

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)
УДК 536.4:544.452.12

Поступило в редакцию 20.10.2020
Received 20.10.2020

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-747-756>

В. В. Лещевич, академик О. Г. Пенязьков, С. Ю. Шимченко

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

ОСОБЕННОСТИ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ ПАРОВ Н-ДЕКАНА В ВОЗДУХЕ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 600–800 К

Аннотация. В условиях быстрого адиабатического сжатия изучены особенности самовоспламенения паров н-декана в воздухе при температуре 600–800 К, давлении 0,8–1,2 МПа, эквивалентных отношениях $\phi = 0,5–1,5$ и постоянной плотности смеси $5,0 \pm 0,5$ кг/м³. Установлены температурно-концентрационные пределы перехода от одностадийного к двухстадийному режиму самовоспламенения. Многокадровая съемка обнаружила, что в зависимости от температуры «горячая» стадия процесса всегда возникает и развивается вблизи поверхности поршня либо торцевой стенки цилиндра сжатия, сопровождается одновременным переносом образованных очагов внутрь камеры сгорания, после чего происходит близкое к однородному самовоспламенению оставшейся смеси. Фотографии холодного пламени паров н-декана позволили определить пространственное положение очага самовоспламенения первой стадии – вблизи поверхности поршня. Установлено, что вблизи поверхности поршня на оси камеры находится застойная зона, вызванная вихревым тороидальным течением газа, в которой химическая реакция возникает с запозданием. Показано, что по мере увеличения парциального давления паров н-декана при сжатии процесс неравновесной конденсации топлива вблизи стенок камеры сгорания приводит к существенному перераспределению концентрации и температуры смеси по объему, что предопределяет локальные особенности ее последующего самовоспламенения.

Ключевые слова: двухстадийное самовоспламенение, н-декан, установка быстрого сжатия, холодное пламя, конденсация, отрицательный температурный коэффициент

Для цитирования. Лещевич, В. В. Особенности самовоспламенения паров н-декана в воздухе при температурах 600–800 К / В. В. Лещевич, О. Г. Пенязьков, С. Ю. Шимченко // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 747–756. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-747-756>

Vladimir V. Leschevich, Academician Oleg G. Penyazkov, Sergey Yu. Shimchenko

A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

SPECIFIC FEATURES OF N-DECANE VAPORS SELF-IGNITION IN AIR AT TEMPERATURES OF 600–800 K

Abstract. Experiments of n-decane/air self-ignition at the temperature range 600–800 K were carried out by rapid compression machine. It allowed obtaining temperature-concentration limits of transition from single-stage to two-stage ignition. High-speed video recording has let established that hot stage ignition always initiates near the piston surface or quartz window. These locations depend on gas temperature. Combustion of the test mixture occurs in the entire volume after that. Couple sequential photos of cool flame shows that it starts same near piston surface and has a complicated volumetric structure caused by the roll-up gas vortex. It is shown that partial n-decane pressure increasing during compression causes the non-equilibrium condensation process near the inner surfaces of combustion chamber. This leads to significant redistribution of n-decane concentration and determines local characteristics self-ignition of n-decane/air mixture.

Keywords: two-stage ignition, n-decane, rapid compression machine, cool flame, condensation, negative temperature coefficient

For citation: Leschevich V. V., Penyazkov O. G., Shimchenko S. Yu. Specific features of n-decane vapors self-ignition in air at temperatures of 600–800 K. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 747–756 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-747-756>

Введение. Нормальные алканы C_nH_{n+2} являются основными компонентами керосина и дизельного топлива. Известно, что более длинные представители данного гомологического ряда легко воспламеняются при повышенных температурах по сравнению с другими классами углеводородов (например, разветвленные алканы, циклоалканы и ароматические соединения) и имеют низкие исследовательские октановые и высокие цетановые числа. Поэтому этот класс углево-

дородов применяется в составе эталонных смесей для определения реакционной способности сложных многокомпонентных топлив. Кроме того, экспериментальные исследования воспламенения простых углеводородов являются ключевым источником данных для построения и верификации детальных кинетических механизмов химических реакций. Теоретико-эмпирические схемы для отдельных углеводородов закладываются в кинетику окисления многокомпонентных суррогатных смесей для описания процессов горения в двигательных и энергетических установках. Одним из основных компонентов суррогатов керосина и дизельного топлива является *n*-декан [1; 2]. При этом существует дефицит экспериментальных данных об интегральном параметре процесса воспламенения – периоде индукции, или задержке самовоспламенения τ_0 – *n*-декана $C_{10}H_{22}$ при температурах ниже 1000 К. Из-за низкого значения давления насыщенного пара *n*-декана при комнатной температуре, как правило, большинство экспериментов проводилось на нагреваемых ударных трубах (УТ), обеспечивающих проведение измерений при высоких температурах [3–9]. Только в одной из этих работ [3] измерения периода индукции осуществлялись в широком температурном диапазоне 650–1300 К на ударной трубе со сшитой контактной поверхностью. Приведенные результаты демонстрируют наличие отрицательного температурного коэффициента (ОТК) константы скорости реакции окисления *n*-декана, т. е. с ростом температуры смеси увеличивается ее задержка самовоспламенения τ_0 . Причины такого поведения в реагирующих системах давно обсуждаются в литературе и объясняются существованием особого режима двухстадийного воспламенения, который заключается в доминировании при низких температурах (до 750 К) промежуточных реакций с участием алкилпероксид-радикала $C_{10}H_{21}O_2$ [10]. Они сопровождаются возникновением специфического режима горения – «холодного» пламени, имеющего низкоинтенсивное свечение и приводящего к незначительным изменениям температуры, концентрации и состава газовой смеси перед иницированием основной «горячей» стадии горения.

В области низких температур исследование характеристик воспламенения *n*-декана проводится преимущественно на установках быстрого сжатия (УБС). Так, в [11] на УБС квадратного сечения получены результаты по измерению задержки воспламенения паров *n*-декана в воздухе в диапазоне температуры от 600 до 700 К и давлении 0,7 и 1,5 МПа. Температура газа в конце такта сжатия изменялась разбавлением исследуемой смеси диоксидом углерода при постоянной степени сжатия. Как отмечают авторы, полученные результаты дополняют исследование [12], в котором были получены данные по временам индукции бедных и богатых по топливу смесей при температуре 635–770 К и давлении 0,7–3,0 МПа. Состав смеси, для которой установлены задержки самовоспламенения [12], не позволяет непосредственно сопоставить их с измерениями, полученными на УТ.

Воспламенение очень чувствительно к незначительным изменениям локальной температуры горючей смеси и концентрации топлива в ней, поэтому при интерпретации кинетических измерений необходимо учитывать различные факторы, оказывающие влияние на однородность распределения этих параметров в измерительном объеме. Особенно важно выявить закономерности между протекающими физическими процессами при адиабатическом нагреве и самовоспламенением паров *n*-декана в воздухе в диапазоне условий, соответствующих двухстадийному режиму воспламенения смеси. Цель данной работы состояла в исследовании режимов «холодного» и «горячего» воспламенения паров *n*-декана в воздухе в диапазоне температур 600–800 К, эквивалентных отношениях топливо–окислитель (ϕ) 0,5–1,5 и при давлении 0,8–1,2 МПа, а также в изучении влияния на них неоднородных условий в объеме камеры сгорания.

Материалы и методы исследования. Эксперименты проводились на установке быстрого сжатия [13–15]. Такие установки широко используются для получения и проверки данных о кинетике химических реакций при температуре ниже 1000 К.

Динамика роста давления в камере сгорания УБС регистрировалась с помощью прецизионного высокотемпературного пьезоэлектрического датчика давления Kistler 6031U18, с точностью 25 кПа для исследуемого диапазона. Температура сжатого газа рассчитывалась в адиабатическом приближении (T_{ad}) на основании измерения начальной температуры смеси и степени сжатия, либо в приближении адиабатического ядра (T_c), учитывающего теплотери, на основании измерения начальной температуры и отношения давления в конце такта сжатия к начальному.

Регистрация собственного свечения пламени из объема камеры сгорания, возникающего при химических реакциях, осуществлялась фотоэлектронными умножителями (ФЭУ). Первый из них фиксировал свечение в диапазоне 300–600 нм. Второй был настроен на регистрацию «холодной» стадии воспламенения на одной из наиболее интенсивных полос флюоресценции формальдегида НСОН на длине волны 395,2 нм [16] через узкополосный интерференционный фильтр, пропускающий излучение в интервале 394 ± 5 нм. Третий ФЭУ использовался с узкополосным интерференционным фильтром на длину волны $\lambda = 431,5 \pm 1,5$ нм. Излучение в данном диапазоне возникает при переходе возбужденного радикала СН из состояния 2Δ в состояние 2Π . Данный радикал является основным промежуточным продуктом в реакциях окисления всех углеводородов, поэтому резкое увеличение его концентрации указывает на начало «горячей» стадии воспламенения.

Фотосъемка воспламенения и горения исследуемых смесей в объеме камеры сгорания при сжатии осуществлялась через кварцевое окно, установленное в торцевой стенке, с помощью высокоскоростной камеры FASTCAM SA-Z со скоростью 67500 кадров в секунду и разрешением 512×512 пикселей. Для наблюдения холодного пламени использовалась специальная камера с электронно-оптическим усилителем яркости изображения DI-CAMPro, работающая в режиме двух кадров.

Длительность задержки самовоспламенения τ_0 определялась по сигналу датчика давления как промежуток времени между моментом максимального давления смеси в ходе сжатия, реализуемого при достижении поршня верхней мертвой точки (ВМТ), и моментом его увеличения на 5 % вследствие самовоспламенения (рис. 1, а). В случае двухстадийного режима измерялись задержки возникновения холодного пламени τ_1 и время между «холодной» и «горячей» стадиями τ_2 аналогичным образом.

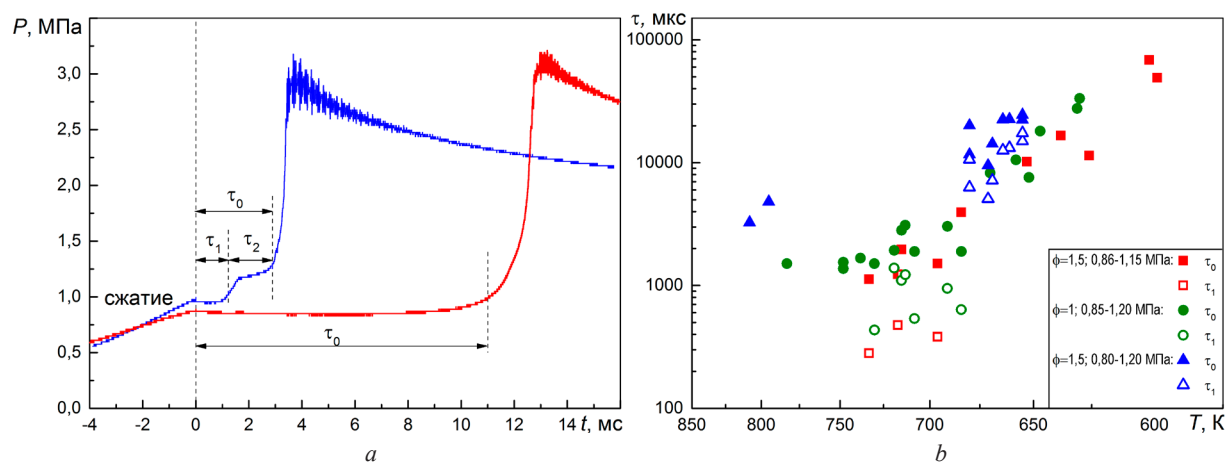


Рис. 1. Динамика давления (а) при одностадийном (красная линия) и двухстадийном (синяя линия) режимах самовоспламенения и измеренные задержки самовоспламенения (б) паров н-декана в воздухе

Fig. 1. Pressure variation (a) during one- (red line) and two-stage (blue line) ignition and measured self-ignition times (b) of n-decane/air mixture

Для максимального снижения влияния процессов адсорбции, разложения и конденсации топлива на точность состава и гомогенность топливовоздушной смеси она приготавливалась непосредственно в цилиндре сжатия УБС, т. е. без ее нахождения в промежуточных испарительных резервуарах и подающих магистралях. Необходимое количество жидкого топлива помещалось с помощью мерной пипетки (цена деления шкалы 0,1 мкл) в виде капли на внутреннюю поверхность камеры сгорания при положении поршня в ВМТ. После этого камера герметично закрывалась в течение не более 10 с и поршень отодвигался в начальное положение. Для достижения необходимого состава в тестовый объем подавался синтетический воздух. В виду низкого давления насыщенного пара н-декана при комнатной температуре (120 Па при 293 К) цилиндр сжатия,

камера сгорания и кварцевое окно нагревались до 333 К, после чего паровоздушная смесь выдерживалась при этой температуре не менее одного часа.

Результаты и их обсуждение. Измеренные задержки холодной τ_1 и горячей τ_0 стадий самовоспламенения декана показаны на рис. 1, b в аррениусовских координатах $\lg t$ от $1/T$. По углу наклона прямой, являющейся линейной аппроксимацией данных в представленном масштабе, можно определить энергию активации брутто-реакции.

Анализ полученных результатов для смесей с эквивалентным отношением 0,5; 1 и 1,5 при различных температурах позволил определить диапазон условий, при которых происходит переход от одностадийного «горячего» к двухстадийному режиму воспламенения и построить соответствующую параметрическую диаграмму процесса (рис. 2). Хорошо видно, что богатая по топливу смесь способна самовоспламеняться при более низких температурах. Минимальная температура, при которой происходило воспламенение паров *n*-декана в воздухе, составила: при $\phi = 0,5$ – 660 К, $\phi = 1$ – 630 К и $\phi = 1,5$ – 605 К. При этом для бедной ($\phi = 0,5$) смеси двухстадийный режим наблюдается во всем диапазоне температур 660–800 К, в то время как для стехиометрической ($\phi = 1$) и богатой ($\phi = 1,5$) смесей он возникает только при температуре выше 710 и 680 К соответственно. При более низких температурах наблюдается только одностадийный режим воспламенения. Кроме того, были определены предельные температуры смеси, при которых воспламенение отсутствовало: для бедной – 630 К, стехиометрической – 600 К и богатой – 580 К. Определение верхней границы перехода от двухстадийного к одностадийному режиму воспламенения на данной установке невозможно без применения разбавителей, так как увеличение температуры достигается только увеличением хода поршня (степени сжатия). Из-за конструктивной ограниченности скорости перемещения поршня существенно увеличивается время сжатия и воспламенение начинается до момента достижения им ВМТ (на сжатии).

Скоростная съемка позволила установить, что «горячая» стадия самовоспламенения паров *n*-декана всегда носит очаговый характер и существует определенная закономерность в расположении очагов в зависимости от температуры смеси в конце такта сжатия. На рис. 3 показаны осциллограммы давления и свечения на длине волны 431,5 нм при воспламенении стехиометрической смеси при температурах 720 К (*a*), 713 К (*b*) и 670 К (*c*). С левой стороны рисунка представлены фотографии первичных очагов горения в моменты времени, отмеченные красными вертикальными линиями на графике с осциллограммами. Стоит отметить, что пары фотографий *a* и *c* получены при положении камеры под углом 30° относительно оси цилиндра сжатия, а пара фотографий *b* – вдоль оси; красная штриховая линия соответствует границе между поршнем

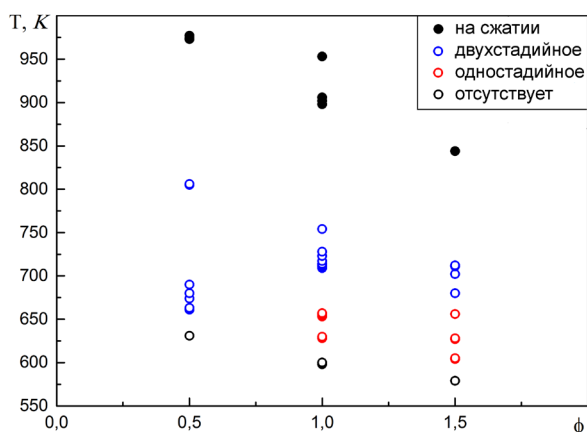


Рис. 2. Параметрическая диаграмма режимов самовоспламенения паров *n*-декана в воздухе в зависимости от эквивалентного отношения и температуры

Fig. 2. *n*-Decane/air parametric diagram of self-ignition modes depending on the equivalent ratio mixture and temperature

и цилиндрической стенкой камеры сгорания. Обнаружено, что при температурах выше 720 К первичные очаги всегда возникают около поверхности поршня (*a*), в диапазоне 700–720 К возможно одновременное их зарождение как вблизи поршня, так и около кварцевого окна (*b*), а при температурах ниже 700 К воспламенение начинается вблизи поверхности кварцевого окна (*c*). Аналогичное расположение первичных очагов горения зафиксировано в бедной и богатой смесях.

Скоростная съемка показывает, что расширение зоны первичного горения вблизи поршня в радиальном направлении сопровождается одновременным переносом образованных очагов вдоль оси камеры сгорания. Очевидно, что такое поведение обусловлено газодинамической картиной течения, формируемой при движении поршня в виде присоединенного к его поверхности тороидального вихря вблизи стенки ци-

линдра [15]. Это течение приводит к образованию застойной зоны на оси камеры сгорания. В результате в центре объема образуется область, где смесь не воспламеняется, которая имеет вид черной воронки. Периферийное вихревое течение осуществляет захват горячих продуктов и очагов горения от поверхности поршня и обеспечивает их перенос по направлению к торцевой стенке. Расширение зоны горения приводит к дополнительному сжатию несгоревших фрагментов топливной смеси в камере и их дальнейшему объемному самовоспламенению.

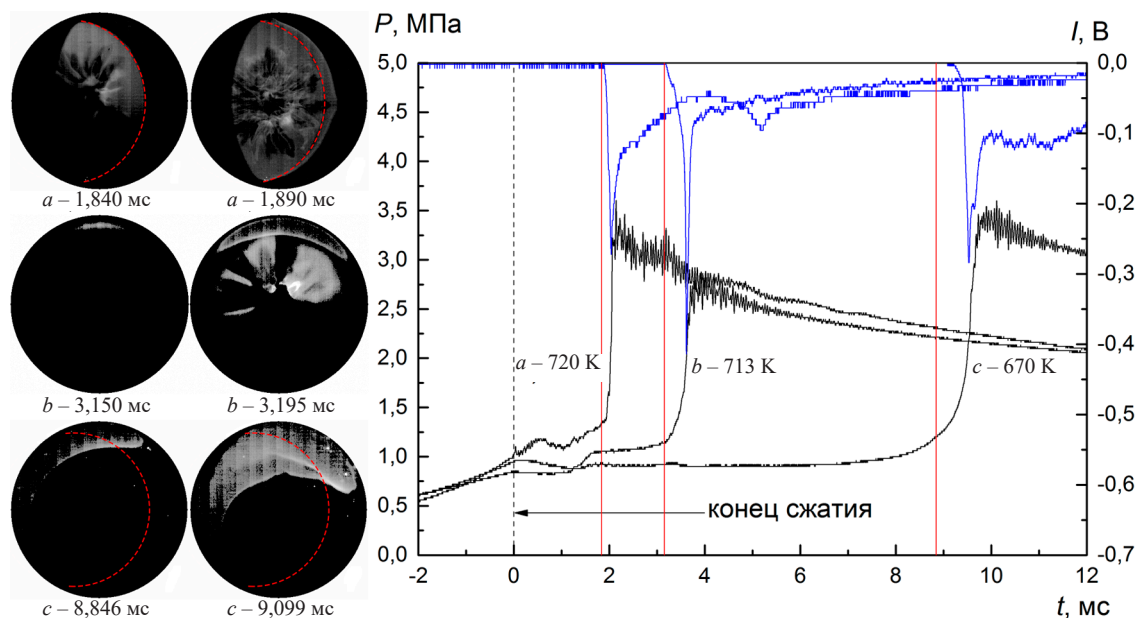


Рис. 3. Динамика давления (черная линия) и свечения на длине волны 431,5 нм (синяя линия), зарегистрированные в экспериментах со стехиометрической смесью при температурах 720 (a), 713 (b) и 670 К (c) вместе с фотографиями очагов горения, где красная штриховая линия – граница между поверхностью поршня и боковой стенкой камеры сгорания

Fig. 3. Pressure variation (black line) and luminescence at wave length 431,5 nm (blue line) recorded in experiments with stoichiometric mixture at temperatures 720 (a), 713 (b) and 670 K (c) together with photos of combustion kernels, where the red dashed line is the border between the piston surface and the combustion chamber sidewall

Представленные кадры (рис. 3) демонстрируют, что в индукционный период не наблюдается эффект возгорания и горения микрочастиц посторонних примесей. В отличие от экспериментов с метаном [13; 17], их зажигание происходит только в продуктах сгорания *n*-декана и фиксируется в виде отдельных ярких точек на фотографиях процесса (рис. 3). По нашему мнению, это вызвано двумя факторами. Минимальная температура возгорания микрочастиц составляет около 850 К [14], что значительно выше минимальной температуры самовоспламенения паров *n*-декана. Второй фактор обусловлен тем, что примесные микрочастицы могут являться центрами конденсации паров топлива по мере роста его парциального давления при сжатии. Образование жидкой пленки на их поверхности и ее последующее испарение предотвращают преждевременный разогрев и возгорание микрочастиц.

Для визуализации режима «холодного» пламени при двухстадийном самовоспламенении использовалась камера с электронно-оптическим усилителем яркости изображения DI-CAM Pro, установленная под углом 30° относительно оси цилиндра сжатия. Регистрация изображений осуществлялась в режиме двух кадров: экспозиция каждого кадра – 10 мкс, интервал времени между ними – 150 мкс. Синхронизация запуска камеры осуществлялась по первому пику интенсивности свечения в наиболее чувствительном диапазоне 300–600 нм. На представленных фотографиях (рис. 4) видно, что зарождение очага холодного пламени также происходит вблизи поршня. Как и для «горячей» стадии (рис. 3) характерной особенностью полученных снимков является наличие области с не реагирующей смесью в застойной зоне на оси вблизи поверхности поршня, имеющей вид черной воронки. Это указывает на влияние вихревого течения на распре-

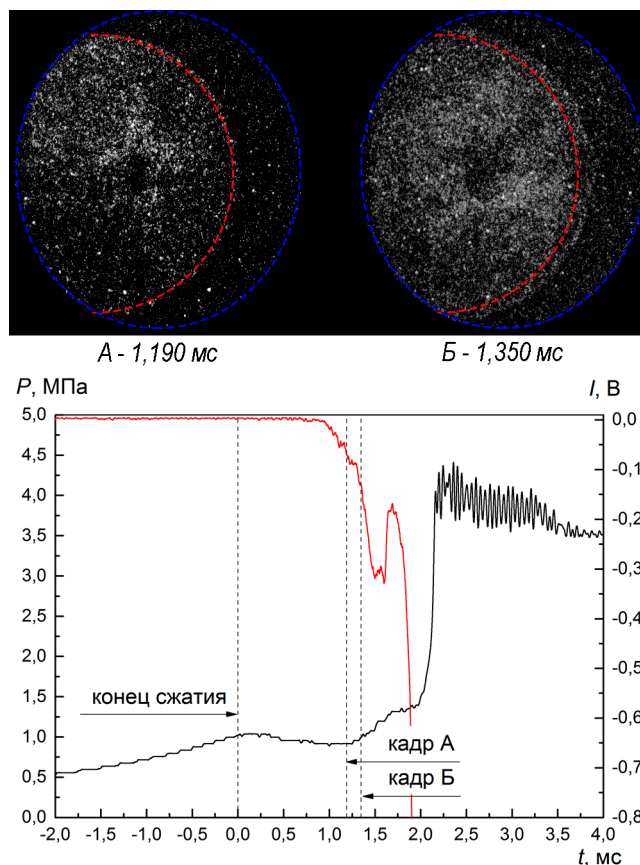


Рис. 4. Кадры с изображением холодного пламени (экспозиция кадра 10 мкс, интервал 150 мкс), где красная штриховая линия – граница между поверхностью поршня и боковой стенкой камеры сгорания, синяя штриховая – граница между боковой стенкой камеры сгорания и внутренней поверхностью кварцевого окна, представленные вместе с давлением (черная линия) и свечением в диапазоне 300–600 нм (красная линия) при самовоспламенении декановоздушной смеси ($p_c = 1,04$ МПа, $T_c = 715$ К и $\phi = 1,5$)

Fig. 4. Frames with the cool flame image (frame exposure 10 μ s, interval 150 μ s), where the red dashed line is the border between the piston surface and the combustion chamber sidewall, the blue dashed line is the border between the combustion chamber sidewall and the inner surface of quartz window, presented together with pressure (black line) and luminescence in the range of 300–600 nm (red line) in decane/air mixture self-ignition ($p_c = 1.04$ МПа, $T_c = 715$ К and $\phi = 1.5$)

деление температуры и концентрации топлива и температуры смеси в объеме камеры сгорания, и последующие процессы инициирования как «холодной», так и «горячей» стадий воспламенения паров *n*-декана.

Характерное время задержки самовоспламенения τ_0 *n*-декана в исследованном диапазоне условий составляет 1–70 мс, а время сжатия смеси 30–60 мс. Очевидно, что за этот период массивные металлические стенки камеры сгорания не успевают нагреться и остаются при начальной температуре установки около 333 К, в то время как температура газа в момент прихода поршня в верхнюю мертвую точку (ВМТ) может достигать значения 1000 К. При этом отношение парциального давления паров *n*-декана к давлению его насыщенного пара, или степень пересыщения α , при температуре стенки 333 К достигает значений от 4 до 14 в зависимости от эквивалентного отношения смеси. Таким образом, в определенный момент сжатия вблизи поверхностей камеры сгорания возникает состояние, при котором иницируется процесс неравновесной гомогенной конденсации паров *n*-декана с образованием микрокапель. Конденсация топлива может вызывать как дополнительный локальный рост температуры в окрестности микрокапель за счет скрытой теплоты фазового перехода, так и последующее охлаждение за счет их испарения при контакте с нагретым воздухом. Одновременно, возможно образование тонкой пленки жидкости на стенках цилиндра сжатия. При этом происходит постоянный транспорт паров из внутреннего

объема камеры сгорания к поверхности поршня и торцевой стенке за счет сформированного торoidalного течения в объеме [15]. О протекании процесса конденсации паров *n*-декана при движении поршня свидетельствует тот факт, что измеренное давление p_c в конце такта сжатия всегда больше, чем максимально возможное, рассчитанное в адиабатическом приближении процесса сжатия p_{ad} . Это несоответствие вызвано уменьшением удельной теплоемкости смеси и, как следствие, увеличением показателя адиабаты смеси γ из-за уменьшения концентрации паров *n*-декана в камере сгорания. В серии тестовых экспериментов по сжатию воздуха было установлено, что рассчитанное адиабатическое давление всегда больше измеренного на $3 \pm 1\%$. Такой уровень теплотеря применим и для топливовоздушной смеси, где молярное содержание паров *n*-декана не превышало 2%. Это позволяет провести корректировку значения средней температуры смеси T_{eff} путем подбора «эффективного» состава, при котором выполняется превышение рассчитанного значения давления p_{ad} на 3%, по сравнению с измеренным в эксперименте p_c .

На рис. 5 представлены результаты измерений задержки самовоспламенения бедной ($\phi = 0,5$), стехиометрической ($\phi = 1$) и богатой ($\phi = 1,5$) смесей паров *n*-декана с воздухом при температурах от 600 до 800 К, давлении 0,8–1,2 МПа и постоянной плотности $5 \pm 0,5$ кг/м³. Некоторые данные, полученные на ударных трубах, приведены на рисунке для сравнения. Заполненными символами, которые относятся к полученным в данной работе результатам, приведены значения средней температуры T_c смеси в приближении адиабатического ядра, а пустыми – скорректированная температура T_{eff} рассчитанная с учетом изменения состава из-за конденсации паров *n*-декана. Видно, что процесс конденсации топлива может привести к существенному увеличению средней температуры в объеме на 100 К в богатых смесях, а в бедных – на 15–25 К. Рассчитанное изменение средней температуры приводит к сдвигу измеренных задержек самовоспламенения в сторону линейной интерполяции данных, полученных на ударной трубе при высоких температурах. Отметим, что локальные и средние изменения температуры смеси могут быть и выше, поскольку мы не учитывали влияние скрытой теплоты фазового перехода на нагрев оставшегося газа в объеме камеры сгорания. Наблюдаемый в повторных экспериментах разброс результатов измерений может быть вызван изменениями локальной температуры и эквивалентного отношения ϕ вследствие сложного характера протекания процесса конденсации и последующего перераспределения концентраций топлива.

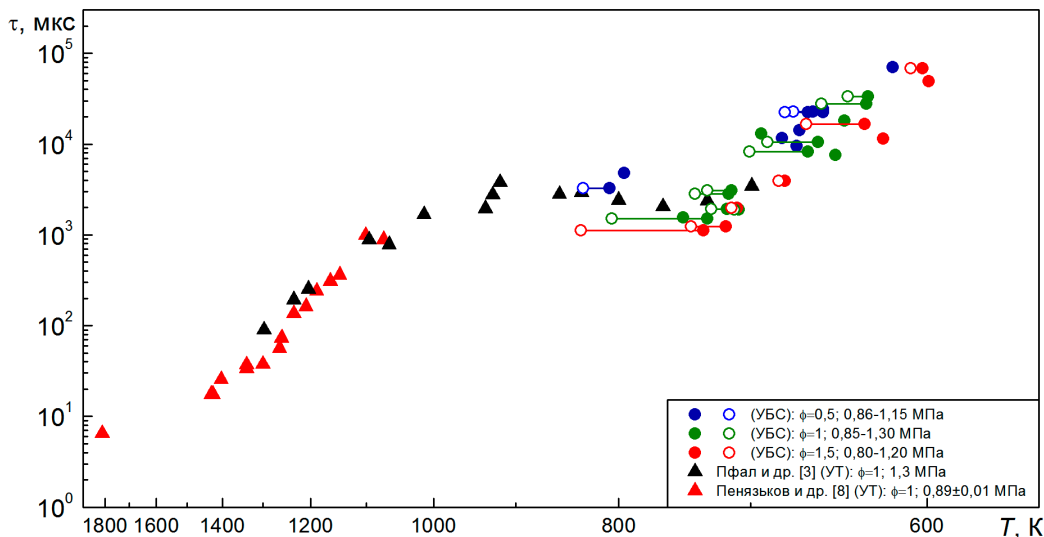


Рис. 5. Сравнение измеренных значений задержки самовоспламенения смеси *n*-декан–воздух в зависимости от рассчитанной температуры в приближении адиабатического ядра T_c (заполненные символы) и с учетом конденсации топлива T_{eff} (пустые символы) с результатами, полученными на УТ

Fig. 5. Comparison of decane/air self-ignition delay depending on the calculated temperature: in the approximation of the adiabatic core T_c (filled symbols) and taking into account fuel condensation T_{eff} (empty symbols), with the results obtained in a shock tube

Таким образом, из-за явлений конденсации и присутствующего вихревого течения в объеме камеры сгорания возникает эффект локального обогащения смеси топливом вблизи поверхности поршня и торца камеры сгорания. Кинетически более богатые смеси тяжелых углеводородов, к которым относится *n*-декан, воспламеняются раньше при тех же термодинамических условиях, а за счет скрытой теплоты фазового перехода локальная температура в этом слое топливоздушная смесь может быть и выше. Это приводит к тому, что как «холодная», так и «горячая» стадии воспламенения инициируются быстрее и могут протекать более интенсивно вблизи поверхности поршня и торца камеры сгорания (рис. 3, 4). Эти эффекты объясняют измеряемое в экспериментах уменьшение задержки самовоспламенения и возникновения очагов горения вблизи поверхностей камеры сгорания и могут стать ключевым аспектом для понимания наблюдаемых явлений низкотемпературного горения в камерах сгорания.

Анализ литературных данных [3–9; 11; 12] показывает, что эффект влияния конденсации паров при сжатии на изменение как средней, так и локальной температуры и концентрации смеси в экспериментальных установках не учитывался ранее. На рис. 6 приведена зависимость степени пересыщения α паров *n*-декана от эквивалентного отношения смеси ϕ в конечном состоянии, рассчитанная по литературным данным различных авторов на ударных трубах и установках быстрого сжатия. Хорошо видно, что большинство экспериментальных измерений проводилось в условиях пересыщенного состояния паров *n*-декана. Только в некоторых работах [5; 9] измерения задержек самовоспламенения проводились при $\alpha < 1$, что связано с низкими концентрациями топлива и давлением смеси.

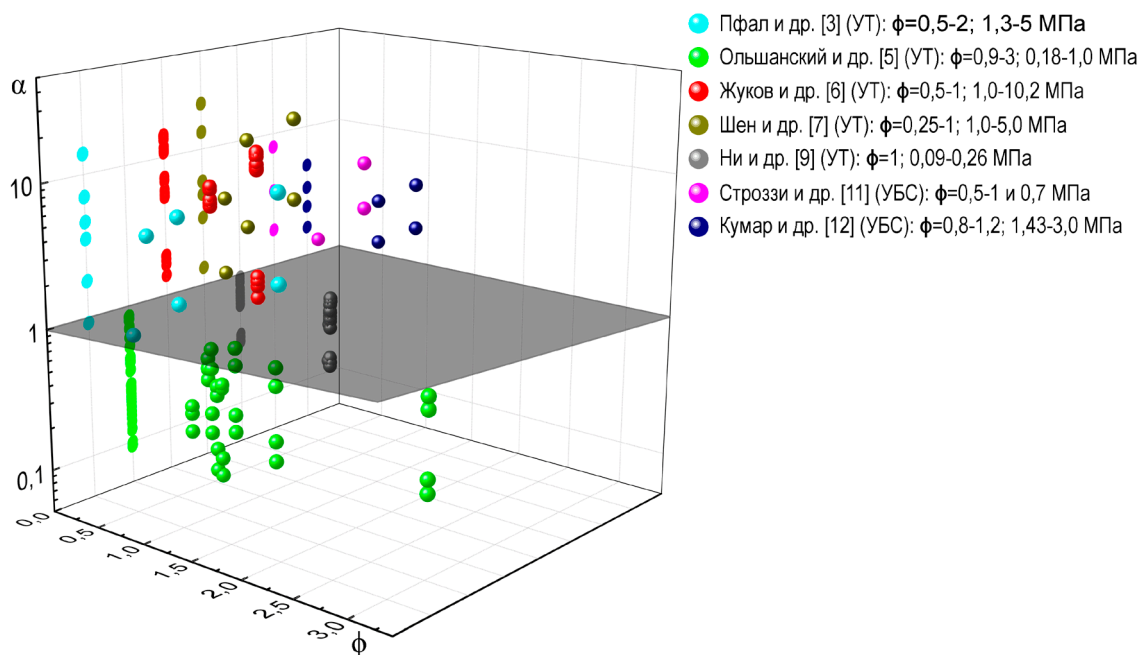


Рис. 6. Сравнение значений степени пересыщения α и эквивалентного отношения ϕ в экспериментах, представленных в литературе

Fig. 6. Value comparison of oversaturation α and equivalent ratio ϕ in experiments given in the literature

Заключение. Экспериментально определены задержки «холодной» и «горячей» стадий самовоспламенения в бедной ($\phi = 0,5$), стехиометрической ($\phi = 1$) и богатой ($\phi = 1,5$) смесях паров *n*-декана с воздухом в диапазоне температур T_c 600–800 К и давлений 0,8–1,2 МПа, которые хорошо согласуются с литературными данными. На основании массива экспериментальных измерений установлена параметрическая диаграмма условий возникновения режимов одностадийного и двухстадийного самовоспламенения паров *n*-декана. Для стехиометрического и богатого состава предельные температуры перехода от одностадийного «горячего» к двухстадийному ре-

жиму составили 710 и 680 К соответственно. Для бедной смеси двухстадийный режим реализовывался во всем исследуемом температурном диапазоне – 660–800 К. Получены данные по пространственной локализации очагов горячего воспламенения при $\phi = 1$ от температуры: ниже 700 К – вблизи кварцевого окна, выше 720 К – вблизи поверхности поршня, при 700–720 К – вблизи обеих поверхностей. Зафиксированные особенности протекания воспламенения и горения испаренного *n*-декана связаны с наличием тороидального вихревого движения над поверхностью сжимающего поршня, обеспечивающего транспорт паров, а также процессом их конденсации в тепловом пограничном слое, где отношение парциального давления может быть в 4–14 раз больше давления насыщенного пара *n*-декана при начальной температуре стенок 333 К в зависимости от эквивалентного отношения топливо–окислитель. Возникающее неоднородное распределение концентрации топлива и температуры смеси по объему приводит к очаговому самовоспламенению в камере сгорания. Влияние этих явлений на пространственно-временные характеристики процесса самовоспламенения указывает на необходимость тщательного анализа фактических условий проведения экспериментальных измерений времени индукции паров углеводородов при использовании этих данных для верификации детальных кинетических схем химических реакций.

Благодарности. Работа выполнена в рамках ГПНИ «Энергетические системы, процессы и технологии» подпрограмма «Эффективные теплофизические процессы и технологии» (задание № 2.59).

Acknowledgements. The study was conducted in the frame of the Government Program “Energy Systems, Processes and Technologies” subprogramme “Effective Thermophysical Processes and Technologies” (task no. 2.59).

Список использованных источников

1. Experimental formulation and kinetic model for JP-8 surrogate mixtures / A. Violi [et al.] // *Combustion Science and Technology*. – 2002. – Vol. 174, N 11–12. – P. 399–417. <https://doi.org/10.1080/00102200215080>
2. Edwards, T. Surrogate Mixtures to Represent Complex Aviation and Rocket Fuels / T. Edwards, L. Q. Maurice // *Journal of Propulsion and Power*. – 2001. – Vol. 17, N 2. – P. 461–466. <https://doi.org/10.2514/2.5765>
3. Pfahl, U. Self-ignition of diesel-relevant hydrocarbon-air mixtures under engine conditions / U. Pfahl, K. Fieweger, G. Adomeit // *Symposium (International) on Combustion*. – 1996. – Vol. 26, N 1. – P. 781–789. [https://doi.org/10.1016/s0082-0784\(96\)80287-6](https://doi.org/10.1016/s0082-0784(96)80287-6)
4. Horning, D. C. A study of the high-temperature auto-ignition and thermal decomposition of hydrocarbons: Report No. TSD-135 [Electronic resource] / D. C. Horning. – 2001. – 148 p. – Mode of access: https://hanson.stanford.edu/dissertations/Horning_2001.pdf. – Date of access: 24.09.2020.
5. Olchanski, E. Decane oxidation in a shock tube / E. Olchanski, A. Burcat // *International Journal of Chemical Kinetics*. – 2006. – Vol. 38, N 12. – P. 703–713. <https://doi.org/10.1002/kin.20204>
6. Zhukov, V. P. Autoignition of *n*-decane at high pressure / V. P. Zhukov, V. A. Sechenov, A. Yu. Starikovskii // *Combustion and Flame*. – 2008. – Vol. 153, N 1–2. – P. 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.09.006>
7. A shock tube study of the ignition of *n*-heptane, *n*-decane, *n*-dodecane, and *n*-tetradecane at elevated pressures / H. P. S. Shen [et al.] // *Energy & Fuels*. – 2009. – Vol. 23, N 5. – P. 2482–2489. <https://doi.org/10.1021/ef8011036>
8. Autoignition of surrogate fuels at elevated temperatures and pressures / A. J. Dean [et al.] // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2007. – Vol. 31, N 2. – P. 2481–2488. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.162>
9. Shock tube study of *n*-decane ignition at low pressures / X. F. Nie [et al.] // *Acta Mechanica Sinica*. – 2012. – Vol. 28, N 1. – P. 79–82. <https://doi.org/10.1007/s10409-011-0542-9>
10. Титова, Н. С. О кинетических механизмах окисления *n*-декана / Н. С. Титова, С. А. Торохов, А. М. Старик // *Физика горения и взрыва*. – 2011. – Т. 47, № 2. – С. 3–22.
11. Autoignition of *n*-decane and multi-component surrogates of kerosene in an optical Rapid Compression Machine / C. Strozzi [et al.] // *Proc. 27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*. – Beijing, 2019. – P. 1–6.
12. Kumar, K. Autoignition of *n*-decane under elevated pressure and low-to-intermediate temperature conditions / K. Kumar, G. Mittal, C. J. Sung // *Combustion and Flame*. – 2009. – Vol. 156, N 6. – P. 1278–1288. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.01.009>
13. Auto-ignitions of a methane/air mixture at high and intermediate temperatures / V. V. Leschevich [et al.] // *Shock Waves*. – 2016. – Vol. 26, N 5. – P. 657–672. <https://doi.org/10.1007/s00193-016-0665-9>
14. Лещевич, В. В. Возгорание микрочастиц угля в атмосфере воздуха и их влияние на воспламенение метана / В. В. Лещевич, О. Г. Пенязьков, С. Ю. Шимченко // *Инж.-физ. журн.* – 2020. – Т. 93, № 4. – С. 1041–1050.
15. Visualization and analysis of the burning particles motion in combustion chamber of a rapid compression machine / V. V. Leschevich [et al.] // *Journal of Flow Visualization and Image Processing*. – 2016. – Vol. 23, N 1–2. – P. 1–14. <https://doi.org/10.1615/jflowvisimageproc.2016019010>
16. Гейдон, А. Г. Спектроскопия пламен / А. Г. Гейдон, И. В. Вейц, Л. В. Гурвич. – М., 1959. – 382 с.

17. Doroshko, M. V. High-temperature pyrolysis of propane and methane – the shock tube investigation / M. V. Doroshko // High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes. – 2019. – Vol. 23, N 2. – P. 165–179. <https://doi.org/10.1615/hightempmatproc.2019030409>

References

1. Violi A., Yan S., Eddings E. G., Sarofim A. F., Granata S., Faravelli T., Ranzi E. Experimental formulation and kinetic model for JP-8 surrogate mixtures. *Combustion Science and Technology*, 2002, vol. 174, no. 11–12, pp. 399–417. <https://doi.org/10.1080/00102200215080>
2. Edwards T., Maurice L. Q. Surrogate Mixtures to Represent Complex Aviation and Rocket Fuels. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, vol. 17, no. 2, pp. 461–466. <https://doi.org/10.2514/2.5765>
3. Pfahl U., Fieweger K., Adomeit G. Self-ignition of diesel-relevant hydrocarbon-air mixtures under engine conditions. *Symposium (International) on Combustion*, 1996, vol. 26, no. 1, pp. 781–789. [https://doi.org/10.1016/s0082-0784\(96\)80287-6](https://doi.org/10.1016/s0082-0784(96)80287-6)
4. Horning D. C. *A study of the high-temperature auto-ignition and thermal decomposition of hydrocarbons. Report No. TSD-135*. 2001, 148 p. Available at: https://hanson.stanford.edu/dissertations/Horning_2001.pdf (accessed 24 September 2020).
5. Olchanski E., Burcat A. Decane oxidation in a shock tube. *International Journal of Chemical Kinetics*, 2006, vol. 38, no. 12, pp. 703–713. <https://doi.org/10.1002/kin.20204>
6. Zhukov V. P., Sechenov V. A., Starikovskii A. Yu. Autoignition of n-decane at high pressure. *Combustion and Flame*, 2008, vol. 153, no. 1–2, pp. 130–136. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2007.09.006>
7. Shen H. P. S., Steinberg J., Vanderover J., Oehlschlaeger M. A. A shock tube study of the ignition of n-heptane, n-decane, n-dodecane, and n-tetradecane at elevated pressures. *Energy & Fuels*, 2009, vol. 23, no. 5, pp. 2482–2489. <https://doi.org/10.1021/ef80110136>
8. Dean A. J., Penyazkov O. G., Sevruk K. L., Varatharajan B. Autoignition of surrogate fuels at elevated temperatures and pressures. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, vol. 31, no. 2, pp. 2481–2488. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2006.07.162>
9. Nie X. F., Li P., Zhang C. H., Xie W., Li C. S., Li X. Y. Shock tube study of n-decane ignition at low pressures. *Acta Mechanica Sinica*, 2012, vol. 28, no. 1, pp. 79–82. <https://doi.org/10.1007/s10409-011-0542-9>
10. Titova N. S., Torokhov S. A., Starik A. M. On kinetic mechanisms of n-decane oxidation. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2011, vol. 47, no. 2, pp. 129–146. <https://doi.org/10.1134/s0010508211020018>
11. Strozzi C., Ossman H., Tsuzuki K., Sotton J., Bellenoue M. Autoignition of n-decane and multi-component surrogates of kerosene in an optical Rapid Compression Machine. *Proceedings of 27th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*. Beijing, 2019, pp. 1–6.
12. Kumar K., Mittal G., Sung C. J. Autoignition of n-decane under elevated pressure and low-to-intermediate temperature conditions. *Combustion and Flame*, 2009, vol. 156, no. 6, pp. 1278–1288. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.01.009>
13. Leschevich V. V., Martynenko V. V., Penyazkov O. G., Sevrouk K. L., Shabunya S. I. Auto-ignitions of a methane/air mixture at high and intermediate temperatures. *Shock Waves*, 2016, vol. 26, no. 5, pp. 657–672. <https://doi.org/10.1007/s00193-016-0665-9>
14. Leschevich V. V., Penyazkov O. G., Shimchenko S. Yu. Ignition of Coal Microparticles in an Air Atmosphere and Their Influence on the Inflammation of Methane. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2020, vol. 93, no. 4, pp. 1004–1014. <https://doi.org/10.1007/s10891-020-02201-9>
15. Leschevich V. V., Penyazkov O. G., Fomin N. A., Shimchenko S. Yu. Visualization and analysis of the burning particles motion in combustion chamber of a rapid compression machine. *Journal of Flow Visualization and Image Processing*, 2016, vol. 23, no. 1–2, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1615/jflowvisimageproc.2016019010>
16. Gaydon A. G. *The spectroscopy of flames*. London, 1957. 279 p.
17. Doroshko M. V. High-temperature pyrolysis of propane and methane – the shock tube investigation. *High Temperature Material Processes: An International Quarterly of High-Technology Plasma Processes*, 2019, vol. 23, no. 2, pp. 165–179. <https://doi.org/10.1615/hightempmatproc.2019030409>

Информация об авторах

Лещевич Владимир Владимирович – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.leschevich@dnpiitmo.by

Пенязков Олег Глебович – академик, д-р физ.-мат. наук, директор. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: penyaz@dnpiitmo.by

Шимченко Сергей Юрьевич – науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sergey.shimchenko@gmail.com

Information about the authors

Leschevich Vladimir V. – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.leschevich@dnpiitmo.by

Penyazkov Oleg G. – Academician, D. Sc. (Physics and Mathematics), Director. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: penyaz@dnpiitmo.by

Shimchenko Sergey Yu. – Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sergey.shimchenko@gmail.com