

позволяет достаточно простым способом добиться сбалансированности контуров системы водяного отопления.

### **Список цитированных источников**

1. Пырков, В. В. Гидравлическое регулирование систем отопления и охлаждения. Теория и практика. – Киев : изд. «Такі справи», 2010. – 304 с.
2. Energy efficiency of multi-apartment residential houses with individual heat supply/ Uladzimir Navaseltsau, Dzina Navaseltsava, Mikhail Shenogin– IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 896 (2020) 012057. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012057>
3. Energy consumption of modern residential houses of the same energy efficient classes/ Uladzimir Navaseltsau, Vitali Khaletski, Vladimir Melnikov – IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 896 (2020) 012056. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012056>
4. Торреджанни, Р. Балансировка систем отопления и охлаждения. Практическое руководство.– изд. компании Giacomini S.p.A., 2018. – 173 с.
5. Покотилов, В. В. Регулирующие клапаны автоматизированных систем тепло- и холодоснабжения. – Вена, 2017. – 228 с.
6. Махов, Л. М. Гидравлический режим системы водяного отопления / Л. М. Махов, С. М. Усиков // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2013. – № 1(133). – С. 72–73.
7. Покотилов, В. В. Системы водяного отопления. – Вена, 2008. – 159 с.

УДК 534.142

## **ВЛИЯНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ ГОРЕНИЯ**

*Д. В. Новосельцева*

УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь,  
dvnovoseltseva@yandex.ru

### **Аннотация**

Одним из методов очистки дурнопахнущих веществ является термическое обезвреживание, в частности, сжигание. Высокоэффективным способом сжигания топлива является пульсирующее горение. Пульсирующим горением называется неустойчивый режим горения с изменяющимися во времени динамическими характеристиками процесса, имеющими периодическую составляющую.

Большое значение имеет влияние пульсаций давления на макроскопическую кинетику реакций в пульсирующем газовом потоке, исследование этого влияния являлось целью данной работы.

Исследования показали, что при колебаниях давления, возникающих при пульсирующем горении, скорость горения возрастает, а, следовательно, увеличивается теплонапряженность топочного объема, которая представляет собой тепловыделение в единицу времени с единицы объема. Сделан вывод о том,

что режим пульсирующего горения можно использовать для обезвреживания газообразных отходов низких концентраций.

**Ключевые слова:** пульсирующее горение, скорость химической реакции, давление, частота пульсаций, концентрация, порядок реакции.

## **INFLUENCE OF PRESSURE PULSATIONS ON PHYSICO-CHEMICAL PROCESSES IN NON-STATIONARY COMBUSTION MODES**

*D. V. Navaseltava*

### **Abstract**

One of the methods of purification of foul-smelling substances is thermal neutralization - in particular, combustion. Pulsating combustion is a highly efficient way of burning fuel. Pulsating combustion is an unstable combustion mode with time-varying dynamic characteristics of the process that have a periodic component.

The influence of pressure pulsations on the macroscopic kinetics of reactions in a pulsating gas flow is of great importance. The purpose of this article is to investigate this fact.

Studies have shown that with pressure fluctuations that occur during pulsating combustion, the combustion rate increases. Consequently, the heat density of the furnace volume increases, which is the heat release per unit time per unit volume.

It was concluded that the pulsed combustion mode can be used to neutralize gaseous wastes of low concentrations.

**Keywords:** pulsating combustion, the rate of chemical reaction, pressure, pulsation frequency, concentration, reaction order.

**Введение.** Птицефабрики, животноводческие фермы и свиноводческие комплексы, как и перерабатывающие цеха этих предприятий, не являются основными поставщиками вредных веществ в атмосферу, однако являются основным источником поступления в атмосферу веществ с резким и неприятным запахом, часто называемых «дурнопахнущие вещества» [1].

Хотя концентрация каждого компонента в составе дурнопахнущих веществ в вентиляционном воздухе часто не превышает ПДК, их присутствие в атмосфере создает дискомфортные условия жизни людей вокруг предприятий – источников таких выбросов. Границы такой зоны дискомфорта не являются фиксированными, а зависят от направления и скорости ветра.

Загрязнение окружающей среды дурнопахнущими выбросами стало большой социальной проблемой и единственным способом решения этой проблемы является очистка вентиляционного воздуха от дурнопахнущих веществ перед его выбросом в атмосферу. Одним из методов очистки таких выбросов является термическое обезвреживание – в частности сжигание. Однако при низких концентрациях загрязняющих веществ эффективность данного метода значительно снижается [2].

Высокоэффективным способом сжигания топлива является пульсирующее горение. Пульсирующим горением называется неустойчивый режим горения с изменяющимися во времени динамическими характеристиками процесса, имеющими периодическую составляющую [3, 4].

При обсуждении особенностей пульсирующего горения газа [5, 6] на первый план, как правило, выдвигаются вопросы интенсификации процессов переноса (теплопроводности, диффузии, конвективного теплообмена), перемешивания компонентов и т.д. под влиянием пульсаций скорости. Наряду с этими важными явлениями большое значение имеет влияние пульсаций давления на макроскопическую кинетику реакций в пульсирующем газовом потоке.

Для поддержания устойчивого пульсирующего режима необходимо соблюдение правила Релея: теплоподвод должен осуществляться в фазе сжатия, т.е. должен совпадать с положительной фазой переменного давления [7].

**Материалы и методы.** Колебания давления, возникающие при слоевом пульсирующем горении газа, близки к гармоническим и могут быть описаны известным соотношением [7]

$$p(t) = p_{cp} + p_a \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (1)$$

где  $p_{cp}$  – среднее значение давления (атмосферное),  $P_a$ ;  $p_a$  – амплитудное значение давления,  $P_a$ ;  $\omega$  - круговая частота пульсаций,  $c^{-1}$ .

Перед оценкой воздействия нестационарного давления на кинетику реакции выясним, как влияет частота данных колебаний на скорость химической реакции. Для этого рассмотрим две молекулы, реакция между которыми, согласно теории активных соударений [8], может произойти при выполнении следующих условий:

- 1) молекулы должны столкнуться;
- 2) молекулы должны обладать необходимой энергией (энергией активации);
- 3) молекулы должны быть правильно ориентированы относительно друг друга.

Предположим, что одна из молекул неподвижна, молекулы обладают энергией активации и правильно ориентированы относительно друг друга. Тогда единственным необходимым условием для начала реакции является прохождение молекулой некоторого пути до соударения с другой молекулой, называемого средней длиной свободного пробега.

Средняя длина свободного пробега может быть вычислена по формуле [9]

$$\lambda = \frac{\bar{V}}{\bar{z}}, \quad (2)$$

где  $\bar{V}$  – средняя скорость теплового движения молекул;  $\bar{z}$  – среднее число столкновений, определяемое следующей формулой [9]

$$\bar{z} = \sqrt{2} \cdot \pi \cdot d_{эф}^2 \cdot n \cdot \bar{V}, \quad (3)$$

где  $d_{эф}$  – эффективный диаметр молекул, м;  $n$  – число молекул в единичном объеме.

Число молекул в единичном объеме  $n$  определяется при помощи числа Лошмидта  $n_0$ , т.е. числа молекул идеального газа в кубическом метре при нормальных условиях:  $n_0 = 2.683 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ . Для произвольных условий

$$n = n_0 \cdot \frac{p \cdot T_0}{p_0 \cdot T}, \quad (4)$$

где  $p_0$  и  $T_0$  – давление и температура при нормальных условиях ( $p_0 = 101.3 \text{ кПа}$ ,  $T_0 = 273 \text{ К}$ ).

Определим время, необходимое для прохождения молекулой пути  $\lambda$ , т.е. время до соударения молекул

$$\tau = \frac{\lambda}{\bar{V}}, \quad (5)$$

где  $\bar{V}$  – то же, что и в формуле (2) и согласно молекулярно-кинетической теории [4]

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{3 \cdot R \cdot T}{\mu}}, \quad (6)$$

где  $T$  – абсолютная температура, К;  $R$  – универсальная газовая постоянная, равная  $8,321 \text{ Дж/(мольК)}$ ;  $\mu$  – молярная масса газа,  $\text{г/моль}$ .

Подставив (2–4) и (6) в (5), получаем

$$\tau = \frac{48,22}{d_{эф}^2 \cdot n_0 \cdot p} \cdot \sqrt{\frac{T \cdot \mu}{R}}. \quad (7)$$

Под действием акустического давления происходит смещение частиц (молекул) среды в волне с амплитудой равной [10]

$$A = \frac{P_a}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot Z}, \quad (8)$$

где  $p_a$  – максимальное акустическое давление (амплитуда давления),  $\text{Па}$ ;  $f$  – частота пульсаций,  $\text{Гц}$ ;  $Z$  – удельное акустическое сопротивление среды,  $\text{Па} \cdot \text{с/м}$ .

$$Z = \rho \cdot c, \quad (9)$$

где  $\rho$  – плотность среды,  $\text{кг/м}^3$ ;  $c$  – скорость звука,  $\text{м/с}$ .

Тогда с учетом (9) выражение (8) будет иметь вид:

$$A = \frac{P_a}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \rho \cdot c} \quad (10)$$

Подставляя в (7) округленные значения  $d_{эф} = 14 \times 10^{-10} \text{ м}$ ,  $\mu = 29 \text{ г/моль}$  (для воздуха),  $n_0 = 2.7 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$ ,  $T = 1500 \text{ К}$ ,  $p = p_0 = 101300 \text{ Па}$ , получим  $\tau \approx 10^{-8} \text{ с}$ . Для других газов порядок вычисленной величины  $\tau$  тот же.

Сравнивая  $\tau$  с величиной полупериода равного  $1/2 f \approx 10^{-2} \text{ с}$ , можно сделать вывод о том, что за время полупериода при любой частоте колебаний, возникающих в КПП, химическая реакция закончится, а, следовательно, частота практически не влияет на кинетику реакции.

Выражение для определения скорости химической реакции, известное как закон действующих масс, имеет вид [11]

$$W = k \cdot C_1^{n_1} \cdot C_2^{n_2} \cdot \dots \cdot C_m^{n_m} = k \cdot \prod_{i=1}^m C_i^{n_i}, \quad (11)$$

где  $W$  – скорость химической реакции;  $k$  – константа скорости реакции;  $C_1, C_2, C_m$  – концентрация исходных реагентов;  $n_1, n_2, n_m$  – порядок реакции по данному компоненту.

Сумма показателей степеней при концентрациях называется порядком реакции и выражается следующим соотношением

$$N = \sum_{i=1}^m n_i. \quad (12)$$

Для нахождения зависимости скорости реакции от давления необходимо знать, как изменяются концентрации реагирующих веществ с изменением давления.

Эта зависимость может быть представлена следующим уравнением [11]

$$C_i = \frac{p_i}{R \cdot T}, \quad (13)$$

где  $p_i$  – парциальное давление  $i$ -го компонента газовой смеси,  $R$  и  $T$  – то же, что и в формуле (6).

Подставив в (13) выражение для парциального давления

$$p_i = p \cdot x_i, \quad (14)$$

где  $x_i$  – объемная или молярная доля  $i$ -го компонента газовой смеси;  $p$  – общее давление смеси.

Получим следующее соотношение между концентрацией  $i$ -го компонента и общим давлением смеси

$$C_i = \frac{p \cdot x_i}{R \cdot T}. \quad (15)$$

Подстановка выражения (15) в уравнение (11) с учетом (12) дает зависимость химической реакции от давления

$$W(p) = k \cdot \frac{p(t)^N}{(R \cdot T)^N} \cdot \prod_{i=1}^m x_i^{n_i}. \quad (16)$$

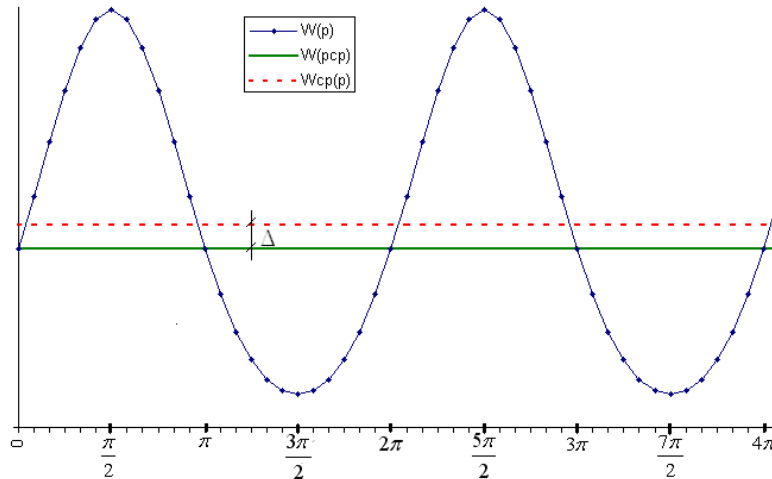
Формула (16) определяет изменение во времени мгновенного значения скорости реакции. Среднее ее значение для установившегося процесса может быть выражено в виде зависимости

$$W_{cp}(p) = \frac{k \cdot \prod_{i=1}^m x_i^{n_i}}{(R \cdot T)^N} \frac{\int_{t_1}^{t_2} [p_{cp} + p_a \cdot \sin(\omega \cdot t)]^N dt}{t_2 - t_1}. \quad (17)$$

Определим значение скорости реакции, соответствующее среднему значению давления:

$$W(p_{cp}) = k \cdot \frac{P_{cp}^N}{(R \cdot T)^N} \cdot \prod_{i=1}^m x_i^{n_i} . \quad (18)$$

Результаты и обсуждение. На основании зависимостей (16–18) построен график изменения скорости химической реакции при пульсациях давления (рисунок 1)



**Рисунок 1** – Изменение мгновенного значения скорости химической реакции во времени при пульсациях давления

Из рисунка 1 видно, что среднее значение скорости реакции  $W_{cp}(p)$  больше скорости реакции при среднем значении давления  $W(p_{cp})$  на величину  $\Delta$ . Прирост  $\Delta$  обусловлен тем, что *рост скорости реакции при повышении среднего значения давления на величину  $p_a$  превалирует над ее падением при снижении среднего давления на ту же величину.*

Абсолютный прирост скорости химической реакции можно вычислить как разность среднего значения  $W_{cp}(p)$ , определяемого по формуле (17), и значения скорости химической реакции при среднем значении давления  $W(p_{cp})$

$$\Delta = W_{cp}(p) - W(p_{cp}) . \quad (19)$$

Выражение для относительного прироста функции, определяющего рост скорости химической реакции при пульсациях давления в зоне горения, имеет вид

$$\begin{aligned} \delta = \frac{W_{cp}(p)}{W(p_{cp})} - 1 &= \frac{k \cdot \prod_{i=1}^m x_i^{n_i} \int_{t_1}^{t_2} [p_{cp} + p_a \cdot \sin(\omega \cdot t)]^N dt}{(R \cdot T)^N \cdot \frac{k \cdot \prod_{i=1}^m x_i^{n_i}}{(t_2 - t_1)} \cdot P_{cp}^N} - 1 = \\ &= \frac{\int_{t_1}^{t_2} [p_{cp} + p_a \cdot \sin(\omega \cdot t)]^N dt}{P_{cp}^N \cdot (t_2 - t_1)} - 1 \end{aligned} \quad (20)$$

После вычисления определенного интеграла, находящегося в числителе уравнения (20), предварительно разложив подынтегральное выражение по биному Ньютона и приняв  $t_2 - t_1$  равной периоду колебаний  $T'$ , а  $\omega = 2 \cdot \pi / T'$ , получаем

$$\delta = \frac{\sum C_N^j \cdot p_{cp}^{N-j} \cdot \frac{p_a^j}{2}}{p_{cp}^N} - 1, \quad (21)$$

где  $C_N^j$  – биномиальный коэффициент, определяемый по формуле

$$C_N^j = \frac{N!}{j!(N-j)!}, \quad (22)$$

где  $N=1,2,3,4,\dots$  (целое положительное число);  $j=0,2,4,6,8,\dots \leq N$  (целое четное положительное число).

Относительный прирост скорости химической реакции, обусловленный колебаниями давления в зоне реагирования, согласно (21) равен:

– для реакций первого порядка ( $N=1$ ; зависимость  $W(p)$  – линейная)

$$\delta = \frac{p_{cp}}{p_{cp}} - 1 = 0 \quad (23)$$

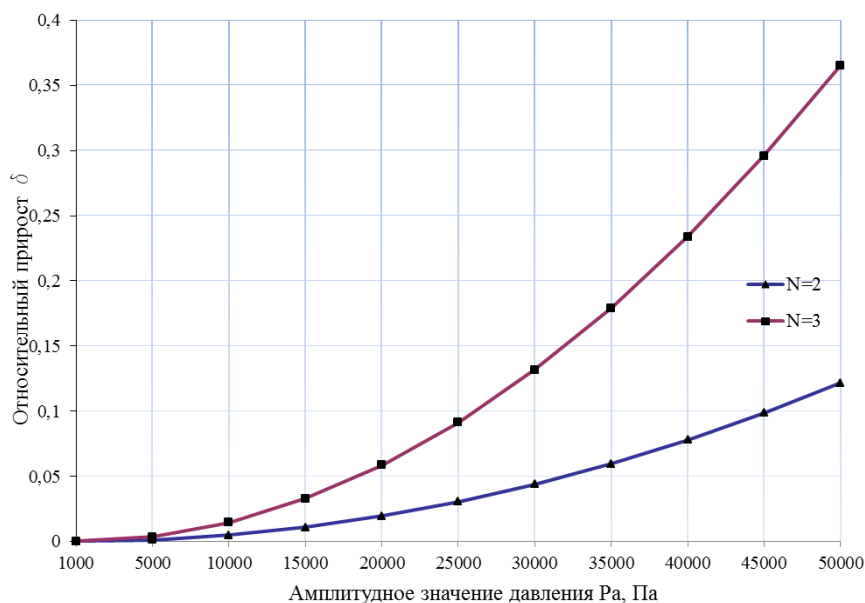
– для реакций второго порядка ( $N=2$ ; зависимость  $W(p)$  имеет вид параболы)

$$\delta = \frac{p_{cp}^2 + \frac{p_a^2}{2}}{p_{cp}^2} - 1 = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{p_a}{p_{cp}} \right)^2 \quad (24)$$

– для реакций третьего порядка ( $N=3$ ; зависимость  $W(p)$  имеет вид кубической параболы)

$$\delta = \frac{p_{cp}^3 + 3 \cdot p_{cp} \cdot \frac{p_a^2}{2}}{p_{cp}^3} - 1 = \frac{3}{2} \cdot \left( \frac{p_a}{p_{cp}} \right)^2 \quad (25)$$

На основании зависимостей (24–25) построен график, иллюстрирующий зависимость относительного прироста скорости реакции от амплитудного значения давления, для реакций 2-го и 3-го порядка, которые имеют место при сжигании топлив в пульсирующем потоке (рисунок 2).



**Рисунок 2** – Влияние амплитудного значения давления на увеличение скорости реакции

**Закключение.** На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы: 1. На величину относительного прироста скорости реакции при прочих равных условиях значительное влияние оказывает величина амплитуды переменного давления. 2. При колебаниях давления, возникающих при пульсирующем горении, скорость горения возрастает, а, следовательно, увеличивается теплонапряженность топочного объема, которая представляет собой тепловыделение в единицу времени с единицы объема. Данное обстоятельство можно отнести еще к одному достоинству пульсирующего горения. 3. Следовательно, режим пульсирующего горения можно использовать для обезвреживания газообразных отходов низких концентраций (например, для термического обезвреживания запахов).

#### Список цитированных источников

1. Правила установления нормативов и контроля выбросов дурнопахнущих веществ в атмосферу: ГОСТ 32673–2014. – Введ. 09.07.14. – М. : Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Стандартиформ, 2014. – 22 с.
2. Термические методы обезвреживания отходов / Г. П.Беспамятов [и др.] ; под общ. ред. К. К. Богушевой, Г. П. Беспамятова. – 2-е изд., доп. – Л. : Химия, 1975. – 175 с.
3. Pritz, B. Stability Investigation of Combustion Chambers with LES / B. Pritz, M. Gabi // *Advanced Fluid Dynamics* / Ed. by Hyoung Woo Oh. – Rijeka: InTech, 2012. – Ch. 9. – P. 183–204.
4. Vijayakrishnan, K. Understanding thermoacoustic instabilities in rocket engines. The Rijke tube as a prototypical example / K. Vijayakrishnan, N. Ananthkrishnan // *Seminar on advances in propulsion*. 21-22 november 2003. – Thiruvananthapuram: Liquid propulsion systems center, 2003. – P. 28–32.



5. Раушенбах, Б. В. Вибрационное горение / Б. В. Раушенбах. – М. : Гос. изд-во физико-математической литературы, 1961.– 500 с.
6. Физические основы рабочих процессов в камерах сгорания ВРД / Б. В. Раушенбах [и др.] ; под общ. ред. Б. В.Раушенбаха. – М. : Машиностроение, 1964. –347 с.
7. Технологическое пульсационное горение// В. А.Попов, В. С. Северянин, А. М. Аввакумов, В. Я.Лысков, Я. М.Щелоков/ Под ред. Попова В. А. – М. : Энергоатомиздат, 1993. – 320 с.
8. Красноперов, Л. Н. Химическая кинетика. – Новосибирск, 1988. – 106 с.
9. Сивухин, Д. В. Термодинамика и молекулярная физика. – М. : Наука, 1979. – 552 с.
10. Исакович, М. А. Общая акустика. – М. : Наука, 1973. – 495 с.
11. Хзмалян, Д. М., Каган, Я. А. Теория горения и топочные устройства. Под ред. Д. М. Хзмаляна. – М. : Энергия, 1976. – 488 с.

УДК 622.692.23.07

## **НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ РЕЗЕРВУАРОВ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

*Е. А. Пехота, А. А. Васильев, А. Н. Пехота*

УО «БелГУТ», Гомель, Республика Беларусь, delf\_1@mail.ru

### **Аннотация**

Представлены результаты исследований вертикальных резервуаров с учетом сроков эксплуатации и обеспечения технической надёжности резервуаров после технического диагностирования и выполненных ремонтно-восстановительных работ. Рассмотрены вопросы формирования, анализа и комплексного применения неразрушающих методов контроля и технологий ремонта, обеспечивающих эксплуатационную надёжность.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, вертикальный резервуар, неразрушающих методов контроля, техническая надёжность, техническая диагностика, дефекты.

## **NEW TECHNOLOGIES IN ENSURING THE OPERATIONAL RELIABILITY OF TANKS AND ENVIRONMENTAL SAFETY**

*E. A. Pekhota, A. A. Vasiliev, A. N. Pekhota*

### **Abstract**

The results of studies of vertical tanks are presented, taking into account the service life and ensuring the technical reliability of tanks after technical diagnostics and repair and restoration work performed. The issues of formation, analysis and complex application of non-destructive testing methods and repair technologies ensuring operational reliability are considered.

**Keywords:** Keywords: acoustic emission, vertical tank, non-destructive testing methods, technical reliability, technical diagnostics.