

УДК 531.745

*А.А. Кузнецов, Н.Г. Конопасов*

*Владимирский государственный университет, 600000 г. Владимир, ул.  
Горького 87*

## **Экспериментальные исследования кольцевых вихрей продуктов сгорания в свободной атмосфере**

Излагаются результаты наблюдений за генерацией, всплыванием и эволюцией пламенного шаровидного объекта горящей топливовоздушной смеси и трансформации его динамической структуры в вихревое кольцо при работе установки метеотрон III в факельном режиме импульсного генератора. Приводится схема установки метеотрон III и описание режимов работы. Приведены избранные кадры кинограмм. Установлены стадии эволюции пламенного шаровидного объекта. Экспериментально доказана возможность объединения двух кольцевых вихрей от одного источника.

Движение продуктов сгорания в конвективных нагретых струях сопровождается непрерывным производством и взаимодействием вихревых макроструктур [1, 2]. Вертикальные нагретые струи с осевой симметрией могут быть представлены их суперпозицией. Для проверки этой гипотезы создана тепловая установка (рис. 1.). Авиационный керосин типа ТС-1 [3] из емкости 1 поступает через подкачивающий насос 2 на вход насоса высокого давления 3 с регулируемой производительностью от 0 до 6,02 л/с и давлением до 250 атм, и далее - к форсуночной горелке (4-5) [5, 6]. В ней топливо поступает через теплообмен-

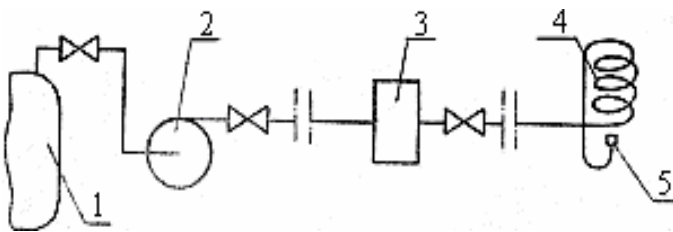


Рис. 1. Принципиальная схема установки (метеотрон III [4]).

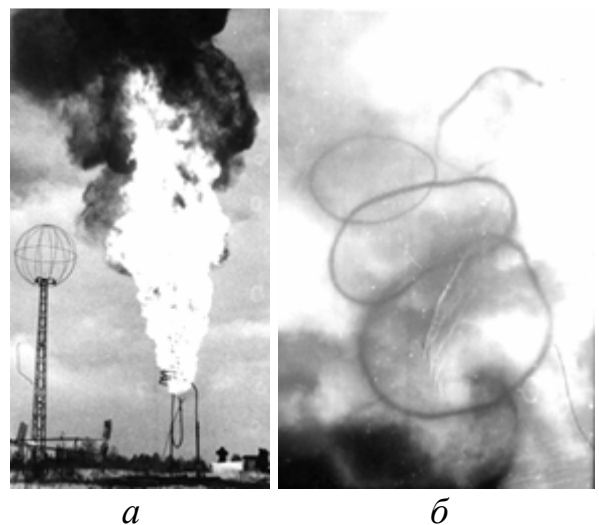


Рис. 2. Компьютерная версия фотографий работы установки в непрерывном (а) и импульсном (б) режимах подачи топлива на форсунку.

ник 4 сверху к форсуночному узлу 5 [7]. Топливная смесь во всех опытах поджигалась сбоку при выходе из форсунки асбестовым факелом, пропитанным керосином ТС-1. Тепловая мощность установки составляет  $2 \cdot 10^8$  Вт при непрерывном режиме работы.

Установка метеотрон III [4, 8] может работать в «холодном» режиме непрерывного и импульсного аэрозольного генератора топливовоздушной смеси и в факельном режиме непрерывного, переменного и импульсного генератора нагретой струи, пламенных шаровидных объектов (ПШО) и вихревых колец (ВК) в свободной атмосфере. Работа в режиме импульсного генератора в обоих случаях может производиться на холодном или перегретом топливе. Агрегатное состояние топлива задается временем предварительного прогрева теплообменника при работе в факельном режиме непрерывного генератора нагретой струи. Кроме этого, состав, динамическую структуру, размеры, задымленность факела и динамических структур можно варьировать в широких пределах изменением характеристик форсуночного узла [5, 6]. В этом смысле, установка метеотрон III является имитатором большого спектра пожароопасных ситуаций. При работе в непрерывном режиме с регулируемой производительностью установка определяется как имитатор крупных пожаров на нефтяных и газовых скважинах; при работе в импульсном (переменном) режиме аэрозольного генератора [5] - как имитатор импульсных аварийных выбросов в форме ПШО [4, 8].

При непрерывной подаче топлива с постоянным давлением на форсунке в свободной атмосфере создается струя нагретых продуктов сгорания с осевой симметрией (рис. 2, а). Если топливо подавать на вход форсунки отдельными импульсами давления с паузами более 10 с, то получится серия независимых кольцевых вихрей (рис. 2, б). В таком представлении осесимметричная струя определяется предельным случаем последовательной генерации кольцевых вихрей при их взаимодействии.

Эксперименты по производству непрерывных нагретых струй и всплывающих термиком в формах ПШО и ВК проводились при атмосферном давлении и температуре окружающего воздуха от  $-20^\circ\text{C}$  до  $+20^\circ\text{C}$  в полевых условиях.

Кольцевые вихри можно получить при быстром увеличении расхода топлива через форсунку от нулевого до максимального (в течении 0,3 – 0,5 с), выдержке максимального расхода в течении 2 с и резком выключении подачи топлива.

Изучение эволюции ПШО производилось по кинограммам (рис. 3), снятым со стационарных точек камерой «Красногорск» со скоростью 24 кадр/с. На рис. 3 показаны последовательные стадии организации ПШО и сажевого вихревого кольца: 1 - подача топлива на форсунку; 10 – факельное воспламенение головки топливной струи; 20 – объемное расширение при воспламенении; 30 – пробитие топливной головки вертикальным потоком горячей топливовоздушной смеси; 50 – формирование головки факела горячей топливовоздушной смеси с захватом обогащенной смеси из головки топливной струи; 50 - 70 – выключение установки и потеря газодинамического и огневого контакта сажевой

динамической структуры с источником; 70 – завершение процесса горения в головке факела; 100 – начало формирования автономной динамической структуры в головке факела с разрывом динамического контакта со шлейфом; 130 – завершение формирования вихревой структуры; 160 – начало быстрого роста диаметра ВК.

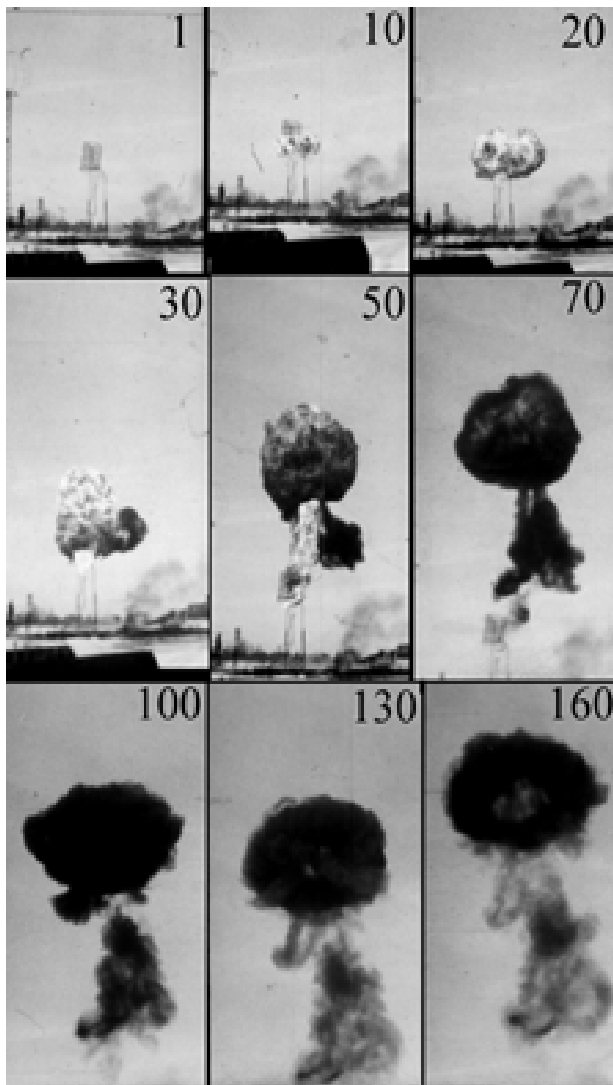


Рис. 3. Компьютерная версия кадров кинограммы одного опыта. Цифры на кадрах обозначают их номера.

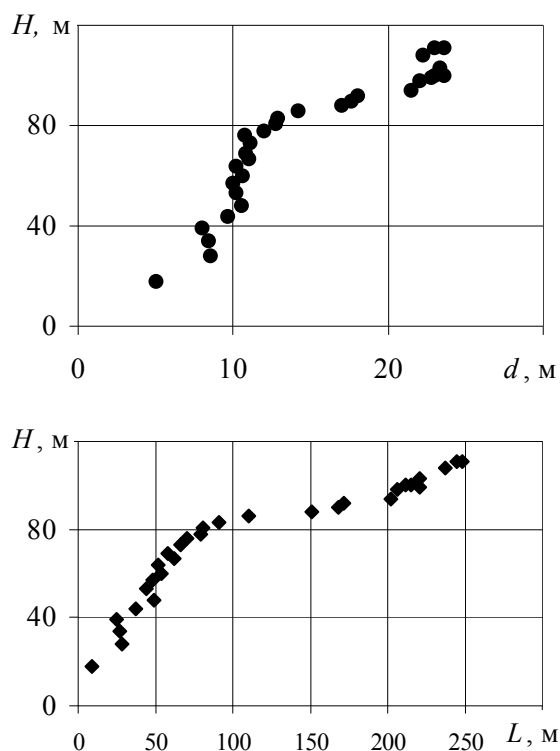


Рис. 4. Изменение диаметра  $d$  нагретого вихревого кольца и расстояния  $L$  от точки наблюдения при всплывании и перемещении вихревого кольца в свободной атмосфере

Без учета ветровой стратификации в приземном слое диаметр кольцевого вихря растет с высотой линейно (рис. 4) с углом расхождения  $(11,6 \pm 0,2)^\circ$ . Такой угол расхождения характерен для осесимметричных нагретых струй в свободной атмосфере. За время 80 с съемки (см. рис. 3) вихревое кольцо поднялось на высоту 110 м и ушел по ветру на 250 м (рис. 4) со сменой ветровых ярусов.

Организация ПШО начинается со второй секунды после подачи топлива на форсунку с формирования и развития факельной головки. В течение первых 2 - 3 секунд в нем происходит горение топливовоздушной смеси (рис. 3, 70) и он ускоряется до максимальной скорости всплывания 5-10 м/с, а затем движется замедленно [4]. Горение головки факела – ячеистое. Сильно выраженные внут-

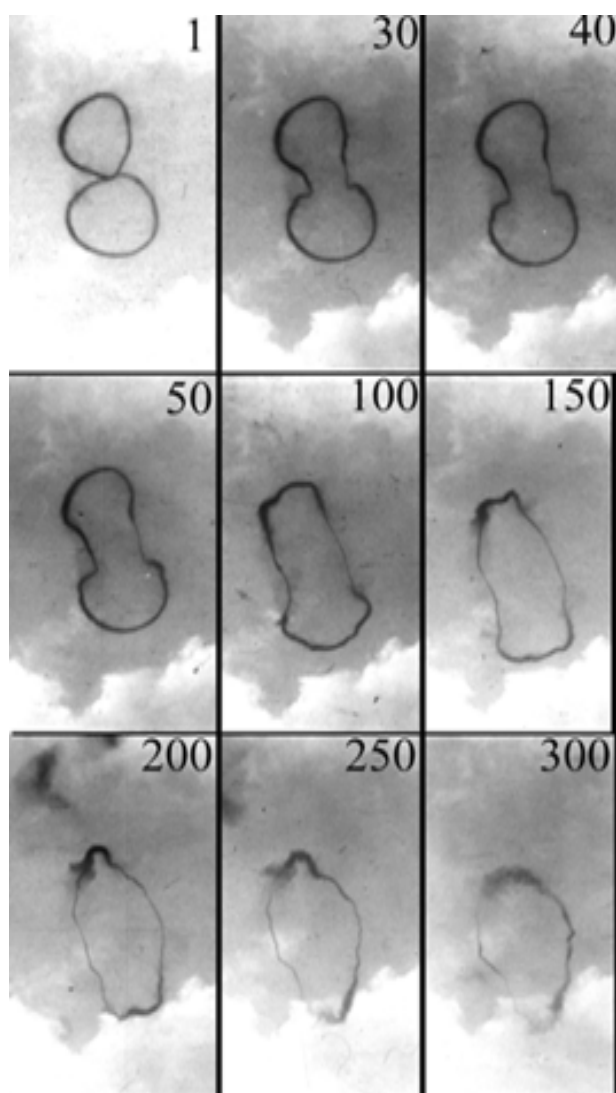


Рис. 5. Компьютерная версия кинограммы контакта и объединения крупномасштабных вихревых колец в свободной атмосфере.

динамика вихревой структуры (рис. 3, 70 – 130). Формирование первичной (рис. 3, 20 – 30) и вторичной (рис. 3, 100) вихревой структуры в головке факела, сопровождаются единичным локальным массовым выбросом (протуберанцем [10]). Началом трансформации ПШО в ВК можно считать исчезновение ячеистой структуры поверхности, т.е. качественное изменение механизма теплообмена в объеме ПШ: от конвективного механизма – к механизму теплопроводности.

Возникающий при вспышке ПШО диаметром 2 - 5 метров (в зависимости величины импульса истечения топлива из форсунки) поднимается вертикально и естественным образом за 5 – 7 с вырождается в ВК. Объемная плотность энергии ПШО радиусом 5 м оценивается в  $30 \text{ кДж/м}^3$  [8].

Время жизни кольцевого вихря с начальным диаметром до 10 м составляло 4 мин.

ренные газодинамические конвекционные течения напоминают по радиальной направленности конвекционные течения в ячейке Бенара при организации конвекционного теплообмена (рис. 3, 30 - 50). Наличие ячеистой структуры поверхности пламенного шароида не определяется вертикальным топливным импульсом [9]. Организация конвекционных ячеек имеет диссипативную природу [2]. По мере удаления шароида от источника и снижения интенсивности теплообмена с окружающей средой диссипативная структура перестраивается объединением (слиянием) конвекционных ячеек. Увеличение размера конвективных ячеек во времени сопровождается уменьшением их количества на поверхности. Такая связь не является пропорциональной. При увеличении диаметра головки факела до 6 м (рис. 3, 50) и падения интенсивности горения размеры ячеек соответственно растут. Интенсивность перемешивания в них падает и, в конечном счете, недогоревшие сажевые частицы подчиняются качественно новой общей макро-

Генерируемые в факельном режиме импульсного генератора одинаково и последовательно от одного источника вихревые кольца (см. рис. 2, б), охотно объединяются в одно кольцо [11].

Второй вихрь догоняет первый и вступает с ним в контакт (рис. 5, 1). На рис. 5 показаны последовательные стадии объединения двух вихревых колец с момента их контакта. Заметно искажение участков контактирующих вихревых трубок, свидетельствующее об их взаимном притяжении. На всех стадиях объединения заметно, что образуемое кольцо сохраняет динамическую структуру не контактирующих участков вихрей с четко очерченными границами. Контактующие участки вихрей при объединении порождают менее интенсивную динамику. Эти участки приобретают гладкость, на них нет задымленных «бусин». Иногда они выражены одной гладкой трубкой. Даже в таком состоянии при отсутствии порывов ветра они сохраняются до одной минуты.

### Литература

1. Кузнецов А.А., Бухарова О.Д. Динамика макропроцессов в пламени и нагретой струе // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37, № 1. – С. 35-41.
2. Самсонов В.П. Самопроизвольные вихревые структуры в пламени при малых числах Рейнольдса/ Автореферат дис. докт. физ.- мат. наук по спец. 01.02.05. Механика жидкости, газа и плазмы. СГУ, Сургут. – 2004. – 33 с.
3. Нефтепродукты (Справочник)/ Под ред. Лосикова Б. В.-М.: Химия. – 1966. – 776 с.
4. Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г. Производство кольцевых вихревых колец продуктов сгорания в свободной атмосфере // Дисперсные системы. ОНУ, Одесса. – 2002. – С. 163-164.
5. Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г. Форсуночные горелки метеотронов II и III// Современные промышленные технологии. НГТУ, Н. Новгород. – 2005. – С.11.
6. Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г. Модификации горелок метеотрона III// Современные промышленные технологии. НГТУ, Н.Новгород. – 2005. – С.13.
7. Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г. Форсунки метеотронов II и III// Современные промышленные технологии. НГТУ, Н. Новгород. – 2005. – С. 12.
8. Кузнецов А.А., Фуров Л.В. О структуре и динамике светящегося макрообразования// Дисперсные системы. ОНУ, Одесса. – 2004. – С.186-187.
9. Иващенко П.Ф., Румянцев В.С. Конвективный подъем и скорость распространения большого очага пламени// Физика горения взрыва – 1978. – Т.14, № 3. – С. 87-90.
10. Скорер Р. Аэрогидродинамика окружающей среды /Под ред. Прессмана А.Я., М.: Мир, – 1980. – С.549.
11. Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г. Исследования взаимодействия крупномасштабных вихревых колец в свободной атмосфере// Дисперсные системы. ОНУ, Одесса. – 2004. – С.184-185.

*А.А. Кузнецов, М.Г. Конопасов*

**Експериментальні дослідження кільцевих вихорів продуктів згорання у вільній атмосфері**

**АНОТАЦІЯ**

Висловлюються результати спостережень за генерацією, спливанням і еволюцією полум'яного кулястого об'єкту топливовоздушной, що горить, змішай і трансформації його динамічної структури у вихрове кільце при роботі установки метеотрон III у факельному режимі імпульсного генератора. Приводиться схема установки метеотрон III і опис режимів роботи. Приведені вибрані кадри кінограми. Встановлені стадії еволюції полум'яного кулястого об'єкту. Експериментально доведена можливість об'єднання двох кільцевих вихорів від одного джерела.

*A.A. Kuznetsov, N.G. Konopasov*

**Experimental researches ring whirlwinds of products of combustion in the free atmosphere**

**SUMMARY**

Results of supervision over generation, emerging and evolution of ardent spherical object burning fuel-air mix and transformation of its dynamic structure in a vortex ring at work of installation метеотрон III in a torch mode of the pulse generator. The circuit of meteotron installation III and the description of operating modes is resulted. The elected staff film-gram are resulted. Stages of evolution of ardent spherical object are established. The opportunity of association of two ring whirlwinds from one source is experimentally proved.

Key words: meteotron, ardent spherical object, a ring whirlwind, a vortex ring.