

---

## ВОСПЛАМЕНЕНИЕ КАПЕЛЬ СОАПСТОКА РАПСА

**Гусев В.Н.**

*Херсонская государственная морская академия*

**Кулик М.И.**

*Национальный университет имени В.Н. Каразина, г Харьков*

*В работе рассмотрен вопрос о воспламенении капли – переход от испарения к устойчивому горению единичной капли соапстока рапса, проведено исследование о возможности использования соапстока, как самостоятельного топлива, или как добавки в топливо, традиционно применяемого в теплоэнергетических установках.*

*Ключевые слова: капля, воспламенение, топливо, топочная камера, период индукции, энергия активации.*

**Введение.** В связи с повышенной необходимостью экономии энергии в Украине и, в частности, топлива, получаемого из нефти, ведутся исследования в области поиска новых видов топлив не нефтяного происхождения, или так называемых альтернативных топлив, желательно чтобы эти топлива были из возобновляемых источников, для всех видов энергетических установок.

Наиболее интенсивно исследовательские и экспериментальные работы ведутся в направлении использования в энергетических установках биотоплива, к ним относится топливо на основе растительных жиров.

Отметим, что при производстве некоторых видов биотоплива – биодизеля, рафинированных растительных масел, например рапсового масла, образуются значительные объемы жидких отходов – соапстоков – горючих жидкостей, а, следовательно, появляется вопрос: возможно ли использования соапстока рапса, как самостоятельного топлива, или как добавку в топливо, традиционно применяемого в теплоэнергетических установках?

Для понимания особенностей протекания рабочего процесса в камерах сгорания разработки конструкций топочной камеры и обоснования требований к качеству топлив, а также правильного решения ряда практических вопросов применения топлив, необходимо изучение основных закономерностей, в частности определяющих воспламенение топлив.

Поскольку в топочной камере горение факела распыленного жидкого топлива определяется в значительной мере движением и горением отдельных капель и условиями их взаимодействия, поэтому в ряде работ [1-4] уделяется большое внимание исследованию простейшего случая – сжиганию единичной капли топлив для всех видов энергетических установок. Отметим, что этот казался бы простейший случай – весьма сложен. Ход процесса зависит от гидродинамических факторов, температуры и состава окружающей среды, кинетических условий. При обтекании капель газовым потоком тепло- и массообмен не одинаков по поверхности капель. Кроме того, перенос паров и изменение плотности газа из-за горения и теплообмена влияют на условия обтекания.

Вопрос о воспламенении капли – переход от испарения к устойчивому горению единичной капли новых жидких видов альтернативных топлив, из возобновляемых источников для энергетических установок на сегодняшний день изучен недостаточно, поэтому **актуальность данной работы** в области физики горения не вызывает сомнения.

**Цель данной работы** – провести исследования по воспламенению капли соапстока рапса и возможности использования соапстока рапса, как самостоятельного топлива, или как добавку в топливо, традиционно применяемого в теплоэнергетических установках.

Чтобы выявить общие закономерности процесса воспламенения капли соапстока рапса и получить полезную информацию о сравнительных характеристиках горения топлив, необходимо решить **ряд задач**: создать современные экспериментальные установки, разработать методы оценки воспламеняемости единичных капель горючих жидкостей в потоке воздуха, провести теоретико-экспериментальные исследования.

Изложение основного материала. **Для понимания особенностей протекания рабочего процесса в камерах сгорания разработки конструкций топочной камеры и обоснования требований к качеству топлив, а также правильного решения ряда практических вопросов применения топлив, необходимо изучение основных закономерностей, в частности определяющих воспламенение топлив, в данном случае воспламенение капли соапстока.**

Как известно, воспламенение капли происходит лишь тогда, когда над ее поверхностью образовывается горючая смесь из паров жидкости и воздуха, параметры которой (концентрация и температура) соответствуют условиям воспламенения данной жидкости.

Температура, при которой происходит переход от режима испарения к режиму устойчивого горения капли – температура воспламенения.

При любом механизме процесса воспламенения появлению пламени предшествует период относительно медленного нарастания скорости реакции, соответствующей разогреванию горючей смеси в условиях медленного повышения температуры при тепловом воспламенении. Этот период называется периодом задержки (индукции) воспламенения.

Температура воспламенения и период индукции воспламенения являются важнейшими параметрами, характеризующими воспламеняемость топлива. Однако обе эти величины не являются физическими константами, так как зависят не только от свойств топлива, но и от состава смеси, начальных значений давления и температуры, условий теплообмена, размеров и материала аппаратов, в которых происходит воспламенение, а также мощности источника зажигания (при принудительном воспламенении).

Таким образом, **основной задачей**, стоящей перед теорией воспламенения капли жидкого топлива, является определение: температуры воспламенения; времени задержки (индукции) воспламенения; радиуса

воспламенения – расстояния от капли, которое характеризует возникновение очага воспламенения.

К сожалению, исследователи в большинстве случаев определяют не все из перечисленных характеристик воспламенения капли, а только некоторые из них.

Для проведения экспериментов авторами под руководством профессора Селиванова С.Е. в Херсонской государственной морской академии создана установка позволяющая исследовать кинетику воспламенения горючих жидкостей в потоке нагретого воздуха.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 1, а ее фрагмент на рис. 2.



Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки по определению воспламеняемости неподвижной (подвешенной) капли жидкого топлива в потоке воздуха



Рис. 2. Фрагмент експериментальної установки по визначенню воспламеняемости неподвижной (подвешенной) капли жидкого топлива в потоке воздуха

Методика проведення досліджень зводиться до визначення показателів воспламенения і горіння капли. Для проведення експериментальних досліджень включається установка, задається визначена температура нагріву трубчатих електричних печей, а з допомогою повітряної машини створюється необхідна стабілізована швидкість потоку повітря в трубці печей з виходом з сопла Витошинського. Для контролю швидкості потоку нагрітого повітря на виході з сопла Витошинського застосовується датчик масового витрату повітря термоанемометричного типу підключеного до вольтметра. Зная показання по шкалі вольтметра і використовуючи таблицю визначається витрата повітря, а враховуючи вихідне сечення сопла Витошинського визначається швидкість нагрітого потоку повітря. Після визначення швидкості нагрітого потоку повітря і встановленої заданої температури повітря, для проведення експерименту, потік повітря перекривається захисним екраном. Капля досліджуваної рідини підвішується на спеціальному підвесі, відводиться захисний екран і капля розміщується точно по осі нагрітого потоку повітря з П-образним профілем швидкості, який створюється на виході сопла Витошинського, і в цей же момент з допомогою геркона замикається електрична ланка, включається схема реєструючого блоку (періоду індукції). Після проведення експериментів по воспламенению і горінню капли рідини підвес виводиться з потоку повітря, на місце капли стає шарик термопары і повторно визначається температура потоку повітря в тому місці, де знаходилась капля.

Для дослідження воспламенения і горіння капли швидкість потоку підтримувалась рівною  $v = (1,7 \pm 0,1)$  м/с, що відповідає  $Re = 35$ . Така швидкість вибрана для уникнення сльозу пламени з капли. Капля визначеного розміру підвішується на підвесі і розміщується в потік нагрітого, до заданої температури, повітря.

Температура потоку повітря змінюється в широкому діапазоні, до 750 °С.

В процесі експерименту визначається температура воспламенения, час затримки воспламенения (період індукції).

Якщо капля воспламенилась, то з допомогою фотоелемента включається реєструючий блок, фіксує час горіння капли. Вимірювання часу проводиться за допомогою зібраної електронної схеми з фотоелементом і електронними лічильниками. Вимірювання початкового діаметра капли і його зменшення в процесі горіння капли проводиться з допомогою цифрової фотокамери Panasonic – Lumix DMC-FZ7.

За температуру воспламенения капли в потоці вибирається мінімальна температура потоку, при якій пламя охоплює каплю одразу ж після введення її в потік. Період індукції (час затримки

воспламенения) измеряется от помещения капли в поток до появления пламени, далее измеряется время горения капли.

Экспериментальные исследования по определению температуры воспламенения горючих жидкостей проводились с начальным размером капли равным  $d = (2,0 \pm 0,08) \cdot 10^{-3}$  м. Как правило, опыт с каплями данного диаметра повторялся десятки раз и из этих опытов бралось среднее.

Экспериментально полученные значения температур воспламенения и периодов индукции для капли соапстока рапса и для сравнения разных горючих жидкостей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Экспериментальные данные температуры воспламенения и периода индукции разных горючих жидкостей

Горючая жидкость	Температура воспламенения, К	Период индукции, с
ДТ	1018	1,1
МЭРМ	983	2,7
РМ	976	6,7
Соапсток	938	2,8
М40	968	2,1

Из данных представленных в таблице 1 видно, что минимальную температуру воспламенения  $T_{\dot{a}} = 938$  К имеет соапсток, а максимальную  $T_{\dot{a}} = 1018$  К – ДТ (дизельное топливо).

Поскольку на сегодняшний день, из выбранных нами для исследования жидких топлив, наиболее не изучена кинетика воспламенения соапстока, то дальнейшее исследование по воспламенению капли в потоке будем проводить с соапстоком.

Характер воспламенения капель жидких топлив существенно зависит от скорости обдувающего потока, поэтому представляет интерес исследовать зависимость  $\dot{O}_{\dot{a}}$  от скорости потока воздуха  $v$ , а именно от  $v_1 = 1,1$  м/с до  $v_2 = 1,9$  м/с с шагом 0,2 м/с при постоянном диаметре капли  $d = 2 \cdot 10^{-3}$  м.

На рис. 3 представлен график зависимости температуры воспламенения капли соапстока и для сравнения рапсового масла (РМ).

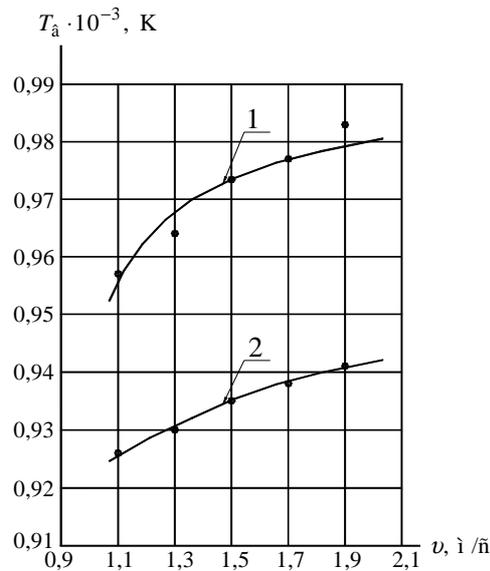


Рис. 3. Зависимость температуры воспламенения капли РМ (1) и соапстока (2) от скорости потока воздуха

Из построенной зависимости видно, что с увеличением скорости потока воздуха температура воспламенения растет.

Одновременно строим зависимость температуры воспламенения от диаметра поверхности капли соапстока  $T_{\hat{a}} = f(d)$  (при  $Re = const$ ) представленную на рис. 4.

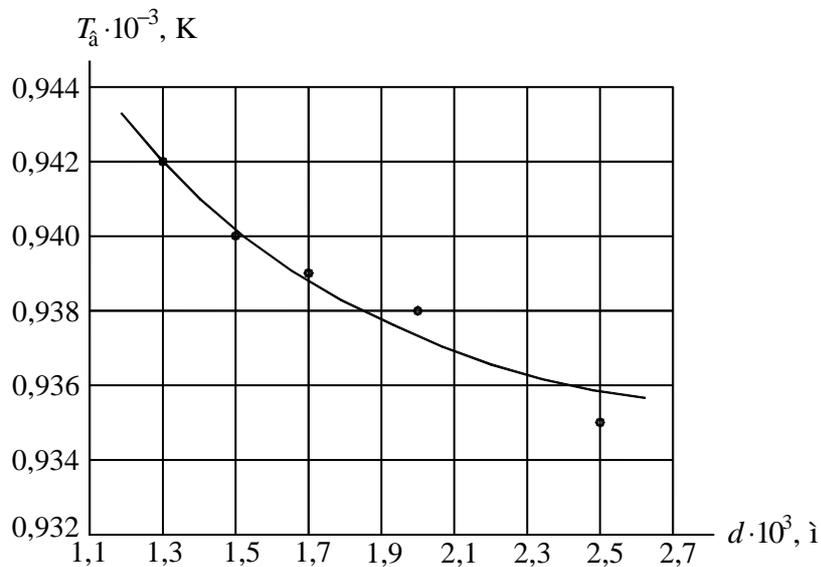


Рис. 4. Зависимость температуры воспламенения капли соапстока от диаметра капли

Из графика 4 видно, что с увеличением диаметра капли температура воспламенения соапстока уменьшается, что согласуется с теорией Н.Н. Семенова [5, 6]. Однако по Н.Н. Семенову реакция идет по всему объему капли, т.е. при условии реакции  $v_o = \rho V v_V$ , условии теплообмена  $Nu = const$ , а время тепловой релаксации (прогрева или охлаждения) вещества  $t_e \sim d^2$  и

$\left(\frac{\tau_o}{t_e}\right) \frac{1}{d^2}$ , тогда согласно [5] запишем  $d^2 \exp(-E/RT_{\hat{a}}) = const$ . Когда имеет место поверхностная реакция  $v_o = \rho S v_s$ , все математические рассуждения аналогичны тем, когда реакция идет по всему объему, т.е. в этом случае  $Nu = const$ ,  $\tau_o$  – минимальный (адиабатический) период индукции  $\sim d$ ,  $t_e \sim d^2$ ,  $\left(\frac{\tau_o}{t_e}\right) \frac{1}{d}$ , а  $d \exp(-E/RT_{\hat{a}}) = const$ . При воспламенении капли в потоке:  $Nu \sim \sqrt{Re}$ ,  $Re \sim d$ , то  $Nu \sim \sqrt{d}$ ,  $\tau_o \sim d$ ,  $t_e \sim d^{3/2}$ ,  $\left(\frac{\tau_o}{t_e}\right) \frac{1}{\sqrt{d}}$ , а  $\sqrt{d} \exp(-E/RT_{\hat{a}}) = const$ .

Как видно из вышесказанного, во всех случаях с увеличением диаметра капли температура воспламенения уменьшается, однако когда имеет место поверхностная реакция, эта зависимость более слабая, чем в случае объемной реакции, и еще более ослабевает при обдуве капли.

Так, например (иллюстративный), если размеры капель отличаются в 10 раз, а энергия активации  $\sim E = 210$  кДж/моль, то разница между температурами воспламенения таких капель составляет 200 град. для объемной реакции, 100 град. для поверхностной и 50 град. при воспламенении капель в потоке.

Известно, что основным условием воспламенения является равенство тепловыделения  $Q_1$  и теплоотвода  $Q_2$  из единицы объема парогазовой смеси вокруг капли

$$Q_1 = Q_2, \tag{1}$$

а условием максимума химической реакции [7]

$$\left(\frac{dW}{dT}\right)_{T=T_{\hat{a}}} = 0, \tag{2}$$

где  $W$  – скорость химической реакции.

В работе [8] проведено решение системы (1) и (2), получено критическое условие для воспламенения капли горючей жидкости в потоке, из которого зависимость температуры воспламенения от скорости потока при  $r = const$  может быть в первом приближении аппроксимирована зависимостью:  $\exp(-E/RT_{\infty}) \sim Re^{1,3}$ .

Построим зависимость в координатах  $\ln Re = f(1/T_{\hat{a}})$  (рис. 5) для соапстока и для сравнения РМ.

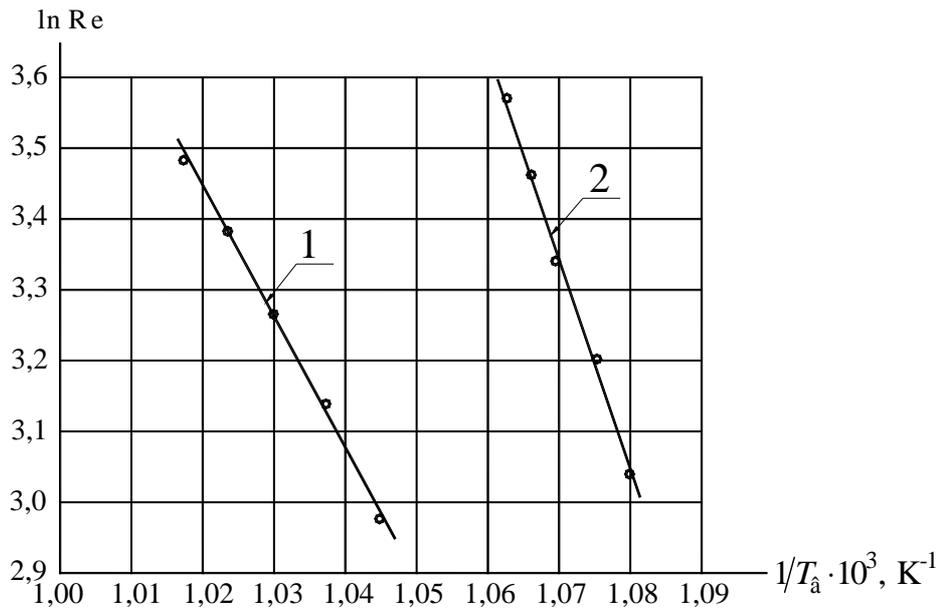


Рис. 5. Зависимость в координатах  $\ln Re = f(1/T_a)$  для капель РМ (1) и соапстока (2)

Как видно из построенной зависимости в координатах  $\ln Re = f(1/T_a)$  экспериментальные точки укладываются на прямые линии с тангенсом угла наклона равным  $E/1,3R$ . По тангенсу угла наклона прямой определена энергия активации топлива РМ:  $E = 200$  кДж/моль ( $E = 48$  ккал/моль) и соапстока:  $E = 319$  кДж/моль ( $E = 76$  ккал/моль). Энергия активации минимальная энергия реагентов (атомов, молекул и других частиц) достаточная для того, чтобы они вступили в химическую реакцию. В общих случаях сложных реакций энергия активации называется эффективной (эмпирической, кажущейся).

Далее представляет интерес исследовать зависимость периода индукции, как от температуры обдувающего потока воздуха, так и от размеров капли горючей жидкости. Исследования проводились с каплями соапстока рапсового масла начальных размеров:  $d_1 = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м;  $d_2 = 2,0 \cdot 10^{-3}$  м;  $d_3 = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м в интервале температур (963 – 1083) К.

На рис. 6 представлены в графическом виде зависимости полного периода индукции ( $t_{i_{\text{ген}}}$ ) от температуры потока ( $\dot{O}$ ) для нескольких диаметров ( $d$ ) капель соапстока.

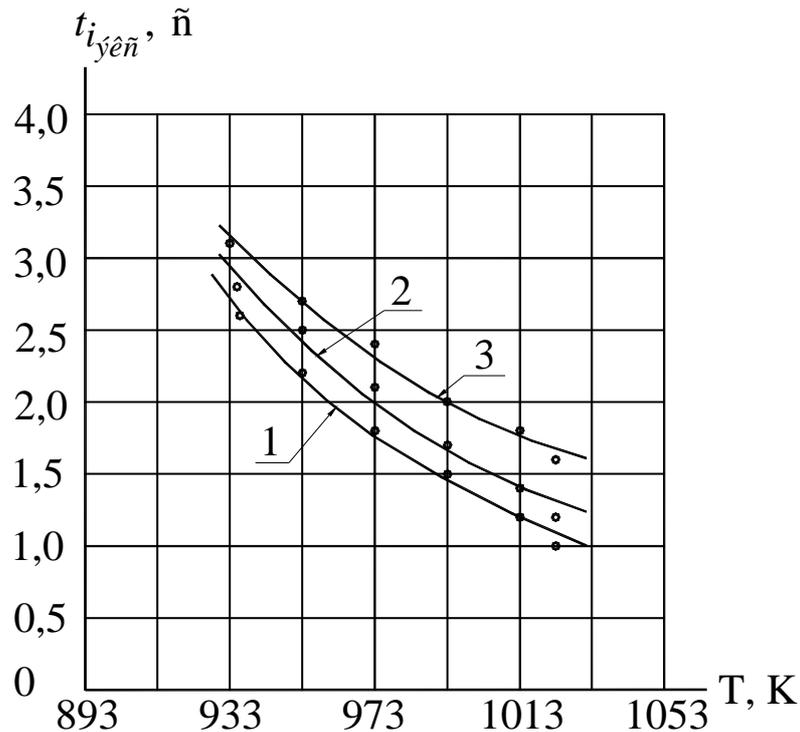


Рис. 6. Зависимость периода индукции от температуры потока для разного размера капли соапстока:  
 1 –  $d_1 = 1,5 \cdot 10^{-3}$  м;  
 2 –  $d_2 = 2,0 \cdot 10^{-3}$  м;  
 3 –  $d_3 = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м.

Как видно из рис. 6 с повышением температуры потока период индукции очень быстро уменьшается, стремясь к бесконечности ( $t_{i_{yeh_n}} \rightarrow \infty$ ) при температуре потока  $T$  стремящейся к температуре воспламенения  $T_o$  ( $T \rightarrow T_o$ ).

Максимальный период индукции, зарегистрированный в экспериментах, был порядка 3,2 для соапстока диаметром  $d = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м. При температуре, меньше 976 К и 933 К, ни одна из капель, исследуемых диаметров соапстока не воспламенилась.

Экспериментальная зависимость периода индукции  $t_{i_{yeh_n}}$  от диаметра  $d$  капли соапстока при разных температурах  $\dot{O}$  потока показана на и рис. 7.

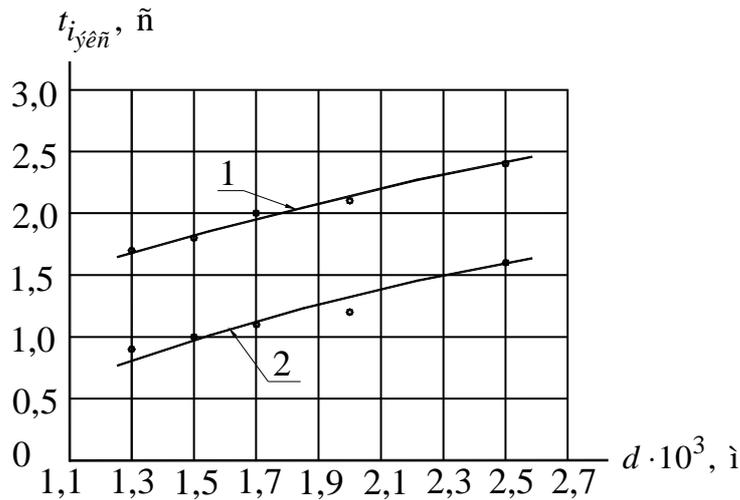


Рис. 7. Зависимость периода индукции от диаметра капель соапстока при разных температурах:  
 1 –  $\dot{O} = 973 \text{ K}$ ;  
 2 –  $\dot{O} = 1023 \text{ K}$ .

Как видно рис. 7 период индукции  $t_{i_{y\hat{e}n}}$  возрастает с увеличением диаметра  $d$  капли при заданной температуре потока  $T$ . Такая зависимость периода индукции от диаметра капель наблюдается только в случае поверхностной реакции, поскольку в случае объемной реакции величина  $\tau_i$  не зависит от  $d$  и период индукции в этом случае стремится к нулю при  $d \rightarrow \infty$ .

Из графика также видно, что характер зависимости  $t_{i_{y\hat{e}n}}(d)$  степенной, что согласуется с известными теоретическими исследованиями. Основное время в полном периоде индукции занимает время прогрева капли.

**Выводы.** По построенной зависимости в координатах  $\ln \text{Re} = f(1/T_{\hat{a}})$  определена энергия активации соапстока  $E = 319 \text{ кДж/моль}$  ( $E = 76 \text{ ккал/моль}$ ). Экспериментальные исследования периода индукции соапстока в зависимости от температуры воспламенения и диаметра капли показали: с повышением температуры потока период индукции очень быстро уменьшается, стремясь к бесконечности ( $t_{i_{y\hat{e}n}} \rightarrow \infty$ ) при температуре потока  $T$  стремящейся к температуре воспламенения  $T_o$  ( $T \rightarrow T_o$ ); период индукции  $t_{i_{y\hat{e}n}}$  возрастает с увеличением диаметра  $d$  капли при заданной температуре потока  $T$ . Такая зависимость периода индукции от диаметра капель наблюдается только в случае поверхностной реакции, поскольку в случае объемной реакции, величина адиабатического периода индукции  $\tau_i$  не зависит от  $d$  и период индукции в этом случае стремится к нулю при  $d \rightarrow \infty$ , что согласуется с теоретическими результатами. На основании проведенного исследования можно сделать вывод о перспективности использования

соапстока рапса, как горючого, например, в виде добавки к традиционно применяемому топливу (мазуту), что позволит создать экономию мазута в теплоэнергетических установках.

В заключении отметим, что для полноты знаний о кинетики испарения, воспламенения и горения капли в частности капли соапстока рапса необходимо: провести дальнейшие исследования объемной скорости испарения капель; провести термический и термогравиметрический анализ, определить поверхности фронта горения капли, выяснить неполноту сгорания.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тепло- и массообмен : 1966 г., Минск. Т. 5 / – Минск, 1966. – С. 965–974.
2. Горение неоднородных систем и научные основы сжигания топлива : материалы третьего всесоюзного совещания по теории горения, Т. 2. – М.: 1960. – С. 145–149.
3. Polimeropoulos С.Е. Combust / С.Е. Polimeropoulos, R.L. Peskin // Flame. – 1969. – 13. – Р. 1245–1249.
4. Горение и взрыв : материалы третьего Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву / Наука. – М.: 1972. – 150 с.
5. Семенов Н.Н. Цепные реакции / Н.Н. Семенов. – Л.: Госхимтехиздат, 1934. – 555 с.
6. Семенов Н.Н. О некоторых проблемах химической кинетики и реакционной способности / Н.Н.Семенов. – М.: АН СССР, 1954. – 350 с.
7. Варшавский Г.А. Квазистационарная теория воспламенения капли жидкого топлива / Г.А. Варшавский, Д.В. Федосеев, А.Д. Франк-Каменецкий // Физика аэродисперсных систем. – 1969. – Вып. 1. – С. 101.
8. Калинин В.В. Горение капель бинарных смесей в потоке : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. физ.-мат. наук : 01.04.14 «Теплофизика» / В.В. Калинин. – Одесса, 1978. – 24 с.

#### **Гусев В.М., Кулик М.І. ЗАПАЛЕННЯ КРАПЕЛЬ СОАПСТОКА РАПСУ**

*У роботі розглянуте питання про запалення краплі – перехід від випару до стійкого горіння одиної краплі соапстока рапсу, проведено дослідження про можливість використання соапстока, як самостійного палива, або як добавки в паливо, традиційно застосовуваного в теплоенергетичних установках.*

*Ключові слова: крапля, запалення, паливо, топкова камера, період індукції, енергія активації.*

#### **Gusev V. N, Kulik M. I. IGNITION of DROPS SOAPSTOKA RAPSA**

*In work the question on drop ignition – transition from evaporation to steady burning of an individual drop soapstoka rapca is considered, research about use possibility soapstoka, as independent fuel, or as additives in the fuel, traditionally applied in heat power installations is carried out.*

*Keywords: a drop, ignition, fuel, the top internal chamber, the period induk - ции, energy of activation.*