

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

- Северянин, В.С. Возможности использования солнечной энергии в Республике Беларусь / В.С. Северянин, А.Л. Тимошук // Вестник БрГТУ – 2007. – № 2.
- Северянин, В.С. Предложения лаборатории ПУЛЬСАР в области солнечной и ветровой энергетики // Вестник БрГТУ. – 2008. – № 2.
- Северянин, В.С. Об использовании солнечных энергоисточников // Вестник БрГТУ. – 2009. – № 2.
- Северянин, В.С. Особенности расчета оптической системы гелиоустановки ЛУЧ / В.С. Северянин, П.Ф. Янчилин // Вестник БрГТУ – 2010. – № 2.
- Северянин, В.С. Некоторые пути развития гелиотехники / В.С. Северянин, П.Ф. Янчилин // Вестник БрГТУ. – 2010. – № 2.

Материал поступил в редакцию 21.01.13

**SEVERYANIN V.S. Workings of laboratory PULSAR on nontradition energetic**

Some new elaborations are proposed for using of solar and wind energy. Peculiarities of those installations are described in order to apply in practice. This article continues the previons information about laboratory PULSAR.

УДК 534.142

**Новосельцева Д.В.**

**СУММАРНОЕ ДЕЙСТВИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА СКОРОСТЬ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ**

**Введение.** На основе процесса пульсирующего горения возможно создание высокоэффективных огневых устройств, в т.ч. для термического обезвреживания промышленных отходов. Пульсирующее горение – это неустойчивый режим горения с изменяющимися во времени динамическими характеристиками процесса, имеющими периодическую составляющую. Одними из таких характеристик являются давление и температура, колебания которых близки к гармоническим и могут быть описаны известными соотношениями [1]:

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

$$T(t) = T_{cp} + T_a \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad (2)$$

где  $p_{cp}$  – среднее значение давления (атмосферное), Па;

$p_a$  – амплитудное значение давления, Па;

$\omega$  – круговая частота пульсаций,  $c^{-1}$ ;

$T_{cp}$  – среднее значение температуры, К;

$T_a$  – амплитудное значение температуры, К.

Воздействие пульсаций давления и температуры по отдельности на кинетику реакции были рассмотрены в [2] и [3]. Однако колебания давления и температуры при пульсирующем горении газа возникают одновременно, поэтому важным вопросом является определение суммарного эффекта от действия нескольких аргументов на скорость химической реакции для оценки эффективности нестационарного топочного процесса по сравнению со стационарным.

Различают несколько видов суммарного действия различных аргументов [4]:

1. **Аддитивное действие (суммация)** – действие аргументов в комбинации суммируется. Суммарный эффект равен сумме эффектов действующих аргументов.

2. **Синергизм (потенцированное действие)** – усиление эффекта: один аргумент усиливает действие другого, т.е. действие больше, чем суммация.

3. **Антагонизм** – эффект комбинированного действия, менее ожидаемого при простой суммации: один аргумент ослабляет действие другого.

4. **Независимое действие** – комбинированный эффект не отличается от изолированного действия каждого аргумента. Преобладает эффект наиболее "сильного" аргумента.

**Воздействие пульсаций давления и температуры на макрокинетику реакций.** Выражение для определения скорости химической реакции, известное как закон действующих масс, можно записать в виде [3]:

$$W(T, p) = k_o \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T(t)}} \cdot \frac{p(t)^N}{R^N \cdot T(t)^N} \cdot \prod_{i=1}^m X_i^{a_i}, \quad (3)$$

где  $W$  – скорость химической реакции;

$k_o$  – предэкспоненциальный множитель;

$E_a$  – энергия активации – минимальное количество энергии, которое требуется сообщить системе, чтобы произошла реакция, Дж/моль;

$R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8,321 Дж/(мольК);

$p(t)$  – общее давление смеси, Па;

$T(t)$  – абсолютная температура, К;

$X_i$  – объемная или молярная доля  $i$ -го компонента газовой смеси;

$a_i$  – порядок реакции по данному компоненту;

$N$  – общий порядок реакции, определяемый следующим соотношением:

$$N = \sum_{i=1}^m a_i. \quad (4)$$

Формула (3) определяет изменение во времени мгновенного значения скорости реакции. Среднее ее значение для установившегося процесса, с учетом формул (1) и (2) может быть выражено в виде зависимости:

$$W_{cp}(T, p) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} k_o \cdot \prod_{i=1}^m X_i^{a_i} \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot [T_{cp} + T_a \cdot \sin(\omega \cdot t)]}} dt}{t_2 - t_1} \times \frac{[p_{cp} + p_a \cdot \sin(\omega \cdot t)]^N}{R^N \cdot [T_{cp} + T_a \cdot \sin(\omega \cdot t)]^N} \times \frac{1}{t_2 - t_1}. \quad (5)$$

Значение скорости реакции, соответствующее среднему значению температуры и давления, определим по выражению:

$$W(T_{cp}, p_{cp}) = k_o \cdot e^{-\frac{E_a}{R \cdot T_{cp}}} \cdot \frac{p_{cp}^N}{R^N \cdot T_{cp}^N} \cdot \prod_{i=1}^m X_i^{a_i}. \quad (6)$$

Оценить суммарный эффект от действия нестационарного давления и температуры на макрокинетику реакции можно путем построения графиков изменения мгновенного значения скорости химической реакции при пульсациях давления, при пульсациях температуры и при одновременном воздействии нестационарного давления и температуры, с нанесением среднего значения функции, а также значения функции при среднем значении аргумента для реакций 1-го, 2-го и 3-го порядка. Для этого воспользуемся формулами (3), (5) и (6), а также

формулами (16)–(18) [2] и (5)–(7) [3], задавая следующими параметрами:  $k_0=1$ ;  $E_a=100$  кДж/моль;  $p_a=20$  кПа;  $T_a=100$  К;  $p_{cp}=101,3$  кПа;  $T_{cp}=1500$  К;  $\prod X_i^{a_i}=1$ . Изменение каких-либо параметров не отразится на общей картине явления (рис. 1–3).

Обозначим абсолютный прирост скорости химической реакции, равный разности среднего значения функции и значения функции при среднем значении аргумента [5], при действии нестационарного давления  $\Delta p$ , при действии нестационарной температуры  $\Delta t$ , а при одновременных пульсациях давления и температуры  $\Delta t, p$ .

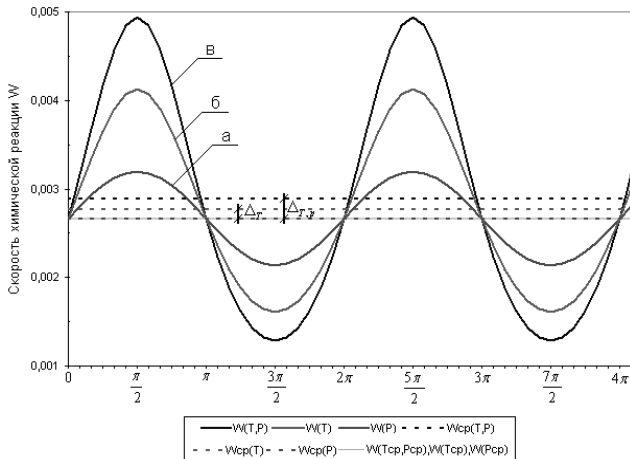


Рис. 1. Изменение мгновенного значения скорости химической реакции 1-го порядка во времени при пульсациях: а – давления, б – температуры, в – давления и температуры одновременно

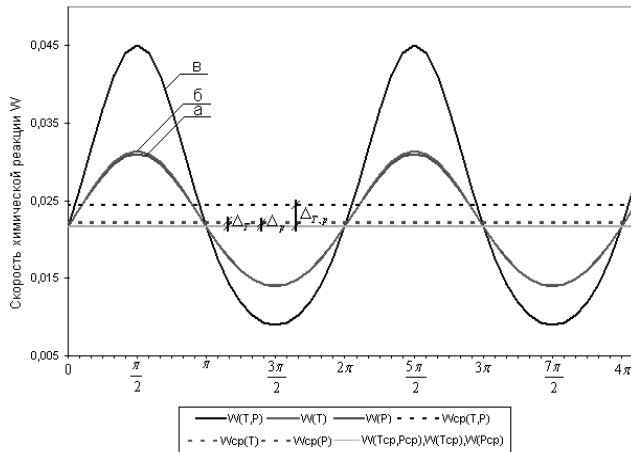


Рис. 2. Изменение мгновенного значения скорости химической реакции 2-го порядка во времени при пульсациях: а – давления, б – температуры, в – давления и температуры одновременно

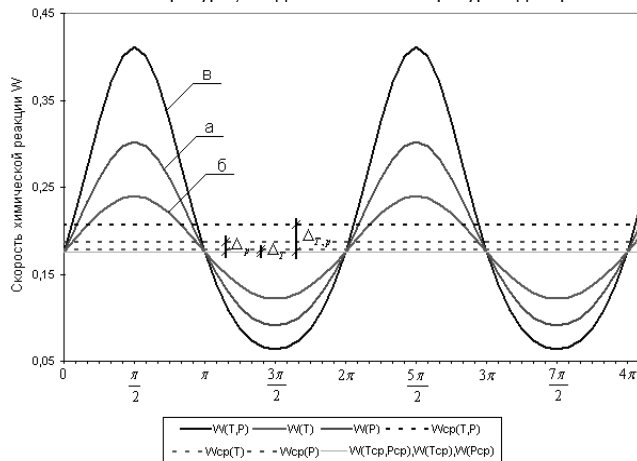


Рис. 3. Изменение мгновенного значения скорости химической реакции 3-го порядка во времени при пульсациях: а – давления, б – температуры, в – давления и температуры одновременно

Из рис. 1 видно, что  $\Delta t, p > \Delta t$ . Так как для реакций 1-го порядка  $\Delta p=0$  [2], то суммарное действие больше, чем суммация ( $\Delta t, p > \Delta t + \Delta p$ ). Следовательно, наблюдается потенцированное действие (синергизм). Нестационарное давление для реакций 1-го порядка играет роль фактора, усиливающего действие пульсаций температуры на скорость реакции. Аналогичное действие наблюдается и для реакций других порядков (см. рис. 2 и 3).

Выражение для относительного прироста функции, определяющего рост скорости химической реакции при пульсациях давления и температуры в зоне горения, имеет вид [5]:

$$\delta = \frac{W_{cp}(T, p) - W(T_{cp}, p_{cp})}{W(T_{cp}, p_{cp})} = \frac{W_{cp}(T, p)}{W(T_{cp}, p_{cp})} - 1, \quad (7)$$

а с учетом выражений (5) и (6):

$$\delta = \frac{k_0}{R^N} \cdot \prod_{i=1}^m X_i^{a_i} \cdot \int_{t_1}^{t_2} e^{\frac{E_a}{R(T_{cp} + T_a \sin(\omega t))}} \cdot \frac{[p_{cp} + p_a \cdot \sin(\omega t)]^N}{[T_{cp} + T_a \cdot \sin(\omega t)]^N} \cdot dt - 1 =$$

$$k_0 \cdot \frac{p_{cp}^N}{R^N \cdot T_{cp}^N} \cdot \prod_{i=1}^m X_i^{a_i} \cdot e^{\frac{E_a}{R T_{cp}}} \cdot (t_2 - t_1)$$

$$\int_{t_1}^{t_2} e^{\frac{E_a}{R(T_{cp} + T_a \sin(\omega t))}} \cdot \frac{[p_{cp} + p_a \cdot \sin(\omega t)]^N}{[T_{cp} + T_a \cdot \sin(\omega t)]^N} \cdot dt - 1,$$

$$= \frac{e^{\frac{E_a}{R T_{cp}}} \cdot \frac{p_{cp}^N}{T_{cp}^N} \cdot (t_2 - t_1)}{e^{\frac{E_a}{R T_{cp}}} \cdot \frac{p_{cp}^N}{T_{cp}^N} \cdot (t_2 - t_1)} - 1.$$

Разложив подынтегральное выражение формулы (8) в ряд Тейлора и произведя замену переменной, а соответственно и пределов интегрирования, получим следующее выражение для определения относительного прироста скорости химической реакции при одновременных пульсациях давления и температуры в зоне реагирования:

$$\delta = \frac{\int_0^{2\pi} \left( 1 + \sum_{n=1}^k \frac{\left( \frac{-E_a}{R} \right)^n}{n! \cdot (T_{cp} + T_a \cdot \sin \tau)^n} \right) \cdot \frac{[p_{cp} + p_a \cdot \sin \tau]^N}{[T_{cp} + T_a \cdot \sin \tau]^N} \cdot d\tau}{2\pi \cdot e^{\frac{-E_a}{R T_{cp}}} \cdot \frac{p_{cp}^N}{T_{cp}^N}} - 1. \quad (9)$$

Решая уравнение (9) численным методом при помощи математического пакета компьютерных программ Mathcad, автором были получены зависимости относительного прироста скорости химической реакции  $\delta$  от амплитудного значения давления при среднем значении температуры  $T_{cp}=1500$  К, амплитудных значениях температуры  $T_a=100$  К,  $T_a=200$  К,  $T_a=300$  К, энергии активации  $E_a=100$  кДж/моль,  $E_a=120$  кДж/моль,  $E_a=140$  кДж/моль для реакций 1-го, 2-го и 3-го порядка, представленные на рис. 4 и 5.

Анализируя рис. 4 и 5, можно сделать вывод о том, что на относительный прирост скорости химической реакции значительное влияние оказывают следующие величины:

- амплитуда переменной температуры; амплитуда переменного давления; энергия активации. При увеличении перечисленных величин относительный прирост скорости реакции увеличивается (рис. 4 и 5);
- порядок реакции. При небольших значениях амплитуды переменного давления относительный прирост скорости реакции выше для реакций 1-го порядка, при высоких – для реакций 3-го порядка. Величина амплитудного значения давления, при котором наблюдается равенство относительного прироста скорости химической реакции для реакций различных порядков, зависит от амплитуды переменной температуры (рис. 4) и не зависит от энергии активации (рис. 5). При увеличении амплитуды нестационарной температуры точка пересечения кривых относительного прироста скорости химической реакции для различных порядков реакции сдвигается в область высоких амплитудных значений нестационарного давления.

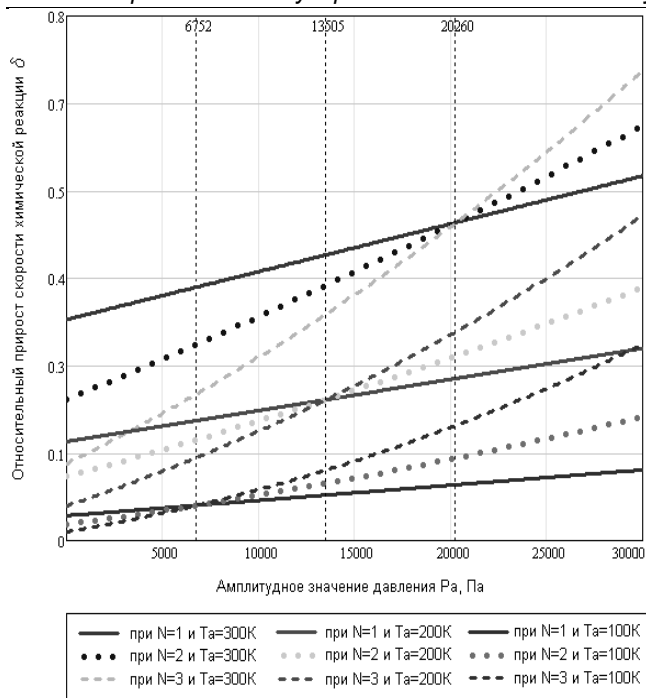


Рис. 4. Влияние амплитудного значения давления на увеличение скорости химических реакций 1-го, 2-го и 3-го порядка при  $T_{cp}=1500\text{ K}$  и  $T_a=100\text{ K}$ ,  $T_a=200\text{ K}$ ,  $T_a=300\text{ K}$

**Заключение.** На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Суммарное действие нестационарной температуры и давления на скорость химической реакции носит синергичный характер.
2. На скорость химической реакции при одновременных пульсациях температуры и давления влияют амплитудное значение температуры, амплитудное значение давления, энергия активации и порядок реакции.
3. При колебаниях давления и температуры, возникающих при пульсирующем горении, скорость горения возрастает. Следствием этого является увеличение теплонпряженности топочного объема и повышение эффективности сжигания, как метода термического обезвреживания промышленных отходов с низкой концентрацией загрязняющих веществ.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю профессору Северянину Виталию Степановичу за постановку задачи исследования, указания и рекомендации по расчетам, анализу результатов, выбору направления дальнейших научных поисков.

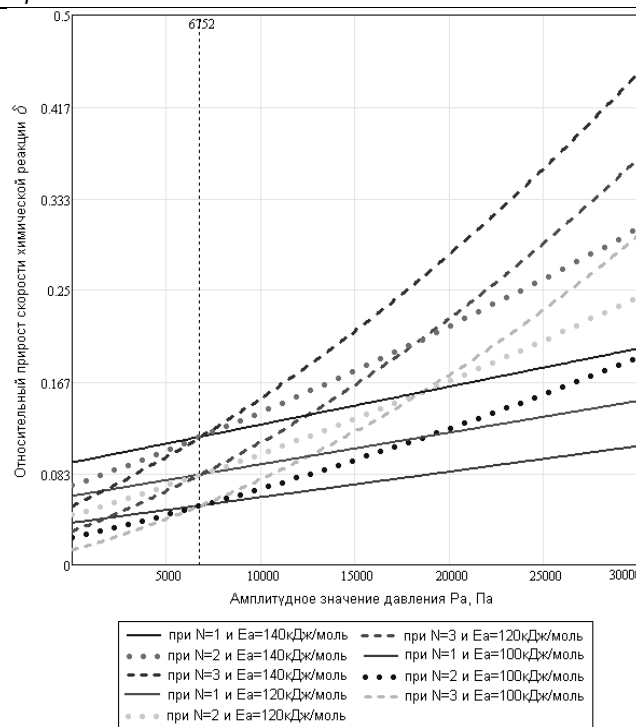


Рис. 5. Влияние амплитудного значения давления на увеличение скорости химических реакций 1-го, 2-го и 3-го порядка при  $T_{cp}=1500\text{ K}$ ,  $T_a=100\text{ K}$  и энергии активации  $E_a=100\text{ кДж/моль}$ ,  $E_a=120\text{ кДж/моль}$ ,  $E_a=140\text{ кДж/моль}$

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Технологическое пульсационное горение / В.А. Попов, В.С. Северянин, А.М. Аввакумов, В.Я. Лысков, Я.М. Щелоков / Под ред. В.А. Полова – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 320 с.
2. Новосельцева, Д.В. Анализ влияния изменения давления на физико-химические процессы взаимодействия компонентов при нестационарных режимах горения // Вестник БрГТУ. – 2012. – № 2: Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, геоэкология.
3. Новосельцева, Д.В. Влияние пульсаций температуры на макрокинетику реакций при термической очистке вентиляционных объектов сельского хозяйства // Механизация и электрификация сельского хозяйства: межвед. тематич. сб. – Мн.: РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», 2012. – № 46.
4. Жилин, Д.М. Теория систем. – М.: УРСС, 2004. – 183 с.
5. Северянин, В.С. Оценка эффективности нестационарных топочных процессов // Вестник БГТУ. – 2003. – №2(20): Водохозяйственное строительство. Теплоэнергетика. Экология. – С. 33–36.

Материал поступил в редакцию 13.03.13

**NOVOSELTSEVA D.V. Total action of non-stationary pressure and temperatures for speed of chemical reaction**

Influence of simultaneous fluctuations of pressure and temperatures for speed of chemical reaction is analysed at pulsing burning. Dependences of a relative gain of speed of reactions of the first, second and third order on peak value of pressure, peak value of temperature and energy of activation are received.

УДК 621.311.25, 620.9

Янчилин П.Ф.

**ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОНЦЕНТРАТОРА ГЕЛИОУСТАНОВКИ “ЛУЧ”**

**Введение.** В Беларуси уровень солнечной освещенности достаточен для развития и применения в народном хозяйстве устройств, улавливающих солнечную энергию и преобразующих её в другие виды энергии. При проектировании гелиосистем необходимо знать количество солнечной энергии, поступающей на наклонную поверх-

ность, нормально ориентированной к падающим лучам, т.к. среднесуточный приход прямой солнечной радиации на такую теплопринимающую поверхность увеличивается на 28-30% по сравнению с приходом на горизонтальную поверхность [1].

Серьезным препятствием на пути эффективной реализации вы-

Янчилин П.Ф., аспирант Брестского государственного технического университета. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.