

УДК 62-623:537.523.2

**Ковалишин Б.М.***Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины*

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТОПЛИВНЫХ УСТАНОВОК ПУТЕМ ЭЛЕКТРОАКТИВАЦИИ МОЛЕКУЛ-РЕАГЕНТОВ РЕАКЦИИ ГОРЕНИЯ

Теоретично та експериментально обґрунтовано підвищення енергоефективності паливних установок за рахунок активації молекул-реагентів високовольтним нерівномірним електричним полем.

Теоретически и экспериментально обосновано повышение энергоэффективности топливных установок за счет активации молекул-реагентов высоковольтным неравномерным электрическим полем.

In theory and experimentally the rise of energy efficiency of fuel equipments due to activating of molecules-reagents by the high-voltage uneven electric field is grounded.

$b$  – коэффициент использования внешней энергии;

$e$  – основание натуральных логарифмов;

$E_A$  – энергия активации;

$E_{AT}$  – тепловая энергия активации;

$E_{AB}$  – энергия активации от внешних источников;

$E_0$  – начальная напряженность электрического поля;

$h$  – расстояние между электродами;

$I_k$  – ток в междуэлектродной цепи;

$k_0$  – предэкспоненциальная константа;

$k$  – константа скорости реакции;

$r$  – радиус кривизны острия игольчатого электрода;

$R$  – газовая постоянная,  $R = 1,987$  кал/град·моль;

$t$  – время, за которое 1 моль газа протекает через активационную систему;

$T$  – температура в градусах шкалы Кельвина;

$U_0$  – начальное напряжения на электродах;

$W$  – энергия от внешних источников;

$\beta_B$  – относительное удельное сопротивление воздуха.

**Постановка проблемы.** Топливо-энергетические ресурсы в наше время являются основным определяющим и, в то же время, лимитирующим развитие практически всех отраслей экономики, фактором. На фоне критического истощения разведанных запасов углеводородных энергоносителей и не слишком большой перспективы по их прогнозным запасам [1], повышение эффективности энергогенерирующих установок актуально и своевременно. Особенно это относится к постсоветским странам, экономики которых отличаются существенно большей энергозатратностью по сравнению со странами Евросоюза, США и, особенно, Японии [2]. Кроме экономического эффекта при повышении энергоэффективности топливных установок увеличиваются сроки использования традиционных углеводородных энергоносителей, уменьшается отрицательная нагрузка на экологическое состояние окружа-

ющей среды.

Основное количество тепловой и других видов энергии получают путем сжигания традиционных и подавляющего большинства нетрадиционных энергоносителей в окислительной газовой среде. Процесс горения представляет собой экзотермическую окислительно-восстановительную химическую реакцию. Поэтому, при получении тепловой энергии важнейшей задачей становится оптимизация протекания этих химических реакций.

**Объектом наших теоретических и экспериментальных исследований** является оптимизация процесса экзотермических реакций горения путем активации молекул-реагентов.

**Предмет исследований** – технические и технологические режимы, оборудование для оптимизации реакции горения газообразных углеводородных топлив в воздухе путем действия на них электрическим полем высокого

напряжения.

**Цель работы** – теоретическое и экспериментальное обоснование повышения эффективности протекания экзотермических реакций горения на примере сжигания углеводородного газообразного топлива в воздухе под воздействием неравномерного электрического поля высокого напряжения.

### *Изложение основного материала*

**Теоретические исследования.** Основная энергетическая характеристика топлива – теплопроизводительность (теплотворная способность). В справочной литературе и теплотехнических расчетах используется преимущественно низшая теплопроизводительность топлива [3].

Так как процессы теплогенерирования связаны с окислительно-восстановительными экзотермическими реакциями горения, то для оптимизации их следует рассматривать с точки зрения теории химической кинетики.

Для современной теории химической кинетики основным вопросом является зависимость реакционных свойств химической системы от внутренней энергии ее компонентов, атомно-молекулярного состава и строения реагентов.

Характеризует возможность протекания химических реакций между молекулами-реагентами закон Аррениуса [4]. Этот закон связывает константу скорости реакции с энергией активации молекулы ( $E_A$ ) и записывается в виде:

$$k = k_0 \cdot e^{-E_A/(RT)}, \quad (1)$$

где  $k_0$  – предэкспоненциальная константа;  
 $R$  – газовая постоянная,  $R = 1,987$  кал/град·моль;  
 $T$  – температура в градусах шкалы Кельвина;  
 $e$  – основание натуральных логарифмов.

В формуле (1) – характеризует воздействие на молекулярную систему внешней среды, а  $E_A$  – энергетическое состояние молекулы.

После логарифмирования обеих частей уравнения (1) получим формулу:

$$\ln k = \ln k_0 - E_A/RT. \quad (2)$$

Уравнение (2), выраженное через десятичные логарифмы, примет вид:

$$\lg k = \lg k_0 - E_A/4,575T, \quad (3)$$

где число  $1/4,575$  – коэффициент перевода натуральных логарифмов в десятичные, умноженный на величину  $1,987$ .

Из уравнения (3) можно определить энергию активации молекулы по формуле:

$$E_A = (\lg k_0 - \lg k)4,575T. \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что зависимость энергии активации молекул от температуры имеет прямо пропорциональный характер.

Полная энергия молекулы состоит из электронной, колебательной и вращательной составляющих. Наибольший вклад в общую энергию молекулы вносят электроны. Величина колебательной энергии приблизительно на порядок меньше электронной составляющей. Также на порядок меньше, чем колебательная энергия, величина вращательной энергии [5].

Процесс активации молекулярной системы заключается в переводе электронов на более высокий энергетический уровень.

На рис. 1 приведена энергетическая диаграмма молекулы. На диаграмме стационарные энергетические уровни изображены штрих-пунктирными линиями, уровни возбуждения – штриховыми. Точечная пунктирная прямая соответствует уровню ионизации молекулы. Ионизированные атомы и молекулы обладают несколько иными физико-химическими свойствами, чем нейтральными.

В соответствии с нашей рабочей гипотезой для возбуждения молекул-реагентов, кроме тепловой энергии ( $E_{AT}$ ), можно использовать и другие виды энергии ( $E_{AB}$ ) от внешних источников. Дополнив формулу (4) эффектом действия на молекулы-реагенты другими факторами получим:

$$E_A = E_{AT} - E_{AB} = [(\lg k_0 - \lg k)4,575T] - Wb, \quad (5)$$

где  $W$  – энергия от внешних источников,

$q_e U_n$	.....	}	Уровень ионизации
$q_e U_{вр2}$ $q_e U_{эм1}$ $q_e U_{вр1}$	----- ----- -----	}	Уровни возбуждения
$q_e U_i$ ..... $q_e U_1$	----- ----- -----	}	Стационарные уровни

Рис. 1. Энергетическая диаграмма молекулы.

$b$  – коэффициент использования внешней энергии.

Из формулы (5) видно, что тепловая энергия активации может быть уменьшена за счет использования других внешних источников активации молекул.

В качестве источников внешней энергии для активизации молекул-реагентов можно, например, использовать ультрафиолетовое облучение, электромагнитное воздействие, облучение потоком заряженных частиц и другие. Под воздействием потока электромагнитного и инфракрасного лазерного излучения достигали инициализации веществ и увеличения их реакционной способности [6]. В [7,8] отмечается положительное влияние неоднородного стационарного электрического поля на протекание реакции горения.

Наиболее приемлемым способом активации молекул-реагентов реакции горения, с нашей точки зрения, является их активация в электрическом поле высокой напряженности.

Для создания высокой напряженности электрического поля целесообразно использовать игольчатую электродную систему. Начальные значения напряженности электрического поля и напряжения на электродах определяются по эмпирическим формулам [9]:

$$E_0 = 31 \cdot \rho_{II} \cdot (1 + 0,308/(\rho_{II} \cdot r)^{0,5}), \quad (6)$$

$$U_0 = 0,82 \cdot E_0 \cdot r \cdot \ln(2h/r), \quad (7)$$

где  $\rho_{II}$  – относительное удельное сопротивление воздуха;

$r$  – радиус кривизны острия игольчатого электрода, см;

$h$  – расстояние между электродами, см.

Ограничивающим условием применения формул (6) и (7) есть требование, чтобы  $h > 15 r$ .

Энергию активации молекул в поле высокого напряжения можно найти по формуле:

$$W = I_K \cdot U_0 \cdot t, \quad (8)$$

где  $I_K$  – ток в междуэлектродной цепи,

$t$  – время, за которое 1 моль газа протекает через активационную систему.

Используя формулы (6), (7) и (8) получим зависимость энергии активации молекул от параметров активирующей высоковольтной системы:

$$E_A = [(\lg k_0 - \lg k)4,575T] - 0,82 \cdot I_K \cdot b \cdot t \cdot [31 \cdot \rho_{II} \cdot (1 + 0,308/(\rho_{II} \cdot r)^{0,5}) \cdot r \cdot \ln(2h/r)]. \quad (9)$$

Из формулы (9) следует, что затраты тепловой энергии на активацию молекул, могут быть снижены на величину эффективной энергии активации от внешнего источника. Можно утверждать, что на такую же величину будет увеличена полезная тепловая энергия при сжигании такого же количества топлива. Это свидетельствует о том, что теплотворная способность топлива повышается при активации молекул-реагентов реакции горения. Также можно утверждать, что применение системы электроактивации молекул-реагентов в неравномерном электрическом поле высокой напряженности повышает энергетическую эффективность топливной установки. Энергетические параметры поля должны обеспечивать перевод молекул со стабильных энергетических уровней на возбужденные уровни, которые могут быть резонансными или метастабильными (см. рис. 1) [10].

На резонансных уровнях  $q_e U_{вр1}$  и  $q_e U_{вр2}$  молекула находится довольно непродолжительное время ( $\sim 10^{-8}$  с) [11], которого, в большинстве случаев, недостаточно для транспортировки к месту сжигания. За это время проис-

ходит релаксация молекул, то есть они возвращаются на стационарные энергетические уровни, и ожидать от них повышения энергетической эффективности не приходится. Поэтому перевод молекул на резонансные уровни возбуждения можно считать неэффективным с точки зрения замещения части активационной тепловой энергии другим видом энергии.

На метастабильных уровнях возбуждения время релаксации молекул как минимум на несколько порядков выше, чем на резонансных уровнях. Оно может составлять  $10^{-4} \dots 10^{-2}$  с и больше [12]. Такого времени может вполне хватить для транспортировки активированных молекул от места активации до места сжигания. Поэтому, для обеспечения реакции горения активированными молекулами восстановителя и окислителя их необходимо переводить на метастабильные энергетические уровни с временем релаксации, соизмеримым и большим времени транспортирования от места активации до места сжигания.

**Экспериментальные исследования.** Из всех перечисленных способов активации молекул-реагентов экзотермической окислительно-восстановительной реакции горения для исследования нами выбрана электроактивация молекул в поле высокой напряженности. В качестве восстановительной компоненты выбрано углеводородное топливо (сжиженный газ пропан и природный газ), в качестве окислителя – кислород воздуха.

Разработанная экспериментальная установка обеспечивает проведение исследования воздействия высоковольтного пульсирующего неравномерного электрического поля (ВПНЭП) на окислитель и топливо при сжигании пропана и природного газа. Функциональная схема экспериментальной установки приведена на рисунке 2. Опишем работу экспериментальной установки. Отдельными каналами газообразные топливо (газ пропан или природный газ) и окислитель (кислород воздуха) поступают в газовую горелку. На пути к горелке окислитель в электродной системе 1 и топливо в электродной системе 2 подвергаются активационному воздействию высоковольт-

ного пульсирующего неравномерного электрического поля, полученного от генераторов ВПНЭП. Генератор ВПНЭП состоит из генератора звуковой частоты ГЗ-112 и катушки зажигания Б-117А-11. Генераторы звуковой частоты используются для генерирования синусоидальных и прямоугольных сигналов в диапазоне 10 Гц...10 МГц с амплитудным напряжением 5 В для синусоидального сигнала и 10 В – для сигнала прямоугольной формы. Катушки зажигания имеют коэффициенты трансформации  $k_{тр} = 70$ . Используя сигнал прямоугольной формы звукового генератора с резкими фронтами, на выходах генераторов ВПНЭП, из-за высокой ЭДС самоиндукции, амплитудное напряжение импульсных сигналов достигает 8 кВ. Осциллограммы импульсных электрических сигналов приведены на рисунке 3.

Каждая из электродных систем состоит из корпуса, изготовленного из диэлектрического материала и имеющего входные и выходные отверстия; общего электрода, выполненного в виде металлической пластины; игольчатых электродов, размещенных перпендикулярно к общему электроду. Переключатели SA1 - SA4 служат для выбора режимов работы экспериментальной установки.

В первом эксперименте проводилось исследование эффективности сжигания пропана в воздухе под воздействием на молекулы-реагенты реакции горения электрического поля высокой напряженности. Частота импульсов электрического поля в эксперименте изменялась в диапазоне 0...200 Гц. Эффективность действия импульсного электрического поля разной частоты на молекулы-реагенты оценивались по времени нагрева 0,7 л воды от 20 до 40 °С. Варианты исследования были следующими:

1. Без выпрямления.
2. С выпрямлением – на электродную систему 1 подается импульсное преимущественно отрицательное напряжение, а на электродную систему 2 – импульсное преимущественно положительное напряжение (– - на воздух, + - на пропан).
3. С выпрямлением (+ - на воздух, + - на пропан).
4. С выпрямлением (+ - на воздух, – - на пропан).

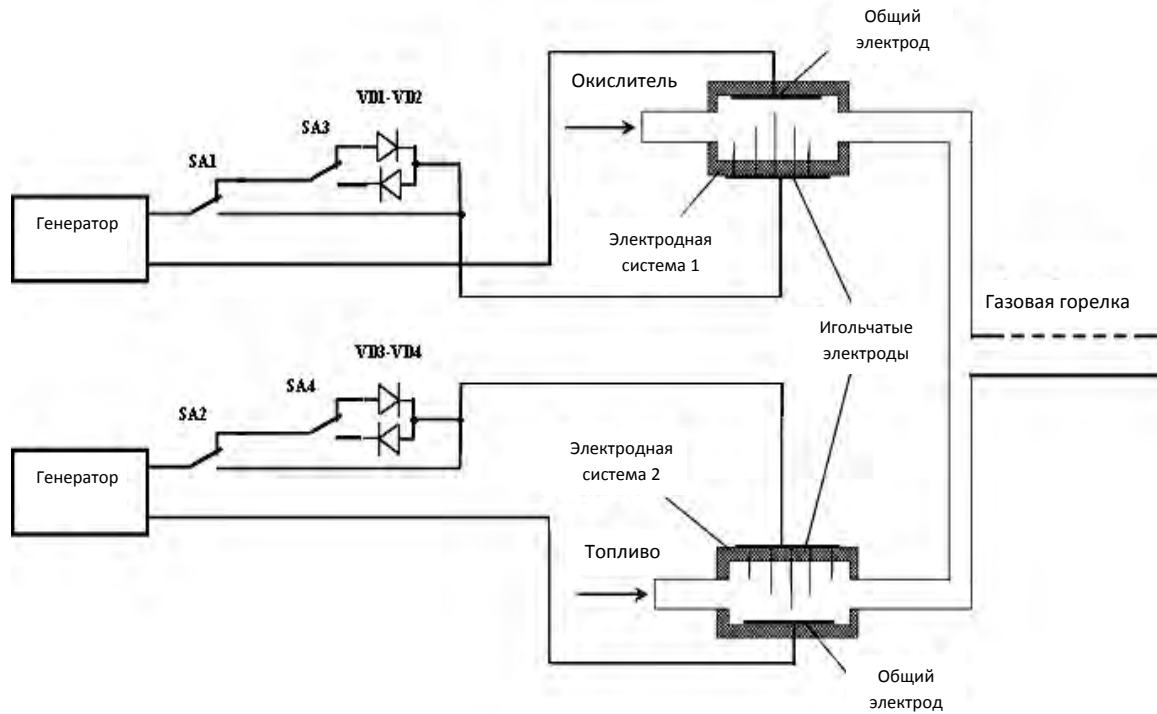


Рис. 2. Функциональная схема экспериментальной установки.

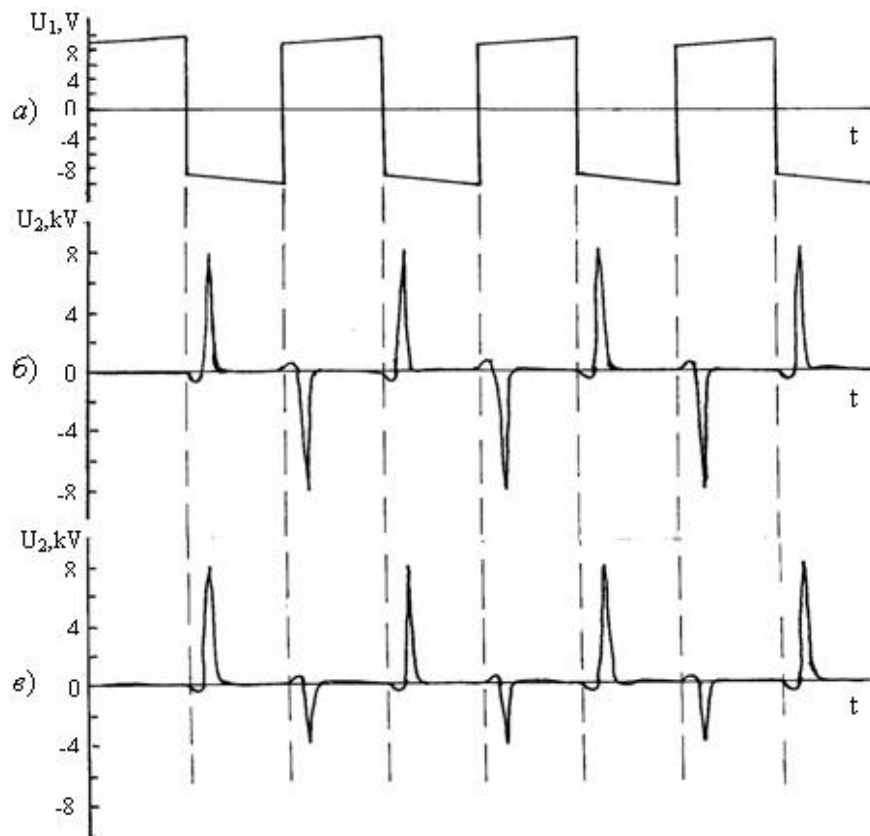


Рис. 3. Осциллограммы входного сигнала (а) и выходных сигналов генератора ВПНЭП без выпрямления (б) и с выпрямлением (в).

5. С выпрямлением (— - на воздух, — - на пропан).  
 6. С выпрямлением (+ - на воздух), пропан - без выпрямления.

Результаты эксперимента по перечисленным вариантам сжигания пропана в воздухе показаны на рисунке 4.

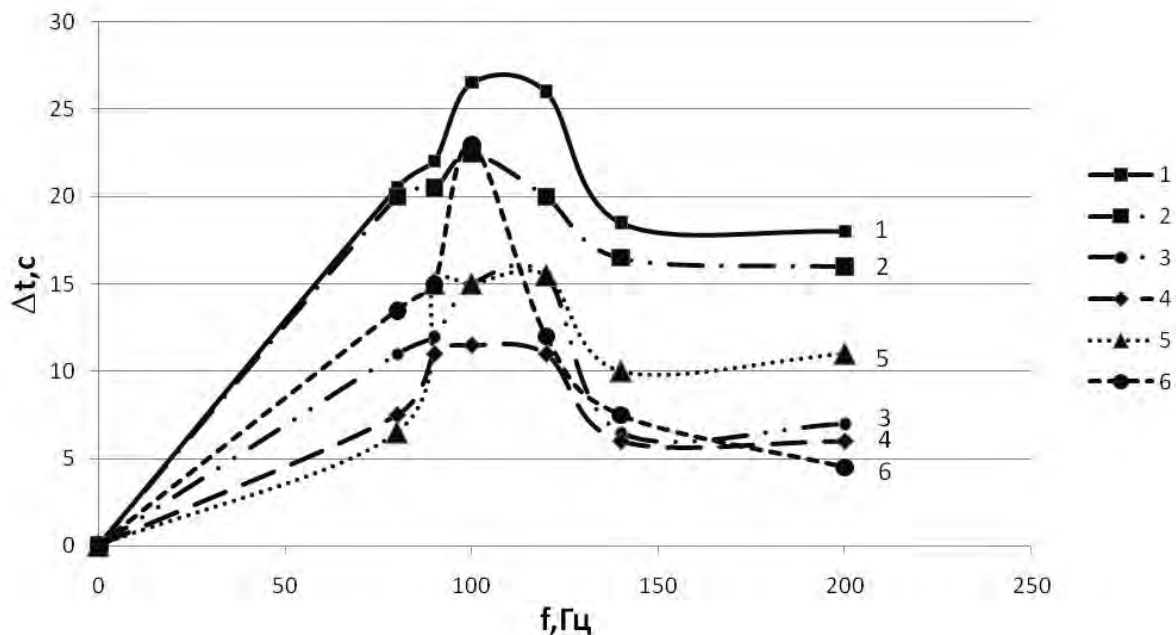
Результаты, полученные в первом эксперименте, свидетельствуют о существенном сокращении времени нагрева воды при электроактивации воздуха и пропана в электрическом поле высокой напряженности практически во всех вариантах опыта. В первом эксперименте рассчитанная  $НСР_{0,05} = 3,31$ . Для всех вариантов исследования максимум снижения времени нагрева воды отмечен при использовании импульсов с частотой 100...120 Гц. Наибольший положительный эффект (снижение времени нагрева на 22,1...19,0 %) наблюдали в указанном диапазоне частот для варианта с подачей на электродные системы импульсов высокого напряжения без выпрямления.

Во втором эксперименте проводилась оценка эффективности сжигания активированных молекул природного газа и воздуха. Эффективность воздействия импульсного электрического поля на молекулы природного газа и

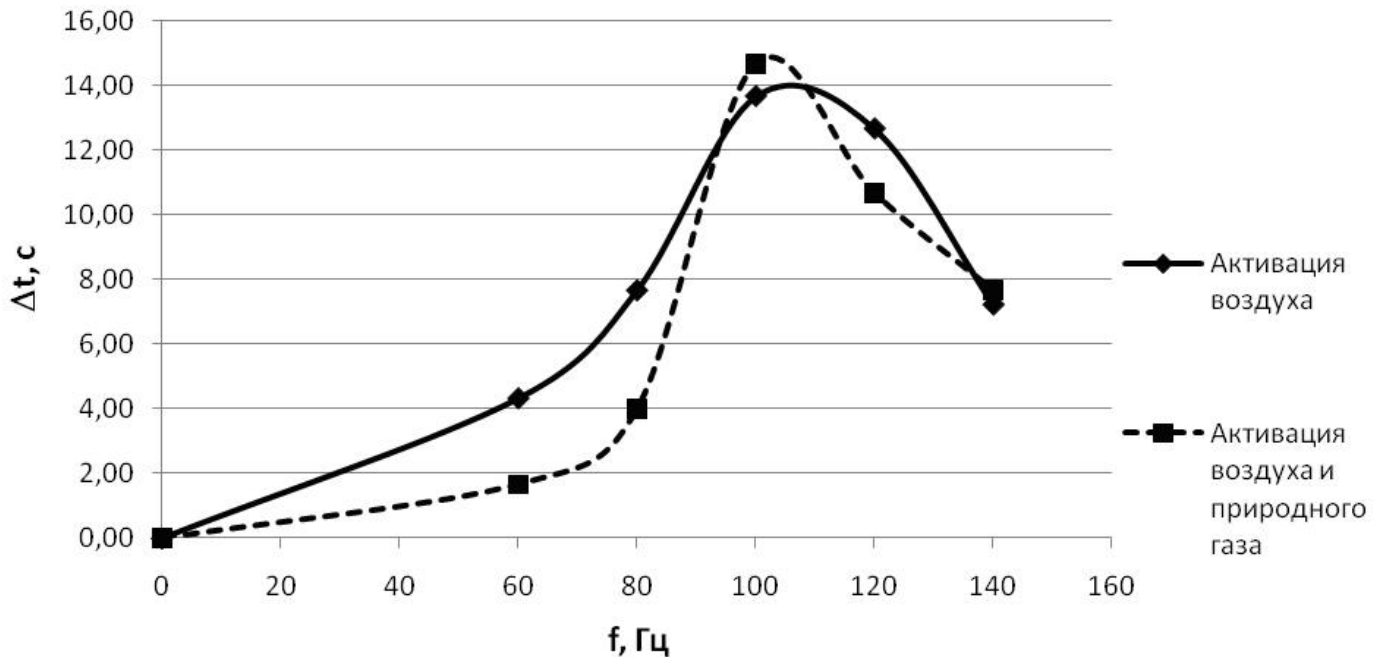
воздуха также оценивалась по времени нагрева 0,7 л воды от 20 до 40 °С. В одном варианте этого эксперимента исследовалась активация одного только воздуха, во втором варианте – одновременная активация воздуха и природного газа. Повторность эксперимента трёхкратная.

Результаты эксперимента по сжиганию активированного природного газа в активированном воздухе показаны на рисунке 5.

Полученные во втором эксперименте результаты показывают, что активация высоковольтным пульсирующим напряжением компонентов экзотермической реакции горения природного газа в воздухе сокращает время нагрева воды в обоих вариантах исследования. Активация воздуха импульсами с частотой следования 100 Гц приводит к сокращению времени нагрева воды на 11,1 %. Одновременная активация пропана и воздуха сокращает время нагрева воды на 12 %. Рассчитанная для второго эксперимента  $НСР_{0,05} = 2,46$  свидетельствует о несущественности различий между вариантами эксперимента практически на всём исследуемом диапазоне частот высоковольтного пульсирующего неравномерного электрического поля. Эту несущественность различий можно объяснить тем,



**Рис. 4. Зависимости величин снижения времени нагрева воды от частоты импульсов для различных вариантов электроактивации пропана и воздуха.**



**Рис. 5. Зависимости величин снижения времени нагрева воды от частоты импульсов при электроактивации природного газа и воздуха.**

что в варианте с одновременной активацией обеих компонент реакции горения эффективной была лишь активация воздуха, а вклад в общую эффективность реакции горения природного газа был незначительным. Отсюда можно сделать вывод, что используемые в эксперименте параметры электрического поля не позволили в достаточной мере осуществить активацию молекул природного газа, а именно метана, как основной его составляющей. Поэтому, необходимо продолжить исследования по обоснованию параметров высоковольтного пульсирующего неравномерного электрического поля на молекулы-реагенты реакции горения природного газа в воздухе.

### Выводы

1. Активация молекул-реагентов реакции горения газообразных углеводородных энергоносителей в воздухе высоковольтным пульсирующим неравномерным электрическим полем приводит к уменьшению расхода топлива.

2. Наибольшая эффективность применения электроактивации (до 22 %) обнаружена при сжигании пропана в воздухе на частоте электрического поля 120 Гц и активации обеих ком-

понент реакции горения.

3. Необходимо продолжить исследования по электроактивации молекул-реагентов реакции горения природного газа в воздухе.

4. В перспективе – использование предлагаемого способа и оборудования для повышения эффективности топливных установок разных типов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Гуков Я.С.* Використання відновлюваних джерел енергії в сільському господарстві (наукова доповідь). – ННЦ „ІМЕСГ”. – 2005. – 24 с.
2. *Праховник А.В.* Энергетичний менеджмент: Навчальний посібник / А.В.Праховник, В.П.Розен, О.В.Разумовський та ін. – К.: Нот.ф.ка, 1999.– 184 с.
3. *Корчемний М.* Энергозбереження в агропромисловому комплексі / М. Корчемний, В. Федорейко, В. Щербань.– Тернопіль.: Підручники і посібники, 2001.– 976 с.
4. *Физическая химия.* / Под ред. К.С. Краснова. М.: Высшая школа, 2001.– Кн. 1.– 512 с; кн. 2, – 319 с.
5. *Китайгородский А.И.* Введение в физику. М.: Наука, 1973.– 688 с.

6. *Багратишвили В.Н.* Многофотонные процессы в молекулах в инфракрасном лазерном поле / В.Н. Багратишвили, В.С. Летохов, А.А. Макаров. – М.: – 1988. – 245 с.

7. *Шкляр В.С.* Патент України № 24193. Спосіб підготування окислювача до спалювання та пристрій для його здійснення / В.С. Шкляр, О.В. Овсій. – Бюл. № 5, 1998.

8. *Мальцев В.О.* Патент України № 52845. Пристрій підготовки окислювача до спалення палива / В.О. Мальцев, В.М. Кушнір, В.А. Педос, М.М. Ніколаєв. – Бюл. № 1, 2003.

9. *Кудрявцев И.Ф.* Электрический нагрев и электротехнология / И.Ф. Кудрявцев, В.А. Карасенко. – М.: изд-во “Колос”. – 1975. – 384 с.

10. *Физическая энциклопедия.* В 5-ти томах. Главный редактор А.М. Прохоров. – М.: Советская энциклопедия, 1988.

11. *Каганов И.Л.* Ионные приборы. – М.: «Энергия». – 1972, 528 с.

12. *Кацов Н.А.* Электроника. – М.: «Гостехиздат». – 1954, 470 с.

*Получено 30.03.12 г.*