

РОЗДІЛ 2**ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

УДК 536.46+534.222.2

А.В. Бондаренко², В.Э. Волков¹, М.В. Максимов²¹ - Одеська національна академія харчових технологій, вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082² - Одеський національний політехнічний університет, пр. Шевченка, 1, м. Одеса, 65044**НЕСТІЙКІСТЬ ФАКЕЛЬНОГО ПОЛУМ'Я ТА УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ ГОРІННЯ В ТОПЦІ**

Зроблено дослідження розвитку нестійкості факельного горіння і перетворення ламінарного факела в турбулентний. Доведено, що ефекти в'язкості і стиснення середовища надають стабілізуючий вплив на газовий факел. Вивчення аеродинаміки окремого факелу служить теоретичною основою технології спалювання палива в камерах згорання та управління процесом горіння в топках.

Ключові слова: факел, полум'я, горіння, нестійкість, управління.

А.В. Бондаренко², В.Э. Волков¹, М.В. Максимов²¹ - Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, 65082² - Одесский национальный политехнический университет, пр. Шевченко, 1, г. Одесса, 65044**НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ФАКЕЛЬНОГО ПЛАМЕНИ И УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ ГОРЕНИЯ В ТОПКЕ**

Произведено исследование развития неустойчивости факельного горения и преобразования ламинарного факела в турбулентный. Доказано, что эффекты вязкости и сжимаемости среды оказывают стабилизирующее влияние на газовый факел. Изучение аэродинамики отдельного факела служит теоретической основой технологии сжигания топлива в камерах сгорания и управления процессом горения в топках.

Ключевые слова: факел, пламя, горение, неустойчивость, управление.

I. ВВЕДЕНИЕ

Проблема гидродинамической устойчивости волн горения рассмотрена в ряде работ как для разрывной модели фронта пламени, распространяющегося в идеальной несжимаемой [1,2] или сжимаемой [3–5] среде, так и для модели пламени конечной протяженности [6,7], распространяющегося в вязкой несжимаемой среде. В последнем случае учитывается непрерывный характер распределения всех термо- и газодинамических параметров внутри пламенной зоны.

Решение проблемы устойчивости пламени позволяет оценить возможность перехода нормального горения в дефлаграционный взрыв или в детонацию, а также приближенно рассчитать длину преддетонационного участка [5,8,9]. Последний факт создает предпосылки для принципиально нового подхода к управлению потенциально взрывоопасными объектами с целью поддержания их во взрывобезопасном состоянии [9–11].

Однако решение проблемы гидродинамической устойчивости пламени представляет практический интерес не только для волн горения, распространяющихся в горючих газовых (и иных)

средах, но и для факельного горения, т.е. горения в потоке [12,13]. Впервые эта проблема поставлена в работе [14]. Решению этой проблемы и применению полученных результатов к управлению сжиганием топлива в топках и камерах сгорания посвящено настоящее исследование.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Как следует из работ [1–7], горение подавляющего большинства газовых смесей при распространении пламени в открытом пространстве неустойчиво практически для всех случаев, представляющих интерес как для техники сжигания, так и для вопросов пожаро- и взрывобезопасности. Однако, теоретически рассчитанная [6,7] длина волны λ_m максимально быстро нарастающего со временем возмущения пламени, при распространении горения в плоском канале или в круглой трубе может быть меньше ширины канала или диаметра трубы. В этом случае, очевидно, развитие двумерной (трехмерной) неустойчивости невозможно. Так как пламя, – опять-таки во всех практически важных случаях горения газовых смесей, – неустойчиво по отношению к одномер-

ным возмущениям, то происходит затухание пламени. При этом соответствующие ширина канала или диаметр трубы приобретают смысл гасящего расстояния [15,16].

Газовые факелы разделяют на ламинарные и турбулентные [12,13]. Если в поле течения факела происходит переход от ламинарного течения к турбулентному, то образуется так называемый «переходный факел» [12], в котором на различных участках сочетаются ламинарная и турбулентная формы движения газа. Исключая из рассмотрения последнее явление (мало изученное и редкое), рассмотрим только две формы факельного горения, – ламинарное и турбулентное, – а также возможность перехода от первой формы ко второй.

Задача о гидродинамической устойчивости пламени ламинарного факела принципиально мало отличается от задачи о гидродинамической устойчивости волны пламени, распространяющейся в открытом пространстве, в плоском канале или в круглой трубе, так как во всех случаях распространение возмущений экспоненциального типа рассматривается в системе координат, связанной с самим фронтом пламени.

Модель ламинарного факела предполагает наличие «холодного конуса», ограниченного фронтом пламени. При этом при решении задачи об устойчивости фронт пламени – с учетом пространственных масштабов – должен рассматриваться как зона конечной протяженности [6,7], а среда (горючая смесь и продукты сгорания) предполагается вязкой и несжимаемой. Краевые условия у основания и вершины конуса пламени не могут оказать существенное влияние на развитие малых возмущений, как и в задачах о распространении волн горения в каналах или трубах [17], хотя волновой спектр возмущений дискретизируется.

Результатом развития неустойчивости волны горения является ячеистая структура пламени [6,7]. Доказано, что основным фактором, стабилизирующим процесс нормального горения, являются вязкость и эффект изменения протяженности зоны горения под влиянием возмущений [6,7]. Сжимаемость среды также оказывает на пламя стабилизирующее воздействие [3-5]. Автотурбулизация и самоускорение пламени могут привести к переходу медленного горения во взрыв [5,8,9].

Вязкость и изменение протяженности зоны пламени под влиянием возмущений остаются главными стабилизирующими эффектами и для ламинарного факела. При автотурбулизации факела в результате развития неустойчивости самоускорение пламени и переход горения во взрыв невозможны, так как и скорость нормального факельного горения u_n , и скорость горения в турбулентном факеле фактически определяются скоростью u_0 подачи горючей смеси через насадку, а не внутренними процессами в пламенной зоне. Однако форма факела и интегральные параметры процесса горения (температура горения, удельное тепловыделение при реакции, степень выгорания

топлива) могут существенно изменяться по сравнению с ламинарным режимом.

Теоретически получены значения критического числа Рейнольдса

$$\text{Re}_\lambda^* = \frac{\lambda_m \nu}{u_n}, \quad (1)$$

вычисленного по скорости нормального (ламинарного) горения u_n , по величине ν коэффициента кинематической вязкости исходной горючей смеси и по длине волны λ_m максимально быстро нарастающего со временем возмущения. Эти значения количественно совпадают с данными экспериментов как для быстрогорящих (кислородных) [18,19], так и для медленногорящих (воздушных) смесей [20], что служит убедительным аргументом в пользу построенной теории.

Применение теории гидродинамической устойчивости пламени [1–7] к факельному горению газов [12,13] и исследование возможного развития неустойчивых возмущений требует более детального рассмотрения геометрии ламинарного факела.

Известно, что если

$$u_0 \gg u_n, \quad (2)$$

т.е. если скорость струи горючей смеси существенно превышает скорость нормального горения, то для высоты факельного конуса l_ϕ справедлива следующая оценка

$$l_\phi \leq \frac{d_0 u_0}{u_n}, \quad (3)$$

где d_0 – диаметр насадки.

Иначе говоря

$$\bar{l}_\phi \leq \frac{u_0}{u_n}, \quad (4)$$

где $\bar{l}_\phi = \frac{l_\phi}{d_0}$ есть безразмерная высота (длина) факела.

При известной величине l_ϕ длина Λ образующей конуса ламинарного пламени может быть вычислена из геометрических соображений по формуле

$$\Lambda = \sqrt{l_\phi^2 + \frac{d_0^2}{4}} \quad (5)$$

Возможность развития неустойчивости и перехода процесса факельного горения к турбулентности определяется соотношением между длиной волны λ_m максимально быстро нарастающего со временем возмущения, алгоритм определения которой приведен в работах [12,13], и длиной Λ образующей конуса пламени. Возможны три принципиально различные ситуации.

Если

$$\lambda_m > \Lambda, \quad (6)$$

то неустойчивость не имеет места (возмущения с неустойчивыми длинами волн не могут реализоваться из-за ограниченности длины фронта пламени) и автотурбулизации факельного горения не происходит.

Если

$$\lambda_m \approx \Lambda, \quad (7)$$

то неустойчивость, скорее всего, проявляется не в автотурбулизации пламени, а в искажении геометрической формы его фронта. Фронт пламени искривляется, принимая в плоском сечении дугообразные формы, при этом геометрические параметры дуг определяются длиной волны λ_m . Однако само пламя остается ламинарным. «Холодный конус» в этом случае принимает тюльпановидную форму, причем максимальный поперечный размер «тюльпана» ненамного превосходит диаметр насадка d_0 .

И, наконец, если

$$\lambda_m \leq \Lambda, \quad (8)$$

то пламя неустойчиво и факел становится турбулентным, а его границы – «размытыми». Максимальный поперечный размер турбулентного факела может существенно превосходить диаметр насадка d_0 .

Формально турбулентный факел имеет такую же структуру, как ламинарный. Факел состоит из трех зон: холодного конуса «1», фронта (зоны) пламени «2» и зоны обратных токов «3», слабо влияющей на факельный процесс в целом. Однако фактические различия между ламинарным и турбулентным факелами весьма существенны.

Принципиальное отличие ламинарного факела от турбулентного состоит в том, что из-за наличия в аэродинамической структуре потока турбулентных вихрей и пульсаций фронт турбулентного пламени теряет четкие границы. Геометрия и размеры турбулентного факела в сравнении с факелом ламинарным определяются совершенно иначе [12,13].

Отметим, что (максимальный) поперечный размер турбулентного факела и его геометрическая форма определяются, в первую очередь, степенью (масштабом) турбулентности [12,13], т.е. параметром, который напрямую зависит от длины волны λ_m максимально быстро нарастающего со временем возмущения фронта пламени. Если турбулентность слабая и мелкомасштабная, то форма турбулентного факела напоминает тюльпановидный фронт пламени с «размытыми» границами. В противном случае форма факела примерно также тюльпановидная, но границы «четкие», а сам факел может быть существенно вытянут в высоту (в длину).

Рассмотрим проблему управления процессом горения в топке.

Топка (камера сгорания) может иметь различные размеры и форму – параметры, задаваемые инженерами-теплотехниками. Однако общая схема любой топки для сжигания газовых смесей достаточно проста: на передней стенке – фронте – топки расположены горелки (у некоторых топков два фронта расположены друг против друга); в противоположной фронту (задней) стенке обычно находится отверстие (выходное окно, сопло) для выхода продуктов сгорания.

Процесс сжигания топлива в отдельно взятой газовой горелке представляет собой факельное горение. В камерах сгорания, как правило, сжигание топлива осуществляется в нескольких горелках, которые могут иметь различные формы устья и взаимное расположение. При этом создается система взаимодействующих факельных пламеней, которая, так или иначе, может быть отнесена к одному из двух (принципиально возможных) типов:

1) взаимодействие факелов слабое (или вообще отсутствует): имеет место так называемый «режим разомкнутого горения» [14], при котором элементарные фронты пламени сохраняют свою индивидуальность;

2) взаимодействие факелов настолько сильное, что образуется единый составной (сомкнутый) факел [14]: имеет место «режим сомкнутого горения» [14], при котором элементарные фронты пламени не сохраняют свою индивидуальность на всем протяжении факела (они могут сохранять ее лишь вблизи устья течения).

В последнем случае на некотором расстоянии от передней стенки топки происходит смыкание элементарных пламеней и образование единого фронта пламени. В результате характер течения и акустические характеристики камеры сгорания принципиально изменяются [21]; может возникнуть режим вибрационного горения [21,22]. Таким образом, вопрос о возможности возникновения составного факела является чрезвычайно важным для технологии процесса сжигания газового топлива и управления этим процессом. Ответ на этот вопрос зависит от геометрии взаимного расположения отдельных горелок и размеров образующихся факелов.

Очевидно, что если все факелы ламинарные, то режим сомкнутого горения в принципе невозможен. Поэтому есть смысл рассматривать только режим сомкнутого горения турбулентных факелов или же составной турбулентный факел [14]. Следовательно, чрезвычайно важным с точки зрения возможности образования составного факела представляется вопрос о турбулизации ламинарного факела.

Проблему турбулизации газового факела до настоящего времени связывали главным образом с вопросом о том, ламинарной или турбулентной является струя горючей смеси в горелке [13,14]. Очевидно, что газовая струя в горелке является турбулентной, если число Рейнольдса

$$\text{Re}_d = \frac{d_0 v}{u_0}, \quad (9)$$

вычисленное по скорости u_0 подачи горючей смеси и по размеру насадка d_0 (v – коэффициент кинематической вязкости исходной горючей смеси) превышает некоторую критическую величину Re_d^* , т.е. имеет место неравенство

$$\text{Re}_d \geq \text{Re}_d^* \quad (10)$$

Однако подобный подход является весьма упрощенным. Общеизвестно [2], что переход к турбулентности в струе горючей смеси обусловлен развитием неустойчивости ламинарного течения вязкой среды (если моделировать подачу горючего как течение в канале или трубе). Однако, устойчивость такого течения обеспечивает только ламинарность потока горючей смеси, но не гарантирует ламинарность самого факела, так как факельное пламя само по себе может быть неустойчивым (см. выше), что приводит к автотурбулизации горения. Иными словами, условие (10) является достаточным, но не является необходимым условием турбулизации факела. Другим достаточным условием образования турбулентного факела является, очевидно, условие (1), а необходимым условием – выполнение хотя бы одного из условий (1) и (10).

Управление отдельным факелом осуществляется путем поддержания горения в ламинарном или в турбулентном режиме (в зависимости от цели управления), при этом также регулируется максимальный поперечный размер факела.

Ламинарность струи горючего может быть гарантирована:

- 1) высокой скоростью u_0 подачи горючей смеси;
- 2) небольшим размером насадка d_0 .

Скорость u_0 подачи горючей смеси может относительно легко изменяться в оперативном режиме. Размер насадка d_0 , как правило, задается на этапе проектирования горелки, хотя современные технологии допускают оперативное регулирование данной величины. Отметим, что коэффициент кинематической вязкости исходной горючей смеси ν , который тоже влияет на ламинарность струйного потока, является плохо регулируемым параметром.

Ламинарность факела в целом обеспечивается ламинарностью струи горючего в сочетании с устойчивостью пламени либо с большой длиной волны λ_m максимально быстро нарастающего со временем возмущения неустойчивого пламени. Длина волны λ_m максимально быстро нарастающего со временем возмущения регулируется главным образом составом горючей смеси, которая может оперативно обогащаться или обедняться горючим; кроме того, возможно принципиальное изменение состава горючей смеси.

Предположим, что все горелки на передней стенке камеры сгорания одинаковы с точки зрения их геометрии и одновременно функционируют в одном и том же режиме турбулентного горения, т.е. образующиеся факелы абсолютно идентичны. Тогда, если максимальный поперечный размер факела превосходит расстояние между соседними горелками (или очень близок к этому расстоянию), то имеет место режим сомкнутого горения, т.е. образуется составной факел. Если горелки распределены по передней стенке топки неравномерно, то единый составной факел может и не возникнуть, но возможно появление составных факелов (режимы сомкнутого горения) между отдельными группами горелок.

III. ВЫВОДЫ

1. Составной факел может быть только турбулентным факелом.
2. Одной из причин автотурбулизации газового факела является внутренняя гидродинамическая неустойчивость нормального плоского пламени.
3. Развитие неустойчивости факельного горения имеет место только в том случае, если длина волны λ_m максимально быстро нарастающего со временем экспоненциального возмущения фронта пламени заметно меньше длины образующей конуса пламени L . Соответственно и турбулизация пламени возможна именно при таком условии.
4. Для факельного горения можно пренебречь влиянием сжимаемости среды на развитие неустойчивости ламинарного пламени, так как на начальных этапах проявления неустойчивости это влияние незначительно по сравнению с эффектами вязкости, конечной протяженности зоны пламени и изменением протяженности зоны пламени под влиянием возмущений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л.Д. К теории медленного горения// Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1944. – Т.14, №6. – С. 240-244.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т.: Т. VI. Гидродинамика. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.– 1986. – 736 с.
3. Волков В.Э. Магнитное поле и сжимаемость среды как факторы стабилизации процесса горения// Тезисы докладов XIV Всесоюзного семинара по электрофизике горения. – Челябинск, 1991. – С.34.
4. Волков В.Э., Рыбина О.Б. Об устойчивости плоской стационарной волны медленного горения в сжимаемой среде. – Дисперсные системы. XXI научная конференция стран СНГ 20-24 сентября 2004 г., Одесса. Тезисы докладов. – Одесса: "Астропринт", 2004. – С. 75-76.
5. Волков В.Э. Неустойчивость пламени в идеальной сжимаемой среде и переход медленного горе-

- ния во взрыв// Научные работы Одесской национальной академии харчових технологій. – Одеса, 2010. – Вип. 38. Т.1. – С. 325-332.
6. **Асланов С.К., Волков В.Э.** Интегральный метод анализа устойчивости ламинарного пламени. – Физика горения и взрыва, 1991, №5. – С. 160-166.
7. **Aslanov S., Volkov V.** On the Instability and Cell Structure of Flames. – Archivum combustionis, 1992, Vol.12, Nr. 1-4. – P. 81-90.
8. **Волков В.Э.** Розрахунок довжини преддетонаційної ділянки //Научные работы Одесской национальной академии харчових технологій. – Одеса, 2009. – Вип. 36. Т.1. – С. 285-288.
9. **Волков В.Э.** Управление процессом перехода медленного горения во взрыв //Автоматизация технологических и бизнес-процессов, 2010. – №2, июнь 2010. – С. 5-13.
10. **Волков В.Э.** Алгоритм оценки взрывоопасности системы// V Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании», 6-13 июня 2009 г., Варна, Болгария. Материалы в 2-х томах. Т.2. Международный научный журнал “Acta Universitatis Pontica Euxinus”. Специальный выпуск. – Дніпропетровськ - Варна, 2009. – С.675-678.
11. **Волков В.Э.** Принятие решений по вопросам взрывобезопасности в условиях неопределенности /В.Э.Волков, Э.И.Жуковский //Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ: 2008. – Вип. 6 (59), 2008. – С. 43-48.
12. **Вулис Л.А., Ярин Л.П.** Аэродинамика факела. – Л.: Энергия.– 1978. – 216 с.
13. **Крыжановский Ю.В., Крыжановский В.Н.** Структура и расчет газового факела. – К.:“Освіта України”, 2012. – 96 с.
14. **Бондаренко А.В., Волков В.Э., Максимов М.В.** Неустойчивость факельного горения// Научные работы Одесской национальной академии харчових технологій. – Одеса, 2013. – Вип. 44. Т.1. – С. 287-292.
15. **У. Бейкер, П. Кокс, П. Уэстайн** и др. Взрывные явления. Оценка и последствия: В 2-х кн. Кн.1. – М: Мир, 1986. – 319 с.
16. **Бесчастнов М.В.** Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение. – М.: Химия, 1991. – 432 с.
17. **Волков В.Э.** Геометрическая форма фронта пламени и неустойчивость горения в круглой трубе// Труды международного геометрического центра, 1912. – Т.5, №2. – С. 53-58.
18. **Трошин Я.К., Щелкин К.И.** Структура фронта шаровых пламен и неустойчивость нормального горения// Изв. АН СССР. ОТН, 1955. – № 9. – С. 160–166.
19. **Щелкин К.И., Трошин Я.К.** Газодинамика горения. – М.: Изд-во АН СССР.– 1963.–256 с.
20. **Гуссак Л.А., Спринцина Е.Н., Щелкин К.И.** Исследование устойчивости фронта нормального пламени – Физика горения и взрыва, 1968. – Т. 4, №3. – С. 358-366.
21. **Натанзон М.С.** Неустойчивость горения. – М.: Машиностроение, 1984. – 526 с.
22. **Раушенбах Б.В.** Вибрационное горение. – М: ГИФМЛ, 1961. – 500 с.

A.V. Bondarenko², V.E. Volkov¹, M.V. Maksimov²

¹ - Odessa national academy of food technology, 1/3 Dvoryanska str., Odessa, 65082

² - Odessa national polytechnic university, 1 Shevchenko avenue, Odessa, 65044

FLARE FLAME INSTABILITY AND BURNER COMBUSTION CONTROL

Research of the flare instability development and the laminar-to-turbulent transition for the flares was executed. It was proved that the effects of viscosity and compressibility have the stabilizing influence on the gas flame. The study of the individual flare stability makes the theoretical basis of the fuel burning technology in combustion chambers and for the burner combustion control.

Keywords: flare – flame – combustion – instability – control.

REFERENCES

- Landau L.D.** Towards the slow combustion theory// Zhurnal Experimentalnoi i Teoreticheskoi Physici [Journal of Experimental and Theoretical Physics]. – 1944. – V.14, №6. – P. 240-244.
- Landau L.D., Lifshits E.M.** Theoretical physics. In 10 v.: V. VI. Hydrodynamics. – Moscow: Nauka. Gl. red. phys.-mat. lit. – 1986. – 736 p.
- Volkov V.E.** Magnetic field and compressibility as factors for stabilization of combustion// Theses of reports of XIVth All-union seminar on the combustion electrophysics. – Chelyabinsk, 1991. – P.34
- Volkov V.E., Ribina O.B.** About the stability of the slow combustion plane wave in the compressible media. – The Dispersion Systems. XXIth scientific conference for FSU-countries 20-24th of september 2004, Odessa. Theses of reports. – Odessa: "Astroprint", 2004. – P. 75-76.
- Volkov V.E.** Instability of flames in the ideal compressible media and “combustion-to-explosion” transition// Naukovi Praci Odeskoyi Nacionalnoyi Akademii Charchovih Technologiy [Scientific Works of National Academy of Food Technologies]. – Odessa, – Issue 38. V.1. – P. 325-332.

6. **Aslanov S.K., Volkov V.E.** Integral method for analysis of the laminar flame. – Zhurnal Physica Gorenia i Vzriva [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 1991, №5. – P. 160-166.
7. **Aslanov S., Volkov V.** On the Instability and Cell Structure of Flames. – Archivum combustionis, 1992, Vol.12, Nr. 1-4. – P. 81-90.
8. **Volkov V.E.** Calculation of the pre-detonation length// Naukovi Praci Odeskoyi Nacionalnoyi Akademii Charchovih Technologiy [Scientific Works of National Academy of Food Technologies]. – Odessa, – Issue 36. V.1. – P. 285-288.
9. **Volkov V.E.** Control of the “combustion-to-explosion” transition// Zhurnal Avtomatizatsia Technologicheskikh i Business-Processes [Automation of Technological and Business-Processes], 2010. – №2, June 2010. – P. 5-13.
10. **Volkov V.E.** Algorithm for Estimation of the Explosion Danger// V International Conference «Strategy of Quality in Industry and Education», 6-13th June 2009, Varna, Bulgaria. Works in 2 volumes. V.2. International scientific journal “Acta Universitatis Pontica Euxinus”. Special issue. – Dniepropetrovsk - Varna, 2009. – P. 675-678.
11. **Volkov V.E.** Decision on the explosion safety in indefinite conditions /V.E.Volkov, E.I.Zhukovskii // Zhurnal Systemni tehnologii [System Technologies]. – Dniepropetrovsk: 2008. – Issue 6 (59), 2008. – P. 43-48.
12. **Vulis L.A., Yarin L.P.** Flare Aerodynamics. – Leningrad.: Energy.– 1978. – 216 p.
13. **Krizhanovskiy U.V., Krizhanovskiy V.N.** Structure and Calculation of the Gas Flare. – Kiiv.:“Educatuion of Ukraine”, 2012. – 96 p.
14. **Bondarenko A.V., Volkov V.E., Maksimov M.V.** Flare flame instability and control of the burner combustion// Naukovi Praci Odeskoyi Nacionalnoyi Akademii Charchovih Technologiy [Scientific Works of National Academy of Food Technologies]. – Odessa, – Issue 44. V.1. – P. 287-292.
15. **Baker W., Cox P., Westine P.,** and others. Explosion Hazards and Evaluation: In 2 books. Book 1. – Moscow: Mir, 1986. – 319 p.
16. **Beschastnov M.V.** Industrial Explosions. Estimation and Prevention. – Moscow.: Chemistry, 1991. – 432 p.
17. **Volkov V.E.** Geometrical form of the flame front and instability of combustion in the round tube// Proceedings of the International Geometry Center, 1912. – V.5, №2. – P. 53-58.
18. **Troshin Y.K., Schelkin K.I.** Structures of the spherical flame fronts and instability of the normal combustion// Izvestiya AN SSSR. OTN, 1955. – № 9. – P. 160–166.
19. **Schelkin K.I., Troshin Y.K.** Gas dynamics of combustion. – Moscow.: Izdatelstvo AN SSSR.– 1963.–256 p.
20. **Gussak L.A., Sprintsina E.N., Schelkin K.I.** Investigation of the normal flame front stability – Zhurnal Physica Gorenia i Vzriva [Combustion, Explosion, and Shock Waves], 1968. – V.4, №5. – P. 358-366.
21. **Natanson M.S.** Instability of combustion. – Moscow: Mechanical Engineering, 1984. – 526 p.
22. **Raushenbah B.V.** Vibrating combustion. – Moscow: GIFML, 1961. – 500 p.

Отримана в редакції 14.01.2014, прийнята до друку 04.03.2014