

Кузнецов А. А.

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

Экспериментальное исследование формирования пламенного шароида и его эволюции в вихревое кольцо в свободной атмосфере

При работе установки метеотрон III в факельном режиме импульсного генератора топлива при разогретой спирали теплообменника в свободной атмосфере создается пламенный шароид объемом до 50 м^3 и временем жизни до 2 с с последующей эволюцией в вихревое кольцо с положительной плавучестью до 100 м. Определена роль конвекции при трансформациях и предложена модель эволюции.

Исследование распространения пламени по двухфазной системе представляет существенный интерес для теории горения, так как механизм горения в большом не ограниченном объеме горючих газов и паров при атмосферном давлении осложняется влиянием свободной конвекции [1]. Для выяснения ее роли в механизме горения, условий возникновения и влияния ее развития на процессы распространения пламени в свободном пространстве при атмосферном давлении и в быстрогорящих смесях требуются их значительные объемы. Работа на установке метеотрон III в импульсном режиме подачи топлива [2, 3] позволяет создавать большие облака холодных топливовоздушных и нагретых паро-топливовоздушных смесей объемом более 50 м^3 не контактирующих с поверхностью земли. При факельном зажигании снизу таких облаков образуется пламенный шароид со сложной внутренней динамической структурой объемного горения.

Цель работы – определение роли конвекции при формировании пламенного шароида и его эволюции в вихревое кольцо.

1. Методика эксперимента.

Установка метеотрон III может работать в «холодном» режиме непрерывного и импульсного аэрозольного генератора топливовоздушной смеси и в факельном режиме непрерывного, переменного и импульсного генератора нагретой струи, пламенных шароидов (ПШ) и вихревых колец (ВК) в свободной атмосфере [2 – 4]. Работа в режиме импульсного генератора в обоих случаях может производиться на холодном или перегретом топливе. Агрегатное состояние топлива ТС-1 задается временем предварительного прогрева теплообменника при работе в факельном режиме непрерывного генератора нагретой струи. Кроме этого, состав, динамическую структуру, размеры, задымленность можно варьировать в широких пределах изменением характеристик форсуночного узла [3]. При непрерывной подаче топлива с постоянным давлением на форсунке в свободной атмосфере создается факел пламени с осевой симметрией (рис. 1, а).

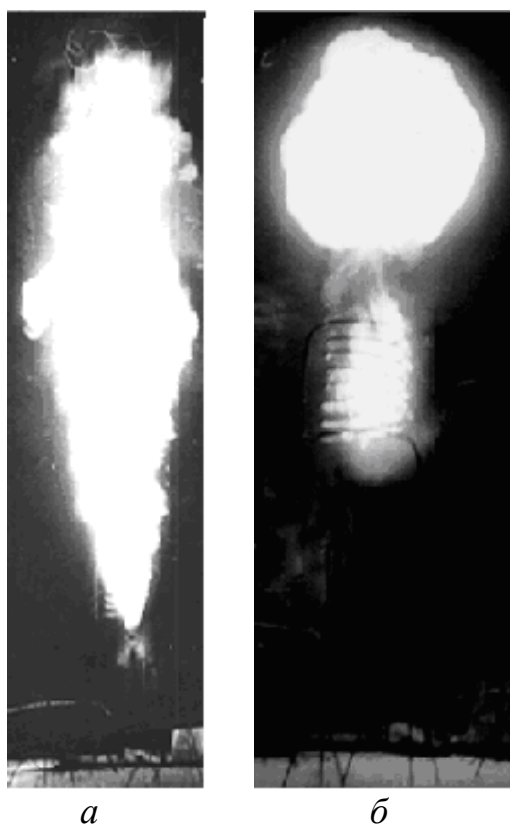


Рис. 1. Компьютерная версия фотографий работы установки в факельных режимах непрерывной (а) и в импульсной (б) подачи топлива на форсунку. Экспозиция в ночное время

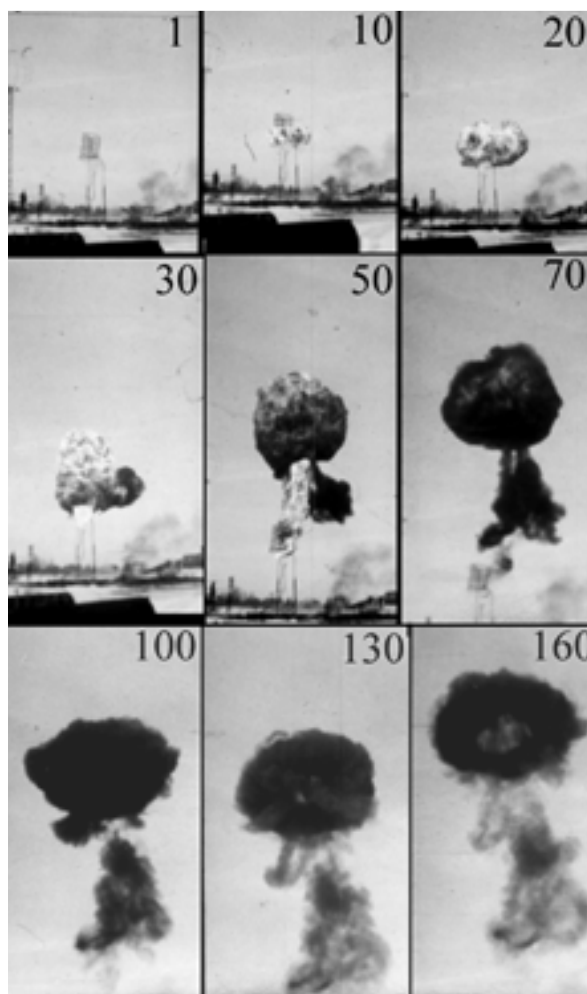


Рис. 2. Компьютерная версия кадров кинограммы одного опыта. Цифры на кадрах обозначают их номера. Высота установки 5 м (кадр 1, 1/24 с)

Если топливо подавать на вход форсунки с ц/б шнеком импульсом давления, то получится ПШ (рис. 1, б) с последующей эволюцией в вихревое кольцо [4]. Эксперименты по производству всплывающих термиков в формах ПШ и ВК проводились при атмосферном давлении и температуре окружающего воздуха от -20°C до $+20^{\circ}\text{C}$ в полевых условиях. Всплывание ПШ определялось перемещением геометрического центра плоской фигуры на кадрах кинограммы (рис. 2) во времени и относительно форсунки.

2. Результаты эксперимента.

На кадрах кинограммы (рис. 2) показаны основные последовательные стадии организации, развития ПШ и его эволюции в ВК. При факельном воспламенении от среза форсунки нагретой паро-топливовоздушной смеси топливной головки, аккумулятивной задержкой воспламенения, организуется огненный тор (первовихрь), фиксируемый в пространстве местоположением топливной головки (рис. 1, 10 – 20). При воспламенении топливной вихревой пелены по периферии топливной головки направление воспламенения не является опреде-

ляющим [1, 2]. Радиальное распределение пламени объясняется симметричным распределением размера капель относительно оси топливной струи, вертикальным топливным импульсом и ускоренным конвективным движением воспламененного объема. Вовлечение окружающего воздуха происходит благодаря двум процессам переноса: внутреннего трения и термодиффузии. При радиальном расширении объема возникает разрежение в приосевой области выходного сечения форсунки. Воздух снизу устремляется в эту область. Находящиеся здесь наиболее мелкие капли топлива быстрее прогреваются, вскипают и воспламеняются [2]. Скорость конвективного подъема в приосевой области сильно возрастает.

Вторая стадия образования ПШ начинается с организации участка вертикальной факельной струи и завершается образованием факельной головки (ФГ). На этой стадии при наличии бокового ветра легко определяется направление закрутки, определяющее экваториальное движение в торе. На кинограмме отчетливо фиксируется момент рождения бокового протуберанца № 1 (рис. 2, 20 – 30) при наличии бокового ветра. При направлении ветра «на нас» направление закрутки при взгляде от поверхности определено «по часовой стрелки». Это видно также при сравнении кадров 30 и 50. Вся динамическая система ПШ вместе с колонкой огневой связи (КОС) вращается в направлении начальной закрутки «по часовой стрелке» со скоростью около $0,8 \pi, \text{с}^{-1}$. Факельная струя при своем вертикальном развитии увлекает за собой гаснущий огненный тор, захватывая его в зону пониженного давления и поддерживая в нем циркуляционное движение (рис. 2, 50). Объем огненного тора организован горением наиболее крупных частиц топлива с периферии топливной струи, поэтому он наиболее сильно задымлен сажевыми частицами (массивен).

ПШ имеет некоторое время выраженную макроструктуру по вертикали, состоящую из двух частей: ФГ с ячеистым горением и «подставки» в форме сажевого тора с характерной и согласованной внутренней динамикой в форме развитой циркуляции. Наличие циркуляции объясняет отсутствие конвекционных ячеек снизу ФГ. Видно (рис. 2, 30), что подъем ФГ начинается не сразу при воспламенении, пробитием струей нагретых продуктов горения топливной головки. Сначала формируется факельная головка, а подъем начинается через $\sim 1,5 \text{ с}$. В этот момент времени диаметр ФГ составляет 3 м. Скорость подъема ПШ плавно возрастает и достигает величины 11 – 12 м/с, а затем - замедляется. При этом диаметр ПШ непрерывно растет (рис. 3).

По кинограмме рис. 2 построены графики функции эквивалентного диаметра плоской фигуры $D_{\text{экв}}(n)$ и оценки скорости ее подъема $v(n)$ от номера кадра n (рис. 3). Видимую скорость распространения пламени можно оценить по отношению приращения радиуса сферического пламени на двух соседних кадрах ко времени между их экспозициями: $u = \Delta D_{\text{экв}} / (2\Delta r)$ [1]. По данным рис. 3 эта скорость первую секунду после воспламенения постоянна и равна 3 м/с, в течение второй секунды она близка к нулю, на третьей секунде она вновь растет до 1,5 м/с. Однако, надо иметь в виду, что на третьей секунде огневой связи с источником уже нет. При этом диаметр ПШ определяется по сильно задым-

ленному контуру. Поэтому его рост не связан со скоростью распространения пламени, а определен другими причинами.

От момента зажигания до формирования динамической структуры вихревого кольца происходит несколько качественных трансформаций промежуточных динамических макроструктур. Их алгоритмическую последовательность можно условно обозначить по кадрам (рис. 2): (1 – 10) – топливная головка, (10 – 20) – воспламенение топливной головки с организацией первовихря, (20 – 30) – формирование ФГ, (30 – 70) – формирование ПШ с выбросом большого протуберанца № 1 (см. рис. 1, б), (70 – 100) – эволюция ПШ в ВК, (100 и далее) – формирование ВК, начинающееся с выброса малого протуберанца № 2. Первые три динамические структуры поддерживают связь с источником. При формировании ПШ исчезает КОС, и последующие динамические структуры теряют огневую связь с источником и становятся автономными. Плавуемость первых структур постоянно восполняется, а область плавуемости непрерывна между источником и рассматриваемым уровнем, поэтому они по определению [5] относятся к плавающим струям. Плавуемость обеих автономных структур заключена в ограниченном объеме, потерявшим связь с источником, поэтому они по определению [6] являются термиками. Однако по более позднему определению термика [7] потеря связи ПШ с источником не обязательна.

Сформированная структура ПШ имеет три выраженные динамические составляющие: первовихрь, факельная головка и связующая их кольцевая область. Каждая из них характеризуется собственной вихревой структурой. Первые две составляющие характеризуются крупномасштабной турбулентностью, а последняя – мелкомасштабной.

3. Обсуждение результатов эксперимента.

В объеме ФГ при его формировании развиваются дискретные когерентные вихреобразования сложной структуры, проявляющиеся на поверхности в форме распределенной ячеистой структуры. Как известно неустойчивость Бенара возникает в поле тяготения в горизонтальном слое жидкости с вертикальным градиентом температуры. Автор полагает, что неустойчивость Бенара (см. рис. 2, 20 – 70) возникает в поле тяготения в сферическом слое ПШ с радиальным градиентом температуры. При росте градиента температуры и достижении им порогового значения, стационарное состояние слоев становится неустойчивым. Скорость притока тепла в сферическом слое становится больше, чем скорость отвода тепла за счет теплопроводности горящей топливно-воздушной смеси. Система выбирает более эффективный для нее механизм передачи тепла с заданной скоростью – конвекцию. Конвективное движение жидкости организует внутри факельной головки радиальные конвективные ячейки с размерами, определяемыми скоростью теплопереноса. Каждая конвективная ячейка представляет собой свободное конвективное движение в форме вихря Релея – Бенара [8], в котором направление закрутки, как правило, случайное (по- или против-), если не обусловлено внешними стимулами. В нашем случае внешним стимулом на верхнем полюсе ФГ является осевой скоростной напор, поэтому резонно принять закрутку в первичной полюсной конвективной ячейке по на-

правлению «из центра – наружу». Визуально структура ячеистой поверхности подтверждает такой вывод. В таком случае конвективные ячейки представляют собой диссипативные структуры с заранее известным направлением вращения.

Горящая топливно-воздушная смесь, самоорганизуясь в шаровом слое в конвективные ячейки с размерами, определяемыми скоростью теплопереноса, интенсивно перемешивается, перемещаясь в радиальном направлении согласованно с почти одинаковыми скоростями. Наиболее охотно ячейки развиваются по вертикали и образуются в приосевой области верхней части поверхности ФГ. При вертикальном осевом поступлении в ФГ горячей топливно-воздушной смеси, подъеме и увеличении поверхности ФГ, сформированные ячейки смещаются относительно полюса по поверхности вниз в направлении к экваториальной области, уступая свое место организующимся новым ячейкам. При этом они ведут себя как устойчивые «жесткие» структурные элементы. Как известно, если две вихревые структуры в зоне контакта имеют одинаковые вектора скоростей, то они отталкиваются [3, 9]. Это обеспечивает тангенциальную упругость ФГ и ПШ. Нарождающиеся ячейки в приосевой области (область полюса ПШ) «расталкивают уже существующие и выходят на поверхность. Это продолжается все время существования ПШ. Предыдущие ячейки опускаются все ниже к экваториальной области в зону меньших температур и менее интенсивного теплообмена. Их присутствие становится необязательным для механизма теплообмена динамической макроструктуры ПШ.

Форма, размеры ячеек и их количество определены пороговым значением радиального градиента температуры и интенсивностью теплообмена в шаровом слое. При росте интенсивности теплообмена количество ячеек возрастает. Их взаимодействие (отталкивание) приводит к росту поверхности ФГ. При фиксированной интенсивности теплообмена в шаровом слое новые конвективные ячейки не образуются, а с ростом поверхности ФГ и ПШ их количество при этом убывает. Количество конвективных ячеек и их поперечный размер можно оценить по их проявлениям на поверхности ФГ и ПШ в интервале второй секунды наблюдений. В этом интервале количество ячеек практически постоянно (40 – 50), а диаметр меняется от 0.5 м на дальних меридианах до 1 м в экваториальной области. При росте диаметра ПШ увеличение размера конвективных ячеек во времени не сопровождается уменьшением их количества на поверхности. На рис. 2 видно, что при формировании факельной головки поверхностная плотность ячеек распределена неоднородно. Максимальная плотность ячеек приходится на приосевой шаровой слой ФГ с максимальным градиентом температуры.

При торможении с сопутствующим ростом диаметра ПШ радиальный градиент температуры резко падает, поверхностное распределение ячеек выравнивается. Когда пламенная структура зависает, теряя поступательную скорость перемещения (см. рис. 3), происходит заметная коллективная перестройка динамической структуры. Огневая связь центра ПШ с источником еще тормозит падение температуры в центре ПШ, сохраняя ячейковую структуру. При смещении конвективных ячеек к экваториальной области ПШ (и ниже), очевидно, резко меняются гравитационные условия их образования. Возникает вопрос о

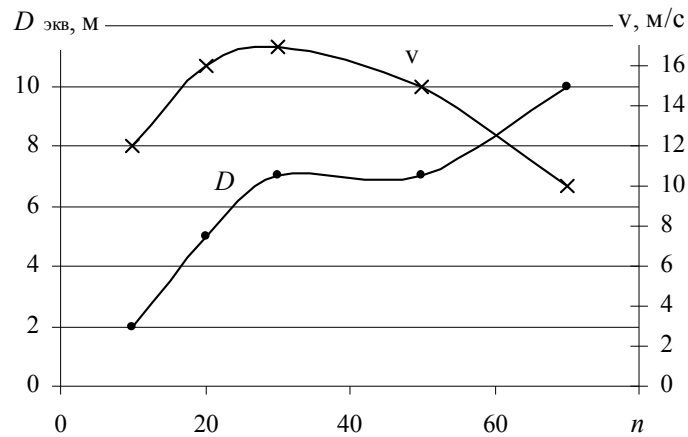


Рис. 3. Изменение диаметра и скорости подъема плоской фигуры (по рис. 2) во времени (№ кадра n).

возможности их существования или трансформации. Вихревая ячейка существует, пока существует хоть одна сколь угодно малая по сечению замкнутая сама на себя трубка тока. Вихревое кольцо, теряющее внутреннюю динамическую структуру (закрутку), превращается в дымовое кольцо [9]. Сильное задымление поверхности указывает на трансформацию конвективных ячеек в дымные кольца и, что процесс горения смещается к центру объема ПШ.

Возвратные течения в конвективных ячейках Релея-Бенара обеспечиваются вертикальным гравитационным полем. При их смещении к экватору ПШ они поворачиваются около центра ПШ так, что возвратное действие падает. Для сохранения возвратного течения они должны поворачиваться и в плоскости кадра. В таком случае они теряют связь с источником градиента температуры и принимают автономное движение. Форма овального цилиндра конвективной ячейки, теряя радиальный размер, сменяется сначала сферической формой (вихрь Хилла), а затем, при отсутствии экваториальной закрутки, вырождается в дымное кольцо (ДК). Макроструктура ПШ теряет радиальную «жесткость» и тангенциальную упругость. Форма ПШ меняется, расплываясь в радиальном направлении за счет задымления. Скоростной напор снизу превышает скорость подъема ПШ и деформирует его, поджимая вертикальный размер.

Увлекаясь циркуляционным движением, на определенном меридиане ниже кольцевой области ДК вступают в «чехарду» по направлению начальной закрутки. Оба типа движения, накладываясь, организуют вихревое макро-кольцо, как общее движение по замкнутой спирали – вихревой трубки тока (ВТТ) [4]. Таким образом, динамические диссипативные структуры в форме конвективных ячеек, образованные в сферическом слое ПШ, вырождаясь в ДК, формируют и поддерживают меридиональное и экваториальное движения при формировании кольцевой области под ПШ, как совокупности ВТТ.

Выводы.

Приведенные экспериментальные факты и результаты анализа не противоречат ни предположению Л.Д. Ландау, ни экспериментальным результатом бо-

лее поздних исследований о формировании и развитии крупномасштабной турбулентности за счет мелкомасштабной [10, 11]. В рамках предложенной модели количество аккумулярованных ВТТ в кольцевой области с одной стороны определено плотностью конвективных ячеек на поверхности ПШ, или, точнее, слоев ячеек на поверхности ПШ. С другой стороны оно указывает на величину аккумулярованной энергии завихренности в кольцевой области, а, следовательно, предопределяет время жизни формируемого вихревого кольца при прочих равных условиях. Циркуляция вектора скорости по движущемуся контуру пропорциональна количеству охватываемых трубок в вихревом кольце.

Литература:

1. *Иващенко П.Ф., Румянцев В.С.* Конвективный подъем и скорость распространения большого очага пламени // Физика горения и взрыва. – 1978. – Т. 14, № 3. – С. 87 – 90.
2. *Кузнецов А.А.* Экспериментальное исследование динамической структуры вертикального факела пламени при работе метеотрона Ш // Физика аэродисперсных систем. – 2008. – № 45. – С. 55 – 66.
3. *Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г.* Экспериментальное моделирование факелов горящих газовых и нефтяных скважин. Тепловые установки метеотрон II и III // Инженерная физика. – 2008. № 3. – С. 20-24
4. *Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г.* Экспериментальные исследования кольцевых вихрей продуктов сгорания в свободной атмосфере // Физика аэродисперсных систем. – 2005. – № 42. – С. 100 – 106.
5. *Лойцянский Л.Г.* Механика жидкости и газа. Учеб. для вузов. – М.: Наука. 1987. – 840 с
6. *Тернер Дж.* Эффекты плавучести в жидкостях: пер. с англ. – М.: Мир. 1977. – 429 с.
7. *Скорер Р.* Аэрогидродинамика окружающей среды: пер. с англ. / под ред. *А. Я. Прессмана.* – М.: Мир. 1980. – 549 с.
8. *Милн-Томсон Л. М.* Теоретическая гидродинамика: пер. с англ. / под ред. *Н.Н. Моисеева.* – М.: Мир, 1964. – 656.
9. *Лэмб Г.* Гидродинамика: пер. с англ. / под ред. *Н.А. Слезкина.* – М.-Л.: ОГИЗ, 1947. – С. 929.с.
10. *Ландау Л. Д.* К проблеме турбулентности // Доклады АН СССР, Сер. Гидродинамика. 1944. – Т. 44, № 8. – С. 339 – 342.
11. *Самсонов В. П.* Самопроизвольные вихревые структуры в пламени. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. – 124 с.

Кузнецов А. А.

Експериментальне дослідження формування полум'яного шароїда і його еволюції у вихрове кільце у вільній атмосфері

АНОТАЦІЯ

При роботі установки метеотрон III в факельному режимі імпульсного генератора палива при розігрітій спіралі теплообмінника у вільній атмосфері створюється полум'яний шароїд об'ємом до 50 м³ і часом життя до 2с з подальшою еволюцією у вихрове кільце з позитивною плавучістю до 100 м. Визначена роль конвекції при трансформаціях і запропонована модель еволюції.

Kuznetsov A.A.

Experimental research of formation ardent globe and its evolutions in a vortex ring in a free atmosphere

SUMMARY

At meteotron III installation work in a torch mode of the pulse fuel generator at heated heater spirals in a free atmosphere it is created ardent globe by volume up to 50 m³ and time of life up to 2 s with the subsequent evolution in a vortex ring with positive buoyancy up to 100 m. The convection role is determined at transformations and the evolution model is offered.