

ISSN (Print) 2616-7182
ISSN (Online) 2663-1326



EURASIAN
NATIONAL
UNIVERSITY

Л.Н.Гумилев атындағы
Еуразия ұлттық университетінің
ХАБАРШЫСЫ

BULLETIN
of L.N.Gumilyov Eurasian
National University

№4 (125)/2018

ВЕСТНИК

Евразийского национального
университета имени Л.Н.Гумилева

МАТЕМАТИКА. ИНФОРМАТИКА. МЕХАНИКА
сериясы

MATHEMATICS. COMPUTER SCIENCE. MECHANICS
Series

Серия
МАТЕМАТИКА. ИНФОРМАТИКА. МЕХАНИКА

bulmathmc.enu.kz



ISSN (Print) 2616-7182
ISSN (Online) 2663-1326

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің

ХАБАРШЫСЫ

BULLETIN
of the L.N. Gumilyov Eurasian
National University

ВЕСТНИК
Евразийского национального
университета имени Л.Н. Гумилева

МАТЕМАТИКА. ИНФОРМАТИКА. МЕХАНИКА сериясы

MATHEMATICS. COMPUTER SCIENCE. MECHANICS Series

Серия **МАТЕМАТИКА. ИНФОРМАТИКА. МЕХАНИКА**

№4(125)/2018

1995 жылдан бастап шығады

Founded in 1995

Издается с 1995 года

Жылына 4 рет шығады

Published 4 times a year

Выходит 4 раза в год

Астана, 2018
Astana, 2018

БАС РЕДАКТОРЫ
ф.-м.ғ.д., проф
Темірғалиев Н. (Қазақстан)

Бас редактордың орынбасары **Жұбанышева А.Ж.**, PhD
(Қазақстан)
Бас редактордың орынбасары **Наурызбаев Н.Ж.**, PhD
(Қазақстан)

Редакция алқасы

Абакумов Е.В.	PhD, проф. (Франция)
Алексеева Л.А.	ф.-м.ғ.д., проф. (Қазақстан)
Алимхан Килян	PhD, проф. (Жапония)
Бекжан Турдыбек	PhD, проф. (Қытай)
Бекенов М.И.	ф.-м.ғ.к., доцент (Қазақстан)
Голубов Б.И.	ф.-м.ғ.д., проф. (Ресей)
Зунг Динь	ф.-м.ғ.д., проф. (Вьетнам)
Ибраев А.Г.	ф.-м.ғ.д., проф. (Қазақстан)
Иванов В.И.	ф.-м.ғ.д., проф. (Ресей)
Калиев И.А.	ф.-м.ғ.д., проф. (Ресей)
Кобельков Г.М.	ф.-м.ғ.д., проф. (Ресей)
Курина Г.А.	ф.-м.ғ.д., проф. (Ресей)
Марков В.В.	ф.-м.ғ.д., проф. (Ресей)
Мейрманов А.М.	ф.-м.ғ.д., проф. (Ресей)
Смелянский Р.Л.	ф.-м.ғ.д., проф. (Ресей)
Умирбаев У.У.	ф.-м.ғ.д., проф. (АҚШ)
Холщевникова Н.Н.	ф.-м.ғ.д., проф. (Ресей)
Шмайссер Ханс-Юрген	Хабилит. докторы, проф. (Германия)

Редакцияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Сәтпаев к-сі, 2, 408 бөлме.
Тел: (7172) 709-500 (ішкі 31-428). E-mail: vest_math@enu.kz

Жауапты хатшы, компьютерде беттеген
А. Нұрболат

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы.

МАТЕМАТИКА. ИНФОРМАТИКА. МЕХАНИКА сериясы

Меншіктенуші: ҚР БЖҒМ "Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті" ШЖҚ РМК
Мерзімділігі: жылына 4 рет.

Қазақстан Республикасының Ақпарат және коммуникациялар министрлігімен тіркелген.
27.03.2018ж. № 17000-ж тіркеу қуәлігі.

Тиражы: 25 дана

Типографияның мекенжайы: 010008, Қазақстан, Астана қ., Қажымұқан к-сі, 12/1,
тел: (7172)709-500 (ішкі 31-428).

EDITOR-IN-CHIEF

Prof., Doctor of Phys.-Math. Sciences

Temirgaliyev N. (Kazakhstan)

Deputy Editor-in-Chief

Zhubanysheva A.Zh., PhD (Kazakhstan)

Deputy Editor-in-Chief

Nauryzbayev N.Zh., PhD (Kazakhstan)

Editorial board

Abakumov E.V.	PhD, Prof. (France)
Alexeyeva L.A.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof. (Kazakhstan)
Alimhan Keylan	PhD, Prof. (Japan)
Bekzhan Turdybek	PhD, Prof. (China)
Bekenov M.I.	Candidate of Phys.-Math. Sciences, Assoc.Prof. (Kazakhstan)
Golubov B.I.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof.(Russia)
Dũng Dinh	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof.(Vietnam)
Ibrayev A.G.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof.(Kazakhstan)
Ivanov V.I.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof.(Russia)
Kaliev I.A.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof.(Russia)
Kobel'kov G.M.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof.(Russia)
Kurina G.A.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof.(Russia)
Markov V.V.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof.(Russia)
Meirmanov A.M.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof.(Russia)
Smelyansky R.L.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof.(Russia)
Umirbaev U.U.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof.(USA)
Kholshchevnikova N.N.	Doctor of Phys.-Math. Sciences, Prof. (Russia)
Schmeisser Hans-Juergen	Dr. habil., Prof. (Germany)

Editorial address: 2, Satpayev str., of. 408, Astana, Kazakhstan, 010008

Tel.: (7172) 709-500 (ext. 31-428)

E-mail: vest_math@enu.kz

Responsible secretary, computer layout:

A. Nurbolat

Bulletin of the L.N. Gumilyov Eurasian National University.

MATHEMATICS. COMPUTER SCIENCE. MECHANICS Series

Owner: Republican State Enterprise in the capacity of economic conduct "L.N. Gumilyov Eurasian National University" Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan

Periodicity: 4 times a year

Registered by the Ministry of Information and Communication of the Republic of Kazakhstan.

Registration certificate №17000-ж from 27.03.2018.

Circulation: 25 copies

Address of printing house: 12/1 Kazhimukan str., Astana, Kazakhstan 010008;

tel: (7172) 709-500 (ext.31-428).

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР
профессор, д.ф.-м.н.
Темиргалиев Н. (Казахстан)

Зам. главного редактора **Жубанышева А.Ж.**, PhD (Казахстан)

Зам. главного редактора **Наурызбаев Н.Ж.**, PhD (Казахстан)

Редакционная коллегия

Абакумов Е.В.	PhD, проф. (Франция)
Алексеева Л.А.	д.ф.-м.н., проф. (Казахстан)
Алимхан Килян	PhD, проф. (Япония)
Бекжан Турдыбек	PhD, проф. (Китай)
Бекенов М.И	к.ф.-м.н., доцент (Казахстан)
Голубов Б.И.	д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Зунг Динь	д.ф.-м.н., проф. (Вьетнам)
Ибраев А.Г.	д.ф.-м.н., проф. (Казахстан)
Иванов В.И.	д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Калиев И.А.	д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Кобельков Г.М.	д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Курина Г.А.	д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Марков В.В.	д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Мейрманов А.М.	д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Смелянский Р.Л.	д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Умирбаев У.У.	д.ф.-м.н., проф. (США)
Холщевникова Н.Н.	д.ф.-м.н., проф. (Россия)
Шмайссер Ханс-Юрген	Хабилит. доктор, проф. (Германия)

Адрес редакции: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2, каб. 408
Тел: (7172) 709-500 (вн. 31-428). E-mail: vest_math@enu.kz

Ответственный секретарь, компьютерная верстка
А. Нурболат

Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева.
Серия МАТЕМАТИКА. ИНФОРМАТИКА. МЕХАНИКА

Собственник: РГП на ПХВ "Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева" МОН РК

Периодичность: 4 раза в год.

Зарегистрирован Министерством информации и коммуникаций Республики Казакстан.

Регистрационное свидетельство №17000-ж от 27.03.2018г.

Тираж: 25 экземпляров. Адрес типографии: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Кажымукана, 12/1,

тел.: (7172)709-500 (вн.31-428).

**Л.Н. ГУМИЛЕВ АТЫНДАҒЫ ЕУРАЗИЯ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ. МАТЕМАТИКА. ИНФОРМАТИКА. МЕХАНИКА СЕРИЯСЫ,
№4(125)/2018**

МАЗМҰНЫ

МАТЕМАТИКА-ИНФОРМАТИКА	
<i>Темірғалиев Н.</i> Компьютерлік (есептеуіш) диаметр және функциялар теориясының ішкі мәселелері мәнмәтініндегі жуықтау және енгізу теориясы	8
<i>Кобельков Г.М.</i> Интегро-дифференциалдық теңдеулерді сандық шешудің бір әдісі жөнінде	69
<i>Малыхин В.И., Нұртазина Қ.Б.</i> Айқынсыздық жағдайдағы инвестициялық процесстерді математикалық талдау	75
<i>Оспанова А.Б., Тулеуов Б.И.</i> Raspberry Pi микрокомпьютерін Қазақстанды цифрландыруда тиімді пайдалану мүмкіндіктері	95
<i>Солодов А.П.</i> Синустар бойынша қатар қосындысының нөл маңайындағы асимптотикалық өзгерісі	108
<i>Холщевникова Н.Н.</i> Қосындылаудың регулярлық әдісі үшін жалғыздық жиыны	113
<i>Фарайзаде А.П., Шафи А.</i> Векторлық кеңістіктердегі Куратовский проблемасы туралы	117
МЕХАНИКА	
<i>Афонина Н.Е., Смахов Г.Д., Хмелевский А.Н.</i> Метанның жоғары температуралы тұтануы мен жануы	120

CONTENTS

MATHEMATICS-COMPUTER SCIENCE

<i>Temirgaliyev N.</i> Embedding and Approximation Theories in the Context of Computational (Numerical) Diameter and Internal Problems of the Theory of Functions	8
<i>Kobel'kov G.M.</i> On a Method for the Numerical Solution of Integro-Differential Equations	69
<i>Malykhin V.I., Nurtazina K.B.</i> Mathematical Analysis of Investment Processes In Uncertainty	75
<i>Ospanova A., Tuleuov B.</i> Perspectives of Use of Microcomputer Raspberry Pi in Effective Kazakhstan Digitalization	95
<i>Solodov A.P.</i> Asymptotic Behavior of the Sum of Sines Series in the Zero Neighborhood	108
<i>Kholshchevnikova N.N.</i> Sets of Uniqueness for Regular Methods of Summation	113
<i>Farajzadeh A.P., Shafie A.</i> On Kuratowski's Problem in Vector Spaces	117

MECHANICS

<i>Afonina N.E., Smekhov G.D., Hmelevskii A.N.</i> High-temperature Ignition and Combustion of Methane	120
--	-----

**ВЕСТНИК ЕВРАЗИЙСКОГО НАЦИОНАЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА
ИМЕНИ Л.Н.ГУМИЛЕВА. СЕРИЯ МАТЕМАТИКА. ИНФОРМАТИКА.
МЕХАНИКА, №4(125)/2018**

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА-ИНФОРМАТИКА

<i>Темиргалиев Н.</i> Теории вложений и приближений в контексте К(В)П и внутренних проблем теории функций	8
<i>Кобельков Г.М.</i> Об одном методе численного решения интегро-дифференциальных уравнений	69
<i>Малыхин В.И., Нуртазина К.Б.</i> Математический анализ инвестиционных процессов в условиях неопределенности	75
<i>Оспанова А.Б., Тулеуов Б.И.</i> Перспективы использования микрокомпьютера Raspberry Pi в эффективной цифровизации Казахстана	95
<i>Солодов А.П.</i> Асимптотическое поведение суммы ряда по синусам в окрестности нуля	108
<i>Холщевникова Н.Н.</i> Множества единственности для регулярных методов суммирования	113
<i>Фарайзаде А.П., Шафи А.</i> О проблеме Куратовского в векторных пространствах	117

МЕХАНИКА

<i>Афонина Н.Е., Сметов Г.Д., Хмелевский А.Н.</i> Высокотемпературное воспламенение и горение метана	120
--	-----

МЕХАНИКА MECHANICS

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Математика.
Информатика. Механика сериясы, 2018, том 125, №4, 120-124 беттер
<http://bulmathmc.enu.kz>, E-mail: vest_math@enu.kz

МРНТИ: 29.17.15

Н.Е. Афонина¹, Г.Д. Смехов², А.Н. Хмелевский³

¹²³ *Институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация*

³ *Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н. Е. Жуковского,
г. Жуковский, Моск. обл., Российская Федерация*

(E-mail: ¹ afonina@imec.msu.ru, ² smekhov@imec.msu.ru, ³ khmelevsky@imec.msu.ru)

Высокотемпературное воспламенение и горение метана

Аннотация: Приведены результаты численного моделирования процесса воспламенения метано-кислородных смесей, разбавленных азотом, в диапазоне температур (700-2500) К для различных составов и давлений начальной смеси. Указаны признаки воспламенения смесей и методика регистрации времени индукции. Определены нижние границы высокотемпературного диапазона, в котором воспламенение метана происходит в режиме цепного разветвления активных радикалов.

Ключевые слова: горючая смесь, воспламенение, время индукции, расчёт, метан, кислород, область воспламенения, температуры воспламенения, цепной разветвлённый процесс.

DOI: <https://doi.org/10.32523/2616-7182-2018-125-4-120-124>

Метан является основным компонентом природного газа и широко используется во многих технических устройствах. Это обуславливает постоянный интерес к исследованию его свойств с целью повышения эффективности и скорости его сгорания в этих устройствах. С другой стороны важно выяснить условия, при которых метан не должен воспламеняться, например, в открытом пространстве. Одним из основных свойств горючей смеси газа, включающей окислитель, является время задержки воспламенения (время индукции) смеси. Особый интерес представляет смесь, в которой окислителем является кислород и, в частности, воздух.

Окисление метана, как и других углеводородов, происходит в системе цепных реакций с участием активных частиц - атомов и радикалов. Цепные реакции были впервые введены в рассмотрение и изучены Н.Н. Семёновым. Описание цепных реакций и результаты их исследования приведены в монографии [1]. В водородно-кислородных смесях основной реакцией в процессе цепного разветвления активных радикалов является реакция



в которой на один исчезнувший в реакции монорадикал (атом H) образуется три монорадикала: OH и бирадикал O, эквивалентный двум монорадикалам. Эта реакция и другие происходят и в метано-кислородных средах и поэтому должны учитываться при горении метана. Но при окислении метана происходит специфическая реакция разветвления



в которой на один исчезнувший монорадикал CH_3 возникает, только два монорадикала (бирадикал O), поскольку другой образующейся частицей является молекула CH_3O . В результате коэффициент размножения радикалов в этой реакции оказывается меньше, чем в реакции (1) водородной схемы. Другим отличием является относительно более

медленное протекание этой реакции разветвления в сравнении с реакцией (1). Эти особенности обуславливают в случае горения метана менее яркое проявление свойств цепного разветвлённого процесса окисления, чем при горении водорода.

Механизм окисления метана с реакцией (2) действует, например, при температуре 2000 К и соответствует высокотемпературному (быстрому) воспламенению в режиме цепного разветвления радикалов. При температурах меньших 1000 К происходит медленное окисление метана, при котором черты цепного разветвлённого механизма отсутствуют. Для описания такого типа процессов Н.Н. Семёновым разработана теория реакций с вырожденным цепным разветвлением. В настоящем сообщении приводятся результаты численного моделирования процесса воспламенения метано-кислородных смесей, разбавленных азотом, с целью определения температурного диапазона, в котором осуществляется режим быстрого воспламенения этих смесей.

Химическая модель реагирующего газа включала 196 реакций с участием 32 компонентов, приведенная в работе [2]. Для расчёта изменения концентраций компонентов во времени использовалась система кинетических уравнений химически реагирующего многокомпонентного газа, предложенная и апробированная в НИИ механики МГУ [3, 4]. Начальный состав газа удобно отражать величиной содержащейся в нём относительной доли s метана и кислорода и коэффициентом избытка горючего f , определяемом отношением двух величин - отношения концентраций горючего и окислителя в рассматриваемой смеси к отношению этих величин в стехиометрическом составе, в стехиометрическом составе отношение концентраций $[CH_4]_{st} / [O_2]_{st} = \frac{1}{2}$. Если рассматривать относительный мольный состав смеси только из метана и кислорода и учесть, что при этом сумма их относительных мольных долей равна 1, то начальный состав смеси можно описать выражением

$$s \left(\frac{f}{2+f} CH_4 + \frac{2}{2+f} O_2 \right) + (1-s) N_2, \quad (3)$$

(по определению для стехиометрической смеси $f = 1$).

В работах [5-7], выполненных в НИИ механики МГУ, отражены результаты численного моделирования для расчёта времени индукции в водородно-кислородных смесях, удовлетворительно описывающих известные экспериментальные результаты. Разработанные при этом методики регистрации и расчёта времени индукции использованы при исследовании рассматриваемых метано-кислородных смесей.

Численное моделирование показало, что в метано-кислородных смесях на временных развёртках концентраций обнаруживаются максимумы концентраций радикалов CH_3 и OH . Образование отмеченных максимумов и начало резкого уменьшения концентрации метана можно считать признаками воспламенения. Возможным временем индукции следует считать время достижения максимумов и время, при котором остаётся некоторая часть начального значения концентрации метана. Для определённости в работе фиксировалось время, когда остаётся $\frac{1}{10}$ часть его исходного количества.

В расчётах рассматривалось три варианта начальных параметров смесей в области температур $(700-2500)^\circ$, в приведенной таблице указаны их значения. В первом варианте начальными параметрами газа являлись их значения в стандартном состоянии, во втором варианте параметры выбраны так, чтобы время индукции увеличивалось по отношению ко времени в первом варианте при изменении каждого параметра, в третьем варианте, наоборот, уменьшалось.

Таблица 1

Вариант смеси	$P, 1.013 \cdot 10^5 Pa$	s	f
1	1.0	0.15	0.3
2	0.5	0.1	2.0
3	2.0	0.3	0.3

На рис. 1а-1с приведены графики для первого варианта смеси, демонстрирующие временные развёртки компонентов CH_3, CH_4, OH и O_2 от времени при трёх температурах, указанных в подписях к рисункам. По осям X – время в секундах, по осям Y – относительные молярные доли концентраций компонентов. На кривой для CH_4 горизонтальным отрезком прямой показана $\frac{1}{10}$ часть начального значения концентрации этого компонента. На оси абсцисс вертикальными отрезками прямых показаны положения максимумов концентраций CH_3 и OH , а также положение фиксируемой концентрации CH_4 . Эти положения являются временами индукции по соответствующим признакам для указанных компонентов.

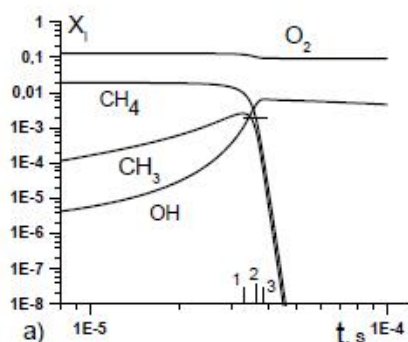


Рис.1а. Временные развёртки концентраций компонентов. Первый вариант начальных параметров смеси. Температура 2000 К.

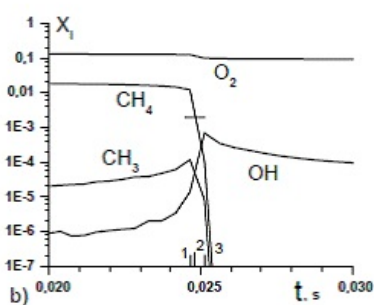


Рис.1в. Временные развёртки концентраций компонентов. Первый вариант начальных параметров смеси. Температура 1250 К.

Из рисунков видно, что в диапазоне температур $(2000 \sim 1250)^\circ K$ времена индукции по всем трём компонентам близки друг к другу, а значение времени индукции по CH_4 находится в промежутке между значениями по CH_3 и OH . Можно предположить, что при этих температурах окисление метана происходит с механизмом цепного разветвления активных радикалов. Однако на интервале температуры в $50^\circ K$ от $1250^\circ K$ до $1200^\circ K$ происходит кардинальное изменение процесса воспламенения в горючей смеси. Резкого уменьшения концентрации метана вблизи времени индукции по трём компонентам не происходит. Концентрация метана медленно уменьшается от начального значения и отметки в $\frac{1}{10}$ -ю часть начального значения совсем не достигает. Тогда можно считать,

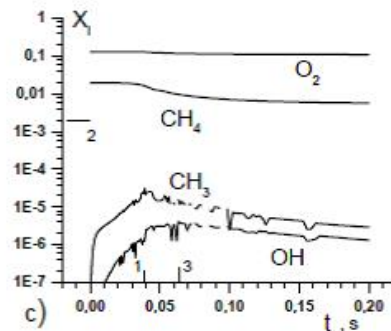


Рис.1с. Временные развёртки концентраций компонентов. Первый вариант начальных параметров смеси. Температура 1200 К.

что в этом интервале температур механизм цепного разветвления активных радикалов прекращается и возможно заменяется цепным вырожденным механизмом, отмеченном ранее. Для смесей 2 и 3 временные развёртки концентраций указанных компонентов аналогичны развёрткам, приведенным на рисунках. В смеси 2 отличие заключается в изменении положения интервала температуры в 50°K , в котором происходит смена режима воспламенения. В этой смеси это происходит в диапазоне от 1450°K до 1400°K . В смеси 3 смена режима воспламенения происходит, как и в смеси 1, в диапазоне от 1250°K до 1200°K . При температурах больших 2000°K режим воспламенения для всех составов начальной смеси соответствует механизму цепного разветвления радикалов.

Таким образом, полученные при численном моделировании температуры 1250°K и 1450°K можно рассматривать как нижние границы высокотемпературного диапазона, в котором воспламенение метана происходит в режиме цепного разветвления радикалов.

Работа выполнена в соответствии с планом исследований НИИ механики МГУ при частичной финансовой поддержке гранта Министерства Образования и Науки РФ (договор №14.G39.31.0001 от 13.02.2017г.) и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты: № 16-29-01092 и № 18-01-00883).

Список литературы

- 1 Кондратьев В.Н., Никитин Е.Е. Кинетика и механизм газозафазных реакций. -М.:Наука, 1974. -558 с.
- 2 Бочков М.В., Ловачёв Л.А., Четверушкин Б.Н. Химическая кинетика образования NO_x при горении метана в воздухе// Матем. моделирование.-1992. -Т. 4. -№ 9. -С. 3-35.
- 3 Смехов Г.Д. Эффективные алгоритмы расчета состояний многокомпонентного реагирующего газа в газовой динамике//Матем. моделирование. -1993. -Т.5. -№2. -С.104-118.
- 4 Левин В.А., Смехов Г.Д., Хмелевский А.Н. Численное моделирование образования окиси азота при горении метано-воздушных смесей// Физика горения и взрыва. -1997. -Т.33. -№1. -С.12-23.
- 5 Смехов Г.Д., Ибрагимова Л.Б., Каргач С.П., Скребков О.В., Шаталов О.П. Численное моделирование воспламенения водородно-кислородной смеси с учётом электронно-возбуждённых компонентов// Теплофизика высоких температур. -2007. -Т.45. -№3. -С.440-452.
- 6 Smekhov G.D., Shatalov O.P. Modeling of ignition and combustion of hydro-genoxygen mixtures behind the front of the shock wave //Book of Proceedings 27th international Symposium on Shock Waves 19-24 July 2009, St.Petersburg, Russia: Saint-Petersburg, 2009. P. 428.
- 7 Смехов Г.Д., Шаталов О.П. Исследование воспламенения водородно-кислородных смесей в диапазоне температур 700-2500 К // Теплофизика высоких температур. -2016. -Т.54. -№1. -С. 1-11

Н.Е. Афолина¹, Г.Д. Смехов¹, А.Н. Хмелевский^{1,2}

¹ М.В. Ломоносов атындагы ММУнің Механика институты, Мәскеу, Ресей Федерациясы
² Профессор Н.Е. Жуковский атындагы Орталық аэродинамикалық институт, Мәскеу, Ресей Федерациясы

Метанның жоғары температуралы тұтануы (жалындануы) мен жануы

Аннотация: Азотпен араластырылған метан-оттекті қоспаның (700 – 2500) температурасы диапазонында әртүрлі құрам және бастапқы қоспа қысымы үшін тұтану (жалындану) процессінің сандық моделінің нәтижелері

берілген. Қоспа тұтану белгілері көрсетіліп, индукция уақытын тіркеу әдісі берілген. Активті радикалдардың тізбектей тармақтануы тәртібі негізінде метан тұтануының жоғары температура диапазонының төменгі шекаралары анықталды.

Түйін сөздер жаңғыш қоспа, тұтану, индукция уақты, есептеу, метан, оттегі, тұтану өрісі, тұтану температурасы, тізбекті тармақталған процесс.

N.E. Afonina¹, G.D. Smekhov¹, A.N. Khmelevsky^{1,2}

¹ Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

² Central Aerohydrodynamic Institute, Moscow, Russian Federation

High Temperature Inflammation and Combustion of Methane

Abstract. The results of numerical simulation of the process of ignition of methane-oxygen mixtures diluted with nitrogen in the temperature range (700-2500) K for various compositions and pressures of the initial mixture are presented. The signs of ignition of the mixtures and the method of recording the induction time are indicated. The lower boundaries of the high-temperature range, in which the ignition of methane occurs in the chain branching mode of active radicals, are determined.

Keywords: combustible mixture, ignition, induction time, calculation, methane, oxygen, ignition area, ignition temperature, chain branched process.

References

- 1 Kondrat'ev V.N., Nikitin E.E. Kinetika i mehanizm gazofaznyh reakcij [Kinetics and mechanism of gas-phase reactions] (Nauka, Moscow, 1974, 558 p.). [in Russian]
- 2 Bochkov M.V., Lovachev L.A., Chetverushkin B.N. Chemical kinetics of NO_x formation in methane-air combustion, *Matem. Mod.*, 4(9), 3-36(1992).
- 3 Smekhov G.D. Effective algorithms for determination states of multicomponent reactive gas in gasdynamic, *Matem. Mod.*, 5(2), 104-118(1993).
- 4 Levin V.A., Smehov G.D., Hmelevskij A.N. Chislennoe modelirovanie obrazovaniya okisi azota pri gorenii metanovozdushnyh smesej [Numerical simulation of the formation of nitric oxide during combustion of ethan-air mixtures], *Fizika gorenija i vzryva* [Physics of combustion and explosion], 33(1), 12-23(1997). [in Russian]
- 5 Smehov G.D., Ibragimova L.B., Kargach S.P., Skrebkov O.V., Shatalov O.P. Chislennoe modelirovanie vospaleniya vodorodno-kislorodnoj smesi s uchjotom jelektronno-vozbuzhdonnyh komponentov [Numerical simulation of the ignition of the hydrogen-oxygen mixture taking into account electronically excited components], *Teplofizika vysokih temperatur* [Thermal physics of high temperatures], 45(3), 440-452(2007). [in Russian]
- 6 Smekhov G.D., Shatalov O.P. Modeling of ignition and combustion of hydro-genooxygen mixtures behind the front of the shock wave //Book of Proceedings 27th international Symposium on Shock Waves 19-24 July 2009, St.Petersburg, Russia: Saint-Petersburg, 2009. P. 428.
- 7 Smekhov G.D., Shatalov O.P. Investigation of ignition of hydrogen-oxygen mixtures within the range of temperatures from 700 to 2500 K, *TVT*, 54(1), 81-91(2016).

Сведения об авторах:

Афонина Н.Е. – Старший научный сотрудник Института механики МГУ имени М.В. Ломоносова, 119192, Москва, Российская Федерация.

Смехов Г.Д. – Ведущий научный сотрудник Института механики МГУ имени М.В. Ломоносова, 119192, Москва, Российская Федерация.

А.Н. Хмелевский. – Ведущий научный сотрудник Института механики МГУ имени М.В. Ломоносова, 119192, Москва, Российская Федерация; Ведущий научный сотрудник Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н. Е. Жуковского, г. Жуковский, Моск.обл., Российская Федерация

Afonina N.E. – Senior Researcher of Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation.

Smekhov G.D. – Leading Researcher of Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation.

Khmelevsky A.N. – Leading Researcher of Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University. Leading Researcher Central Aerohydrodynamic Institute, Moscow, Russian Federation.

Поступила в редакцию 21.11.2018

**«Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің хабаршысы. Математика.
Информатика. Механика сериясы» журналына жіберілетін жұмыстарға қойылатын
талаптар**

Журнал редакциясы авторларға осы нұсқаулықпен толық танысып, журналға мақала әзірлеу мен дайын мақаланы журналға жіберу кезінде басшылыққа алуды ұсынады. Бұл нұсқаулық талаптарының орындалмауы сіздің мақалаңыздың жариялануын кідіртеді.

1. Автордың қолжазбаны редакцияға жіберуі мақала авторының басып шығарушы, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетіне мақаласын басуға келісімін және кез келген шетел тіліне аударылып қайта басылуына келісімін білдіреді.

2. Баспаға (барлық жариялаушы авторлардың қол қойылған қағаз нұсқасы және электронды нұсқасында) журналдың түпнұсқалы стильдік файлының міндетті қолданысымен LaTeX баспа жүйесінде дайындалған Tex- пен Pdf-файлындағы жұмыстар ұсынылады. Стильдік файлды *bulmathmc.enu.kz* журнал сайтынан жүктеп алуға болады.

3. Мақаланың көлемі 6 беттен кем және 18 беттен артық болмауы тиіс. Талап деңгейінен асқан жұмыстар редакциялық алқа отырысында қаралып, баспаға ерекше жағдайда ғана рұқсат етіледі.

4. Жұмыстың мәтіні ХҒТАР (Халықаралық ғылыми-техникалық ақпарат рубрикаторы) кодының көрсеткішімен басталып, кейін автор(лар)дың аты және тегі, жұмыс орнының толық атауы, қаласы, мемлекеті, E-mail-ы, мақаланың толық атауы, аннотациясы көрсетіледі. Аннотация 150-200 сөз көлемінде болуы тиіс, сонымен қатар мәтінде күрделі есептік формулалар болмауы, мақаланың толық аты қайталанбауы, жұмыстың мәтіні мен әдебиеттер тізімінде көрсетілетін сілтемелер болмауы керек. Аннотация мақаланың ерекшеліктерін көрсететін және оның құрылымын (кіріспе, есептің қойылымы, мақсаты, тарихы, зерттеу әдістері, нәтижелер және олардың талқылаулары, қорытынды) сақтайтын мақаланың қысқаша мазмұны болуы тиіс.

5. Жұмыстың мәтінінде кездесетін таблицалар мәтіннің ішінде жеке нөмірленіп, мәтін көлемінде сілтемелер түрінде көрсетілуі керек. Суреттер мен графиктер PS, PDF, TIFF, GIF, JPEG, BMP, PCX форматындағы стандарттарға сай болуы керек. Нүктелік суреттер кеңейтілімі 600 dpi кем болмауы қажет. Суреттердің барлығы да айқын әрі нақты болуы керек.

6. Жұмыста қолданылған әдебиеттер тек жұмыста сілтеме жасалған түпнұсқалық көрсеткішке сай (сілтеме беру тәртібінде немесе ағылшын әліпбиі тәртібі негізінде толтырылады) болуы керек. Баспадан шықпаған жұмыстарға сілтеме жасауға тиым салынады.

Сілтемені беруде автор қолданған әдебиеттің бетінің нөмірін көрсетпей, келесі нұсқаға сүйеніңіз дұрыс: тараудың номері, бөлімнің номері, тармақтың номері, теораманың номері (лемма, ескерту, формуланың және т.б.) номері көрсетіледі. Мысалы: «... қараңыз . [3; § 7, лемма 6]», «...қараңыз [2; 5 теоремадағы ескерту]». Бұл талап орындалмаған жағдайда мақаланы ағылшын тіліне аударғанда сілтемелерде қателіктер туындауы мүмкін.

Қолданылаған әдебиеттер тізімін рәсімдеу мысалдары

1 Воронин С. М., Карацуба А. А. Дзета-функция Римана. –М: Физматлит, –1994, –376 стр. – **кітап**

2 Баилов Е. А., Сихов М. Б., Темиргалиев Н. Об общем алгоритме численного интегрирования функций многих переменных // Журнал вычислительной математики и математической физики –2014. –Т.54. № 7. –С. 1059-1077. - **мақала**

3 Жубанышева А.Ж., Абикенова Ш. О нормах производных функций с нулевыми значениями заданного набора линейных функционалов и их применения к поперечниковым задачам // Функциональные пространства и теория приближения функций: Тезисы докладов Международной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика С.М.Никольского, Москва, Россия, 2015. – Москва, 2015. –С.141-142. – **конференция еңбектері**

4 Нургазина К. Рыцарь математики и информатики. –Астана: Каз.правда, 2017. 19 апреля. –С.7. – **газеттік мақала**

5 Кыров В.А., Михайличенко Г.Г. Аналитический метод вложения симплектической геометрии // Сибирские электронные математические известия –2017. –Т.14. –С.657-672. doi: 10.17377/semi.2017.14.057. – URL: <http://semr.math.nsc.ru/v14/p657-672.pdf>. (дата обращения: 08.01.2017). - **электронды журнал**

7. Әдебиеттер тізімінен соң автор өзінің библиографиялық мәліметтерін орыс және ағылшын тілінде (егер мақала қазақ тілінде орындалса), қазақ және ағылшын тілінде (егер мақала орыс тілінде орындалса), орыс және қазақ тілінде (егер мақала ағылшын тілінде орындалса) жазу қажет. Соңынан транслиттік аударма мен ағылшын тілінде берілген әдебиеттер тізімінен соң әр автордың жеке мәліметтері (қазақ, орыс, ағылшын тілдерінде – ғылыми атағы, қызметтік мекенжайы, телефоны, e-mail-ы) беріледі.

8. *Редакцияның мекенжайы:* 010008, Қазақстан, Астана қаласы, Қ.Сәтпаев көшесі, 2, Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Бас ғимарат, 408-кабинет. Телефоны: (7172) 709-500 (ішкі 31-428). E-mail: vest_math@enu.kz. Сайт: bulmathmc.enu.kz.

Provision on articles submitted to the journal
"Bulletin of L.N. Gumilyov Eurasian National University.
Mathematics. Computer Science. Mechanics Series"

The journal editorial board asks the authors to read the rules and adhere to them when preparing the articles, sent to the journal. Deviation from the established rules delays the publication of the article.

1. Submission of articles to the scientific publication office means the authors' consent to the right of the Publisher, L.N. Gumilyov Eurasian National University, to publish articles in the journal and the re-publication of it in any foreign language.

2. The scientific publication office accepts the article (in electronic and printed, signed by the author) in Tex- and Pdf-files, prepared in the LaTeX publishing system with mandatory use of the original style log file. The style log file can be downloaded from the journal website *bulmathmc.enu.kz*.

3. The volume of the article should not exceed 18 pages (from 6 pages). The article, exceeding this volume is accepted for publication in exceptional cases by a special decision of the journal Editorial Board.

4. The text of the article begins with the IRSTI (International Rubricator of Scientific and Technical Information), then followed by the Initials and Surname of the author (s); full name of organization, city, country; E-mail of the author (s); the article title; abstract. Abstract should consist of 150-250 words, it should not contain cumbersome formulas, the content should not repeat the article title, abstract should not contain references to the text of the article and the list of literature), abstract should be a brief summary of the article content, reflecting its features and preserving the article structure - introduction, problem statement, goals, history, research methods, results with its discussion, conclusion.

5. Tables are included directly in the text of the article; it must be numbered and accompanied by a reference to them in the text of the article. Figures, graphics should be presented in one of the standard formats: PS, PDF, TIFF, GIF, JPEG, BMP, PCX. Bitmaps should be presented with a resolution of 600 dpi. All details must be clearly shown in the figures.

6. The list of literature should contain only those sources (numbered in the order of quoting or in the order of the English alphabet), which are referenced in the text of the article. References to unpublished issues, the results of which are used in evidence, are not allowed. Authors are recommended to exclude the reference to pages when referring to the links and guided by the following template: chapter number, section number, paragraph number, theorem number (lemmas, statements, remarks to the theorem, etc.), number of the formula. For example, "..., see [3, § 7, Lemma 6]"; "..., see [2], a remark to Theorem 5". Otherwise, incorrect references may appear when preparing an English version of the article.

Template

1 Воронин С. М., Карацуба А. А. Дзета-функция Римана. -М: Физматлит, -1994, -376 стр.-**book**

2 Баилов Е. А., Сихов М. Б., Темиргалиев Н. Об общем алгоритме численного интегрирования функций многих переменных // Журнал вычислительной математики и математической физики -2014. -Т.54. № 7. -С. 1059-1077. - **journal article**

3 Жубанышева А.Ж., Абикенова Ш. О нормах производных функций с нулевыми значениями заданного набора линейных функционалов и их применения к поперечниковым задачам // Функциональные пространства и теория приближения функций: Тезисы докладов Международной конференции, посвященная 110-летию со дня рождения академика С.М.Никольского, Москва, Россия, 2015. - Москва, 2015. -С.141-142. - - **Conferences proceedings**

4 Нуртазина К. Рыцарь математики и информатики. -Астана: Каз.правда, 2017. 19 апреля. -С.7. **newspaper articles**

5 Кыров В.А., Михайличенко Г.Г. Аналитический метод вложения симплектической геометрии // Сибирские электронные математические известия -2017. -Т.14. -С.657-672. doi: 10.17377/semi.2017.14.057. - URL: <http://semr.math.nsc.ru/v14/p657-672.pdf>. (дата обращения: 08.01.2017). - **Internet resources**

7. At the end of the article, after the list of references, it is necessary to indicate bibliographic data in Russian and English (if the article is in Kazakh), in Kazakh and English (if the article is in Russian) and in Russian and Kazakh languages (if the article is English language). Then a combination of the English-language and transliterated parts of the references list and information about authors (scientific degree, office address, telephone, e-mail - in Kazakh, Russian and English) is given.

8. *Address:* 010008, Republic of Kazakhstan, Astana, Satpayev St., 2., L.N. Gumilyov Eurasian National University, Main Building, room 408). *E-mail:* *vest_math@enu.kz*. *Сайт:* *bulmathmc.enu.kz*.

Правила представления работ в журнал
"Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н.Гумилева.
Серия Математика. Информатика. Механика"

Редакция журнала просит авторов ознакомиться с правилами и придерживаться их при подготовке работ, направляемых в журнал. Отклонение от установленных правил задерживает публикацию статьи.

1. Отправление статьи в редакцию означает согласие автора (авторов) на право Издателя, Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева, издания статьи в журнале и переиздания их на любом иностранном языке.

2. В редакцию (в бумажном виде, подписанном всеми авторами и в электронном виде) представляются Tex- и Pdf-файлы работы, подготовленные в издательской системе LaTeX, с обязательным использованием оригинального стилевого файла журнала. Стилиевой файл можно скачать со сайта журнала *bul-mathmc.enu.kz*.

3. Объем статьи не должен превышать 18 страниц (от 6 страниц). Работы, превышающие указанный объем, принимаются к публикации в исключительных случаях по особому решению Редколлегии журнала.

4. Текст работы начинается с рубризатора МРНТИ (Международный рубризатор научно-технической информации), затем следуют инициалы и фамилия автора(ов), полное наименование организации, город, страна, E-mail автора(ов), заглавие статьи, аннотация. Аннотация должна состоять из 150-250 слов, не должна содержать громоздкие формулы, по содержанию не должна повторять название статьи, не должна содержать ссылки на текст работы и список литературы, должна быть кратким изложением содержания статьи, отражая её особенности и сохранять структуру статьи - введение, постановка задачи, цели, история, методы исследования, результаты с их обсуждением, заключение, выводы.

5. Таблицы включаются непосредственно в текст работы, они должны быть пронумерованы и сопровождаться ссылкой на них в тексте работы. Рисунки, графики должны быть представлены в одном из стандартных форматов: PS, PDF, TIFF, GIF, JPEG, BMP, PCX. Точечные рисунки необходимо выполнять с разрешением 600 dpi. На рисунках должны быть ясно переданы все детали.

6. Список литературы должен содержать только те источники (пронумерованные в порядке цитирования или в порядке английского алфавита), на которые имеются ссылки в тексте работы. Ссылки на неопубликованные работы, результаты которых используются в доказательствах, не допускаются.

Авторам рекомендуется при оформлении ссылок исключить упоминание страниц и руководствоваться следующим шаблоном: номер главы, номер параграфа, номер пункта, номер теоремы (леммы, утверждения, замечания к теореме и т.п.), номер формулы. Например, "..., см. [3; § 7, лемма 6]"; "..., см. [2; замечание к теореме 5]". В противном случае при подготовке англоязычной версии статьи могут возникнуть неверные ссылки.

Примеры оформления списка литературы

1 Воронин С. М., Карацуба А. А. Дзета-функция Римана. -М: Физматлит, -1994, -376 стр. - **книга**

2 Баилов Е. А., Сихов М. Б., Темиргалиев Н. Об общем алгоритме численного интегрирования функций многих переменных // Журнал вычислительной математики и математической физики -2014. -Т.54. № 7. -С. 1059-1077. - **статья**

3 Жубанышева А.Ж., Абикенова Ш. О нормах производных функций с нулевыми значениями заданного набора линейных функционалов и их применения к поперечниковым задачам // Функциональные пространства и теория приближения функций: Тезисы докладов Международной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения академика С.М.Никольского, Москва, Россия, 2015. - Москва, 2015. -С.141-142. - **труды конференции**

4 Нургазина К. Рыцарь математики и информатики. -Астана: Каз.правда, 2017. 19 апреля. -С.7. - **газетная статья**

5 Кыров В.А., Михайличенко Г.Г. Аналитический метод вложения симплектической геометрии // Сибирские электронные математические известия -2017. -Т.14. -С.657-672. doi: 10.17377/semi.2017.14.057. - URL: <http://semr.math.nsc.ru/v14/p657-672.pdf>. (дата обращения: 08.01.2017). - **электронный журнал**

7. После списка литературы, необходимо указать библиографические данные на русском и английском языках (если статья оформлена на казахском языке), на казахском и английском языках (если статья оформлена на русском языке) и на русском и казахском языках (если статья оформлена на английском языке). Затем приводится комбинация англоязычной и транслитерированной частей списка литературы и сведения по каждому из авторов (научное звание, служебный адрес, телефон, e-mail - на казахском, русском и английском языках).

8. Адрес редакции: 010008, Казахстан, г. Астана, ул. Сатпаева, 2, Евразийский национальный университет имени Л.Н.Гумилева, учебно-административный корпус, каб. 408. Тел: (7172) 709-500 (вн. 31-428). E-mail: vest_math@enu.kz. Сайт: bulmathmc.enu.kz.

Редакторы: Н. Темірғалиев

Шығарушы редактор, дизайн: А. Нұрболат

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің
хабаршысы. Математика. Информатика. Механика сериясы.
- 2018. 4(125)- Астана: ЕҰУ. 128-б.
Шартты б.т. - 16. Таралымы - 25 дана.

Мазмұнына типография жауап бермейді

Редакция мекен-жайы: 010008, Қазақстан Республикасы, Астана қ.,
Сәтпаев көшесі, 2.

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті
Тел.: (8-717-2) 70-95-00(ішкі 31-428)

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университетінің баспасында басылды