отсутствует. Показано, что в диапазоне давлений ниже 1 кПа амплитуда пульсаций давления возрастает с увеличением высоты слоя жидкости, достигая 110 Па при высоте 20 мм. Дальнейшее увеличение высоты слоя не приводит к существенному росту пульсаций давления. Методом быстрого преобразования Фурье получены спектры мощности пульсаций давления, демонстрирующие степенную зависимость вида  $1/f^\alpha$  с характерными пиками. Данные пики соответствуют частотам взрывных вскипаний и процессам, протекающим во время взрывного кипения. Установлено соответствие между частотами, оцененными по временным реализациям пульсаций давления, и пиками на спектрах мощности.*

A. E. Brester, V. I. Zhukov

## STUDY OF PRESSURE PULSATIONS IN A DIFFUSION PUMP EVAPORATOR MODEL

*Keywords: thin liquid layer, heat transfer, boiling, evaporation, subatmospheric pressure, pulsations, diffusion pump, n-dodecane, power spectrum.*

*The paper presents the results of an experimental study on the effect of horizontal liquid layer height on the characteristics of pressure pulsations during evaporation/boiling under reduced pressure conditions. The experiments were carried out in a thermosiphon setup simulating the operation of a diffusion pump evaporator. N-dodecane was used as the working fluid, selected as a model medium for vacuum oil. The pressure range studied was from 33 Pa to 20 kPa, and the liquid layer height varied from 1.4 to 40 mm. It was found that at pressures above 1 kPa, nucleate boiling occurs, whereas in the pressure range below 1 kPa, nucleate boiling is absent. It is shown that in the pressure range below 1 kPa, the amplitude of pressure pulsations increases with increasing liquid layer height, reaching 110 Pa at a height of 20 mm. A further increase in the layer height does not lead to a significant increase in pressure pulsations. Using the fast Fourier transform, power spectra of pressure pulsations were obtained, demonstrating a power-law dependence of the form  $1/f^\alpha$  with characteristic peaks. These peaks correspond to the frequencies of explosive boiling-up and the processes occurring during explosive boiling. A correspondence has been established between the frequencies estimated from time realizations of pressure pulsations and the peaks in the power spectra.*

### Введение

Использование вакуума распространено в научных исследованиях и многих отраслях промышленного производства: нефтехимии, пищевой промышленности, электронике, энергетике, металлургии, машиностроении и космонавтике. Примером служит нефтехимия, где вакуумная дистилляция мазута обеспечивает выделение фракций для последующего получения топлив, масел и парафинов. В металлургии вакуумные технологии критичны для производства титана, ниобия, тантала, циркония и бериллия. Для создания вакуумной среды применяются различные типы насосов, причем задачи поддержания высокого и сверхвысокого вакуума решаются преимущественно с помощью диффузионных насосов.

Диффузионные вакуумные насосы предназначены для генерации и поддержания высокого и сверхвысокого вакуума ( $P \leq 10^{-1}$  Па). Параметром, определяющим их эффективность, является неизменная быстрота действия во всем рабочем интервале давлений [1]. Согласно данным

литературы [3-6], в кипятыльниках паромасляных насосов, где теплообмен реализуется при давлениях 13–270 Па [2, 3], наблюдается взрывной характер парообразования рабочей жидкости. Это сопровождается резкими перепадами давления, амплитуда которых в фазе вскипания возрастает более чем вдвое [3-6]. Возникающая вследствие этого нестабильность процесса парообразования приводит к ухудшению рабочих характеристик насосов, а именно к возрастанию предельного остаточного давления и усилению обратного потока паров рабочей среды.

Эффективным методом интенсификации теплообмена и увеличения интенсивности парообразования является процесс испарения/кипения тонкой пленки рабочей жидкости. Использование тонкой пленки рабочей жидкости обеспечивает повышение стабильности процесса парообразования и интенсификацию теплообмена между поверхностью нагрева и жидкой средой. В патентной литературе представлен ряд технических решений, основанных на принципе испарения тонкой пленки [7-10]. Однако анализ

данных источников не позволяет определить оптимальную высоту слоя жидкости, обеспечивающую максимальную эффективность процесса.

В работе [4] авторы выявили основные закономерности пульсаций давления в вакуумных системах, откачка в которых осуществлялась диффузионными насосами:

- Первый вид пульсаций авторы относят к электрическому шуму в самих измерительных приборах (Рис. 1 (1));
- Второй тип относится к выделению газа и утечкам в вакуумной системе (Рис. 1 (2));
- Третий вид пульсаций вызван взрывным кипением в кипятильнике диффузионного насоса (Рис. 1 (3)).

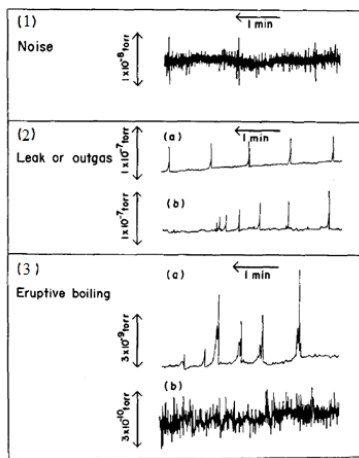


Рис. 1 – Виды пульсаций давления, наблюдаемые в вакуумных системах [4]

Fig. 1 – Types of pressure pulsations observed in vacuum systems [4]

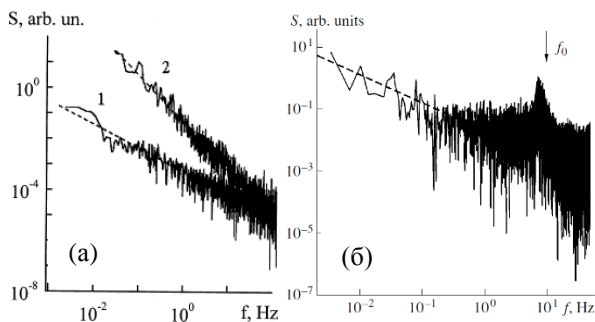


Рис. 2 – Спектры мощности флуктуаций: (а) при переходе к пленочному режиму кипения воды на вертикальном проволочном нагревателе: 1 –  $1/f$ ; 2 –  $1/f^2$  [11]; (б) при кипении капли, когда капля стремится принять сферическую форму (штриховой линией показана зависимость  $S \sim 1/f$ ) [12]

Fig. 2 – Power spectra of fluctuations: (a) during the transition to the film boiling regime of water on a vertical wire heater: 1 –  $1/f$ ; 2 –  $1/f^2$  [11]; (b) during the boiling of a drop, when the drop tends to take on a spherical shape (the dashed line shows the dependence  $S \sim 1/f$ ) [12]

Для анализа пульсаций давления в вакуумных системах перспективно использовать метод, предложенный авторами работ [11, 12]. Они предложили исследовать пульсации измеряемого параметра при кипении жидкости с помощью быстрого преобразования Фурье для получения спектров мощности (например, напряжения на проволочном нагревателе). Показано, что в переходных и кризисных режимах кипения генерируются интенсивные пульсации измеряемого параметра со спектром мощности обратно пропорциональным частоте, как это было получено для кипения на проволочном нагревателе (Рис. 2(а)) и кипении капли (Рис. 2(б)). Такое поведение спектра мощности пульсаций обусловлено неравновесными фазовыми переходами, связанными со сменой режимов кипения.

Целью данной работы является экспериментальное изучение влияния высоты слоя рабочей жидкости на пульсации давления и установление корреляции между характером спектров мощности указанных пульсаций и процессами, происходящими в испарителе физической модели диффузионного насоса.

Сущность физического моделирования заключается в материальном воспроизведении технологического процесса или аппарата на модели с целью его изучения и последующего переноса полученных закономерностей на промышленный объект (натуру) [13]. В опытах на модели меняются (по сравнению с производственными условиями) лишь масштаб установки, используемые вещества, температурные условия и т. п., но физическая сущность изучаемого в модели процесса остается той же, что и у моделируемого процесса (в натуре) [13].

### Экспериментальная часть

Опыты выполнялись на вакуумном теплообменном стенде, конструкция которого моделирует работу испарителя диффузионного насоса. Детальное описание стенда представлено в источниках [5, 14]. Фиксация показаний датчиков температуры и давления производилась посредством аппаратуры National Instruments с последующей обработкой полученных данных в программной среде LabVIEW.

Рабочая камера стенда представляет собой цилиндрическую емкость высотой 300 мм и внутренним диаметром 120 мм, изготовленную из листовой нержавеющей стали толщиной 1 мм. Днище камеры выполнено из стали марки 12Х18Н10Т и оснащено пятью посадочными отверстиями под термопары, расположенными с интервалом 2 мм.

Контроль давления в рабочем объеме осуществлялся двумя датчиками, при этом регулировка давления достигалась изменением интенсивности охлаждения. В интервале давлений 0,033–1,2 кПа применялся ионизационно-деформационный преобразователь Setra-730 с относительной погрешностью измерений  $\pm 0,5\%$ . При давлениях, превышающих 1,2 кПа, использовался мембранный датчик ASG Edwards,

перекрывающий диапазон 0,133–200 кПа с приведенной погрешностью  $\pm 0,2$  % от верхнего предела измерений.

В данной работе в качестве «модельной» жидкости [15] для вакуумного масла использовался н-додекан. Он является одним из основных компонентов вакуумного масла VM-1 и имеет с ним общую природу происхождения. Зависимости давления пара от температуры обеих жидкостей имеют одинаковую кривизну и практически параллельны друг другу. Теплофизические свойства этих жидкостей близки (имеют одинаковый порядок величин). Также н-додекан обладает низким давлением насыщенных паров при комнатной температуре, что позволило проводить эксперименты в области низких давлений с использованием в конденсаторе холодной водопроводной воды.

В ходе экспериментов регистрировались стационарные режимы теплообмена. Измерялись температуры по толщине обогреваемой стенки и давление над слоем жидкости в рабочей камере. Давление варьировалось в широком диапазоне – от 33 Па до  $2 \cdot 10^4$  Па. Опыты проводились при высотах слоя жидкости  $h$  ( $h/l_0$ ) от 1,7 мм (0,99) до 40,0 мм (23,22).

### Результаты и обсуждение

Анализ экспериментальных данных позволил выделить два характерных диапазона давлений, определяющих режимы фазовых переходов. Первая область соответствует низким приведенным давлениям ( $P \leq 1$  кПа), где пузырьковое кипение не наблюдалось, при этом характер испарения определялся высотой слоя жидкости. Вторая область охватывает диапазон умеренных приведенных давлений ( $P > 1$  кПа), в котором вне зависимости от высоты слоя наблюдалось пузырьковое кипение.

Классификация режимов в области низких давлений ( $P \leq 1$  кПа) проводилась по высоте слоя рабочей жидкости. При малых высотах ( $h < 10$  мм) наблюдалось образование характерных структур в виде «воронок» и «кратеров». Аналогичные структуры наблюдались при испарении вакуумного масла [16], что свидетельствует о подобии тепловых и гидродинамических процессов в слоях н-додекана и вакуумного масла. Данный факт подтверждает обоснованность использования н-додекана в качестве модельной жидкости. Для высот слоя, превышающих 10 мм ( $h > 10$  мм), характерен взрывной режим кипения.

Характер пульсаций в значительной степени зависит от высоты слоя жидкости при давлениях ниже  $10^3$  Па, когда не наблюдалось пузырьковое кипение. При увеличении высоты слоя жидкости процесс парообразования становится нестабильным, характеризуясь периодическим взрывным вскипанием. При взрывном вскипании жидкости происходило разрушение слоя, сопровождающееся летящими вверх каплями. В результате в объем камеры поступало значительное количество пара, которое приводило к пульсациям давления. Далее жидкость возвращалась в спокойное состояние, в

котором теплообмен осуществлялся преимущественно в режиме конвекции, и давление снова возвращалось к исходному значению.

На Рис. 3 представлена зависимость амплитуды пульсаций давления от высоты слоя жидкости. Из Рис. 3 видно, что при высоте слоя жидкости менее 4,0 мм включительно, амплитуда пульсаций давления изменяется незначительно и не превышает 20 Па. При высоте слоя более 4,0 мм амплитуда пульсаций давления с увеличением высоты слоя до 20 мм увеличивается примерно до 110 Па, дальнейшее увеличение высоты слоя жидкости практически не влияет на величину амплитуды пульсаций.

Применение тонкой пленки жидкости (порядка  $2l_0$ ) значительно снижает пульсации давления, что увеличивает стабильность парообразования, а значит образуется более стабильная паровая струя из кольцевого сопла, что уменьшает загрязнение откачиваемого объема обратным потоком паров рабочей жидкости. Кроме того, в работе [14] было показано, что максимальное значение коэффициента теплоотдачи достигалось при высоте слоя жидкости 2,5–4 мм (порядка  $2l_0$ ).

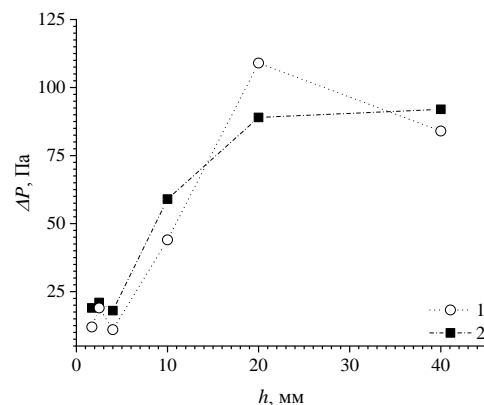


Рис. 3 – Изменение амплитуды пульсаций давления от высоты слоя жидкости при испарении/кипении н-додекана. Тепловой поток  $q = 35$  кВт/м<sup>2</sup>: 1 – при рабочем давлении в камере 67 Па; 2 – 133 Па

Fig. 3 – Change in the amplitude of pressure pulsations depending on the height of the liquid layer during evaporation/boiling of n-dodecane. Heat flux  $q = 35$  kW/m<sup>2</sup>: 1 – at an operating pressure in the chamber of 67 Pa; 2 – 133 Pa

Выше было сказано, что при давлении  $P \leq 1$  кПа процесс парообразования в слоях н-додекана высотой более 10 мм характеризуется периодическими взрывными вскипаниями жидкости, сопровождающимися значительными пульсациями давления. Период между двумя вскипаниями жидкости равен  $t_0 = t_1 + t_2$  (Рис. 4), где  $t_1$  это продолжительность взрывных вскипаний, а  $t_2$  – пауза между ними.

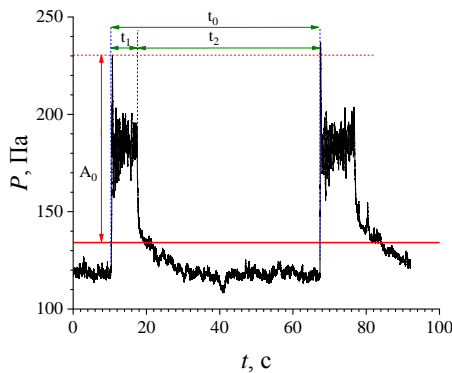


Рис. 4 – Пульсации давления от времени в режиме взрывного кипения n-додекана при высоте слоя 40 мм, рабочем давлении в камере 133 Па, при тепловом потоке 27 кВт/м<sup>2</sup>

Fig. 4 – Pressure pulsations over time in the explosive boiling mode of n-dodecane at a layer height of 40 mm, an operating pressure in the chamber of 133 Pa, and a heat flux of 27 kW/m<sup>2</sup>

С помощью быстрого преобразования Фурье был получен спектр мощности пульсации давления от частоты (Рис. 5) для слоя высотой 40 мм при давлении 133 Па. Полученный спектр мощности пульсаций давления имел вид  $1/f^\alpha$ . Кроме того, на спектре мощности пульсаций давления имеется два пика: один – в низкочастотной зоне пик №1 (цифра 1 на Рис. 5), второй – в более высокочастотной зоне пик №2 (цифра 2 на Рис.5). Из оценок частоты пульсаций по периоду  $t_0$  (Рис. 4) следует, что частота взрывных вскипаний соответствует пику №1 (Рис. 5). Частота, соответствующая пику №2 равна  $\approx 2$  Гц (цифра 2 на Рис.5). Данная частота соответствует пульсациям давления, в промежутке времени  $t_1$  (Рис. 4).

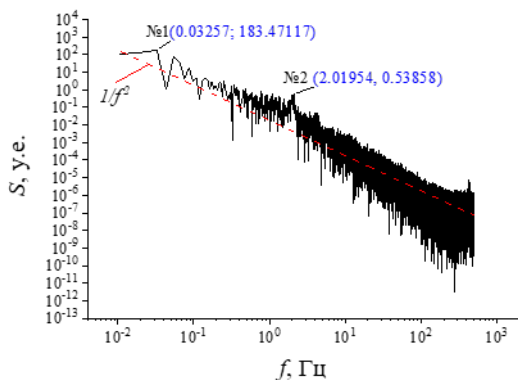


Рис. 5 – Спектр мощности пульсации давления от частоты, полученный при взрывном кипении n-додекана при высоте слоя 40 мм и рабочем давлении в камере 133 Па при тепловом потоке, равном 27 кВт/м<sup>2</sup>

Fig. 5 – Power spectrum of pressure pulsation from frequency, obtained during explosive boiling of n-dodecane at a layer height of 40 mm and an operating pressure in the chamber of 133 Pa with a heat flux equal to 27 kW/m<sup>2</sup>

Сравнение значений частот, оценённых по периоду  $t_0$  (Рис. 4) и в промежутке времени  $t_1$  (Рис. 4) со значениями характерных частот, выделенных с помощью быстрого преобразования Фурье (Рис. 5), приведено в Таблице 1. Из сравнения численных значений видно, что высокочастотные пульсации соответствуют пульсациям давления в промежутке времени  $t_1$  (пик №2). Оценки значений частоты по периодам  $t_0$  между взрывными вскипаниями жидкости (пик №1) также хорошо согласуются между собой.

Таблица 1 – Параметры пиков на спектрах мощности пульсаций давления

Table 1 – Parameters of peaks in the power spectra of pressure pulsations

Тепловой поток, кВт/м <sup>2</sup>	Частота пика, Гц	Оценка по характерным периодам, Рис. 4	Частоты, выделенные с помощью Фурье анализа, Рис. 5
27	№1	0.01758	0.03257
	№2	2.03252	2.01954

### Заключение

Процессы испарения/кипения горизонтальных слоев жидкости сопровождаются значительными пульсациями давления. При снижении высоты слоя жидкости (до  $2l_0$ ) амплитуда пульсаций давления уменьшается примерно на 90 Па.

Получено, что обработка спектров мощности пульсаций давления позволяет установить взаимосвязь между поведением спектральной функции в различных режимах теплообмена. Кроме того, данный вид обработки пульсаций давления хорошо поддается автоматизации, что позволит предостеречь от аварийных ситуаций в агрегатах и технологических процессах.

Использование пленки рабочей жидкости толщиной  $2l_0$  позволяет увеличить надежность работы диффузионного насоса и уменьшить обратный поток паров рабочей жидкости благодаря интенсификации теплообмена и повышению стабильности парообразования.

### Литература

- И.З. Багаутдинов, А.А. Галаятдинов, *Форум молодых ученых*, **9**, 13, 33-37 (2017)
- V.I. Zhukov, V.P. Kulikov, *Chemical and Petroleum Engineering*, **26**, 226-28 (1990)
- M.M. Sorokin, A.V. Chechetkin, *Chemical and Petroleum Engineering*, **11**, 20-24 (1966). DOI: 10.1007/BF01136478
- H. Okamoto, Y. Murakami, *Vacuum*, **17**, 79-85 (1967). DOI: 10.1016/0042-207X(67)91281-X
- A.E. Brester, D.A. Shvetsov, V.I. Zhukov, A.N. Pavlenko, *J. Engin. Thermophys.*, **32**, 415-54 (2023). DOI: 10.1134/S1810232823030025
- A.E. Brester, D.A. Shvetsov, V.I. Zhukov, A.N. Pavlenko, *Journal of Physics: Conference Series*, **2119**, 012080 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2119/1/012080
- Авт. свид. СССР 1373908 (1988)
- Авт. свид. СССР 595543 (1978)

9. Авт. свид. СССР 1777422 (1994).
10. Авт. свид. WO 91/03650 (1991)
11. V.N. Skokov, V.P. Koverda, A.V. Reshetnikov et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **46**, 10, 1879-1883 (2003). DOI: 10.1016/S0017-9310(02)00475-1
12. V.P. Skripov, A.V. Vinogradov, V.N. Skokov et al., *Tech. Phys.*, **48**, 6, 682-684 (2003). DOI: 10.1134/1.1583818
13. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии, Альянс, Москва, 2004. 753 с.
14. А.Е. Брестер, В.И. Жуков, Д.А. Швецов, А.Н. Павленко, *Вестн. технol. ун-та*, **27**, 10, 74-78 (2024). DOI : 10.55421/1998-7072\_2024\_27\_10\_74
15. S. Michaie, R. Rullière, J. Bonjour, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **101**, 217-230 (2019). DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2018.10.009
16. В.И. Жуков, *Теорет. основы хим. технол.*, **45**, 5, 602-606 (2011)
5. А.Е. Brester, D.A. Shvetsov, V.I. Zhukov, A.N. Pavlenko, *J. Engin. Thermophysics*, **32**, 415-54 (2023). DOI: 10.1134/S1810232823030025
6. А.Е. Brester, D.A. Shvetsov, V.I. Zhukov, A.N. Pavlenko, *Journal of Physics: Conference Series*, **2119**, 012080 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2119/1/012080
7. Auth. Cert. USSR 1373908 (1988)
8. Auth. Cert. USSR 595543 (1978)
9. Auth. Cert. USSR 1777422 (1994).
10. Auth. Cert. WO 91/03650 (1991)
11. V.N. Skokov, V.P. Koverda, A.V. Reshetnikov et al., *Int. J. Heat Mass Transf.*, **46**, 10, 1879-1883 (2003). DOI: 10.1016/S0017-9310(02)00475-1
12. V.P. Skripov, A.V. Vinogradov, V.N. Skokov et al., *Tech. Phys.*, **48**, 6, 682-684 (2003). DOI: 10.1134/1.1583818
13. Kasatkin A.G. Basic Processes and Apparatuses of Chemical Technology, Alliance, Moscow, 2004. 753 p.
14. А.Е. Брестер, В.И. Жуков, Д.А. Швецов, А.Н. Павленко, *Bulletin of the Technological University*, **27**, 10, 74-78 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072\_2024\_27\_10\_74 (in Russian)
15. S. Michaie, R. Rullière, J. Bonjour, *Exp. Therm. Fluid Sci.*, **101**, 217-230 (2019). DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2018.10.009
16. V.I. Zhukov, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, **45**, 5, 602-606 (2011). (in Russian)

### References

1. I.Z. Bagautdinov, A.A. Galyautdinov, *Forum of Young Scientists*, **9**, 13, 33-37 (2017). (in Russian)
2. V.I. Zhukov, V.P. Kulikov, *Chemical and Petroleum Engineering*, **26**, 226-28 (1990)
3. М.М. Sorokin, A.V. Chechetkin, *Chemical and Petroleum Engineering*, **11**, 20-24 (1966). DOI: 10.1007/BF01136478
4. Н. Okamoto, Y. Murakami, *Vacuum*, **17**, 79-85 (1967). DOI: 10.1016/0042-207X(67)91281-X
5. А.Е. Брестер – ассистент каф. ХХТ Новосибирский Государственный Технический Университет (НГТУ), Новосибирск, Россия, brester94@gmail.com; В.И. Жуков – канд. техн. наук, доцент каф. ХХТ НГТУ, vzh@inbox.ru.

© А. Е. Брестер – ассистент каф. ХХТ Новосибирский Государственный Технический Университет (НГТУ), Новосибирск, Россия, brester94@gmail.com; В. И. Жуков – канд. техн. наук, доцент каф. ХХТ НГТУ, vzh@inbox.ru.

© А. Е. Brester – Assistant, Novosibirsk State Technical University (NSTU), Novosibirsk, Russia, brester94@gmail.com; V. I. Zhukov – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, NSTU, vzh@inbox.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 01.03.26.

Дата принятия рукописи в печать – 08.04.26.