

УДК 531.745

Кузнецов А.А.

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

Экспериментальное исследование динамической структуры вертикального факела пламени при работе метеотрона III

При работе установки метеотрон III в факельном режиме непрерывного генератора вертикальной нагретой струи при разогретой спирали теплообменника в свободной атмосфере создается мощный факел пламени объемом до 250 м³ и струя нагретых продуктов сгорания с расчетной положительной плавучестью до 450 м в стандартной атмосфере. Рассмотрены функциональные возможности установки. По визуальным наблюдениям и компьютерным версиям фотографий проанализированы вихревые структуры в факелах пламени и предложены механизмы их возбуждения, организации и эволюции.

Существенные изменения в понимании природы турбулентности в слоях смешения, струях и следах обусловлены обнаружением в таких течениях крупномасштабных периодических вихревых образований в форме когерентных структур [1 – 8]. В настоящее время не ясна роль физических процессов, обеспечивающих организацию вихревых структур в открытом пламени. Не известно влияние спонтанной вихревой структуры на скорость, полноту сгорания, устойчивость горения и интенсивность тепло- и массообмена. Малочисленность экспериментальных исследований вихревых течений и измерений параметров потока сдерживает возможности понимания и построения физических механизмов самопроизвольного формирования вихревых структур в пламени.

Целью данной работы является экспериментальное исследование формирования и эволюции динамической структуры вертикального факела пламени в приземном слое свободной атмосферы при работе метеотрона III в факельном режиме непрерывного генератора распыленного перегретого топлива.

Установка метеотрон III [9 – 11] 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. 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. Состав,

Таблица 1. Расчетные выходные параметры форсуночного узла метеотрона III

Параметры	d , мм	n	C_d	ϕ	Δp , атм	v , м/с	Q , л/с	2α , град	$We \cdot 10^{-4}$	$Re \cdot 10^{-5}$
Форсунка 1	3.0	2	0.227	0.607	100	62.0	0.26	146	0.8	3.4
Форсунка 2	11.0	2	0.224	0.610	100	61.0	3.40	146	3.0	12.4
Форсунка 3	14.5	2	0.228	0.606	100	62.4	6.04	146	4.0	16.8

динамическую структуру, размеры, задымленность факела можно варьировать в широких пределах изменением характеристик форсуночного узла [12]. 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 [13] – как имитатор импульсных аварийных выбросов в формах ПШ и ВК [9, 14].

Выходные параметры форсуночного узла рассчитаны по известному алгоритму [11, 15] для трех гидронасосов с разной производительностью (Q) (табл. 1).

$$\text{Скорость истечения } v = \sqrt{\frac{2\Delta p}{(1018,5 - 0,79T)}} \cdot \epsilon \text{ рассчитывалась с учетом ко-}$$

эффициента изменения скорости струи $\epsilon = C_d / \phi$ и зависимости $\rho(T)$ плотности керосина от температуры:

$$\rho(T) = \rho_{293} + \beta(293 - T),$$

где $\beta = (1.831 - 1.323 \cdot 10^{-3} \rho_{293}) = 0.79 \text{ K}^{-1}$ (рис. 1). Здесь C_d и ϕ – коэффициенты расхода и сжатия; n – число каналов шнека (табл. 1); температура топлива $T = 370 \text{ K}$ (рис. 2).

При определении зависимости температуры t °C топлива на входе в форсунку от давления подачи топлива (p , атм) использовалась термопара хромель-алюмель (ХА) с рабочими интервалами по температуре и термо-ЭДС: $\Delta t = (0 -$

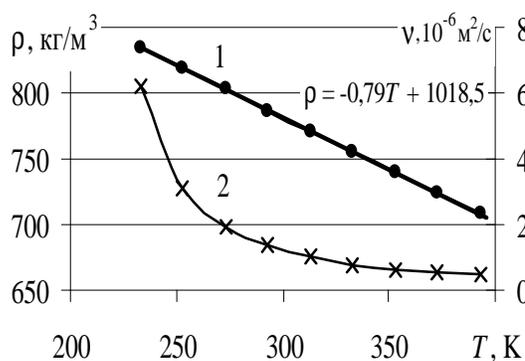


Рис. 1. Функции $\rho(T)$ (1) и $v(T)$ (2) для топлива сорта ТС-1 [16, 17]

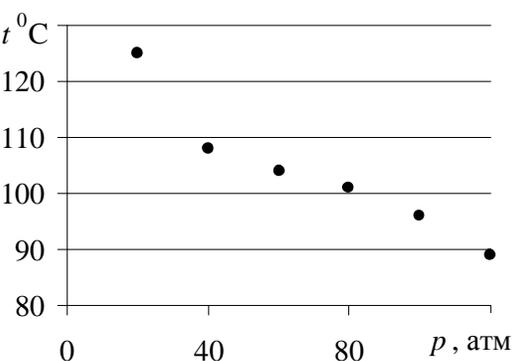


Рис. 2. График изменения температуры керосина ТС-1 на входе в форсунку 1 при изменении режима (см. табл. 1)

600)°C; $\Delta \varepsilon_T = (0 - 24.91)$ мВ. Температура топлива нелинейно падает (рис. 2) при росте давления топлива в подводящей магистрали. Это объясняется наличием спирального участка топливной магистрали, выполняющего функции теплообменника и стабилизатора пламени [9 – 12]. При малых значениях p факел находится внутри спирали теплообменника, а с ростом p выходит из него.

Значения коэффициентов Рейнольдса определялись с учетом зависимостей $\rho(T)$ и $\nu(T)$ по формуле $Re = \nu \cdot d_\phi / \nu(T)$, где d_ϕ - диаметр сопла форсунки.

При расчете чисел Вебера для струи

$$We = \sigma^{-1} \rho_\infty \nu^2 d_\phi = 2\varepsilon^2 \phi^{1/2} \frac{\rho_\infty d_\phi \Delta p}{\rho(T) \sigma(T)}$$

учитывалось изменение поверхностного натяжения топлива. Поверхностное натяжение топлив плотностью от 0.60 до 0.92 находится в линейной зависимости от плотности [16, 17]: $\sigma = (5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_4^{20} - 1.5) \cdot 0.01$ мН/м. В интервале температур от –30 до 100°С поверхностное натяжение находится в линейной зависимости от температуры [16, 17]: $\sigma = \sigma_0 - \alpha t$, где $\alpha \approx 10^{-4}$ Н/(м·°С). Величина σ равна 26 мН/м, 24 мН/м и 16.3 мН/м для температур 0°С, 20°С и 97°С, соответственно.

Тепловая мощность установки, рассчитывалась по низшей теплоте сгорания топлива ТС-1 ($H = 42915$ кДж/кг) [16] по формуле: $P_T = Q \cdot \rho_\infty \cdot H$. Для указанных (табл. 1) режимов работы форсуночных узлов она составляет 8.6 МВт, 114.8 МВт и 203.3 МВт. Эксперименты проводились в полевых условиях. Топливная смесь поджигалась при выходе из форсунки асбестовым факелом, питанным керосином ТС-1.

При подаче давления (80 – 100 атм) на форсунку внутрь магистрали высокого давления отходит волна разрежения, реализующая автоколебательный режим течения топлива по топливной магистрали [2, 18] и «ударный» тепловой режим кипения [13, 19], сопровождающийся интенсивным гомогенным образованием термофлуктуационных зародышей паровой фазы. Гетерогенное зародышеобразование реализуется из-за неизбежного наличия микропримесей в составе топлива [16] и шероховатостей стенок выпускного сопла форсунки.

Тепловые и гидродинамические процессы, происходящие в истекающей струе, приводят к сильному развитию поверхности раздела «жидкость – пар» непосредственно на выходе из форсунки. Вскипающее топливо растягивается пузырьками пара в тонкие пленки и нити [20], которые, разрушаясь, образуют аэрозольное облако с большим количеством мелких капель с корзинообразной неустойчивостью [20]. Непрерывный процесс дробления перегретой струи на капли обусловлен кавитацией, турбулентными пульсациями и аэродинамическим взаимодействием со средой. При наличии в топливе воды капли топливоводяной эмульсии переходят на пульсационный режим испарения капли [21] с каскадным механизмом микровзрывов капель при воспламенении [22]. Таким образом, что зону испарения дестабилизируют коротковолновые возмущения.

Эффект закрутки топливной струи на выходе из форсунки определяется интенсивностью G , характеризуемой отношением средней линейной скорости

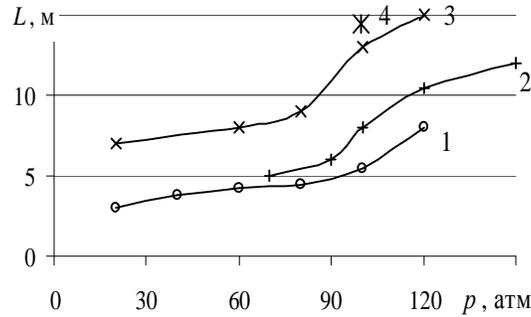


Рис. 3. Зависимости $L = L(p)$ при Q равном: 0.25 л/с (1); 2.5 л/с (2); 3.4 л/с (3); 6.02 л/с (4)

вращения и осевой скорости частицы газа в потоке [3]. Центробежная форсунка со шнеком производительностью 3.4 л/с при перепаде давления в диапазоне 20 – 80 атм обеспечивает тангенциальную составляющую скорости на выходе к огневому потоку. Шнек содержит два канала [11] с углом наклона 45° , поэтому параметр закрутки [3] на выходе из форсунки $S = \frac{G/2}{1 - (G/2)} = 1.0$. Здесь $G = \omega/u$

$= 1$ и определяется отношением горизонтальной (окружной) и вертикальной (осевой) составляющих скорости течения топлива по каналу шнека. При малых величинах давления подачи топлива (20 – 60 атм) структура топливной струи на выходе имеет форму спирального вихря, а факел в своем начальном сечении приобретает интенсивную закрутку [3]. Угол раскрытия струи при выходе из сопла форсунки составляет 120° , т.е. близок к расчетной величине (табл. 1, 2). При росте давления топлива его температура падает, вязкость топлива в форсуночном диффузоре растет, тангенциальная составляющая импульса уменьшается, угол раскрытия струи падает до $(45 - 60)^\circ$ (при 120 атм), а S приближается к значению 0.3. Закрутка струи практически исчезает и отличия в способе подачи топлива сглаживаются. Роль механизма взаимодействия топлива с кромкой сопла в общем процессе диспергирования уменьшается. Распределение капель по размерам смещается в сторону их укрупнения по оси струи. Результирующее увеличение аксиальной составляющей импульса топлива и размера капель приводит к росту областей подготовки и горения. Общая длина факела резко растет, а его диаметр уменьшается (см. далее).

Начальная температура топлива с ростом давления нелинейно падает (см. рис. 2), а плотность топлива с падением температуры растет линейно (см. рис.1). Поэтому плотность топлива с ростом давления медленно нелинейно растет с задержкой изменения в диапазоне 80 – 100 атм. При этом вязкость топлива растет быстрее, но с задержкой в том же диапазоне, определенном функцией $t(p)$ (см. рис. 2). С ростом давления скорость истечения топлива слабо растет, а число Рейнольдса существенно падает. При падении температуры нижней части факела скорость реагирования топливовоздушной смеси также падает. Очевидно, что высота факела должна расти, даже при неизбежном падении скорости потока воспламененной топливовоздушной смеси. Перегиб графика (рис. 3)

объясняется наличием у форсуночной горелки теплообменника [10], обеспечивающим форму функции $t(p)$. При росте Q точка перегиба функции $L(p)$ ожидается смещается в сторону меньших значений давлений (рис. 3).

При запуске импульсной газовой «холодной» струи с осевой симметрией формируются три вида тороидальных вихрей с разными причинами образования. Общепринятый механизм образования на кромке сопла первичного массового вихревого кольца, подобного по своей природе кольцевым вихрям Вуда, определен Прандтлем в форме взаимодействия импульсного потока с кромкой выходного отверстия [8]. Этот механизм дополняется торможением и расширением лобовой части струи, порождающим поперечные течения [23]. Рождение первичного ВК сопровождают мелкомасштабные вихри, возникающие вследствие неустойчивости сдвигового слоя, образованного взаимодействием расширяющегося потока газа и средой, возбужденной первичной ударной волной. Третий вихрь образуется сворачиванием турбулентного сдвигового слоя вдоль боковой границы струи [24].

Известно, что если один из наложенных потоков движется быстрее друго-

Таблица 2. Геометрические и структурные оценки параметров факела пламени

Рис. №	L , м	α , град	h_i	n	N	R_i	t_i	$k=t_i/R_i$		Вихревая структура	
Рис. 5, а	12	~ 45	2.6	3	1	1.72	2.4	1.4	k_{cp}	Вихревая пара	
			4.9			3.0	2.3	1.0			
			6.8			3.9	4.7	2.5			1.6
			12.0			4.2	5.6	1.3			
Рис. 5, б	10,5	~ 60	2.5	4	-	1.7	3.0	1.8	k_{cp}	Вихревая структура Вихревая структура Вихревая структура Вихревая структура	
			4.8			2.4	2.8	1.2			
			7.6			2.3	2.9	1.3			1.3
			10.4			4.0	3.0	0.75			
Рис. 5, в	9	~ 120	1.0	3	1	2.0	1.0	0.50	k_{cp}	Винтовой вихрь Вихревая структура Вихревое кольцо	
			4,2			3,7	2,0	0,54			
			10,5			5,7	5,5	0,96			0,7
Рис. 4, а	8	~ 80	2.5	3	1	1.5	1.9	1.3	k_{cp}	Вихревая структура Вихревая структура Вихревое кольцо	
			3.8			2.7	3.0	1.1			
			9.0			4.5	5.5	1.2			1.2
Рис. 4, б	6	~ 100	2.4	2	1	1.9	2.0	1.1	k_{cp}	Вихревая структура Вихревое кольцо	
			5.2			2.5	3.0	1.2			1.2
Рис. 4, в	5	~130	0.8	4	2	1.0	0.4	0.4	k_{cp}	Тороидальный вихрь Вихревая структура Вихревое кольцо Вихревое кольцо	
			2.0			1.6	2.0	1.3			
			4.8			3.2	3.0	0.9			0.9
			8.5			4.7	4.0	0.9			

Обозначения. L – длина факела (видимая светящаяся часть), м; α – угол раскрытия факела при выходе из форсунки, град; h_i – расстояние от выходного сечения форсунки до нижней кромки i – той вихревой макроструктуры в факеле, м; n – количество вихревых макроструктур в факеле; N – количество сформированных конечных ВК; R_i – максимальный радиус вихревой структуры, м; t_i – шаг вихревых структур по длине факела, м. Шаг определялся от нижней кромки светящегося факела и как расстояние между сечениями вихревых структур с R_i .

го, то неизбежно проявляется неустойчивость Кельвина – Гельмгольца. Более быстрый поток получает синусоидальные возмущения с наиболее неустойчивой частотой. Образуются межповерхностные структуры типа «кошачий глаз» или их последовательности в форме валов (бигуди) [20, 25]. Большое количество подсасываемого атмосферного воздуха пропорционально количеству движения газа (эффект Коанда) и является результатом безотрывного потока по поверхности существенной кривизны и обусловленного этим падением давления [26]. Основной вклад в неустойчивость фронта пламени вносит его перемещение в сторону увеличения объема. Поэтому длинноволновые возмущения дестабилизируют области подготовки и горения [27].

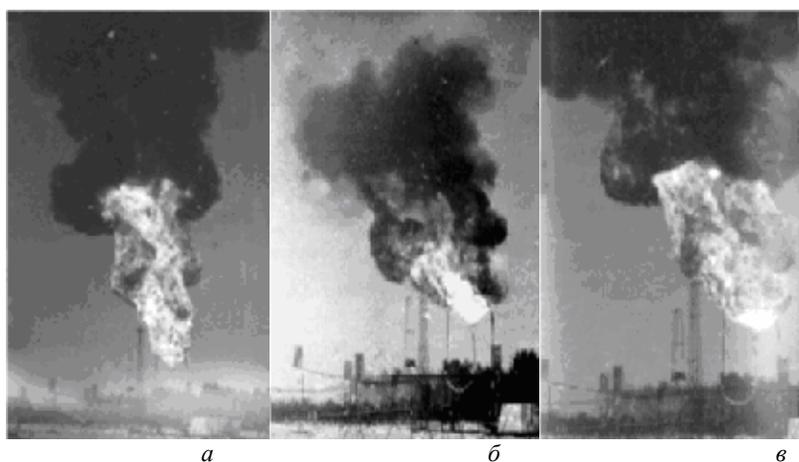


Рис. 4. Компьютерная версия первого (а) и двух последних (б) и (в) фотоснимков серии при непрерывной работе метеотрона III. Эксперимент № 1 (15.12.1978 г). Продолжительность съемки 15 мин. Производительность гидронасоса 3,4 л/с.

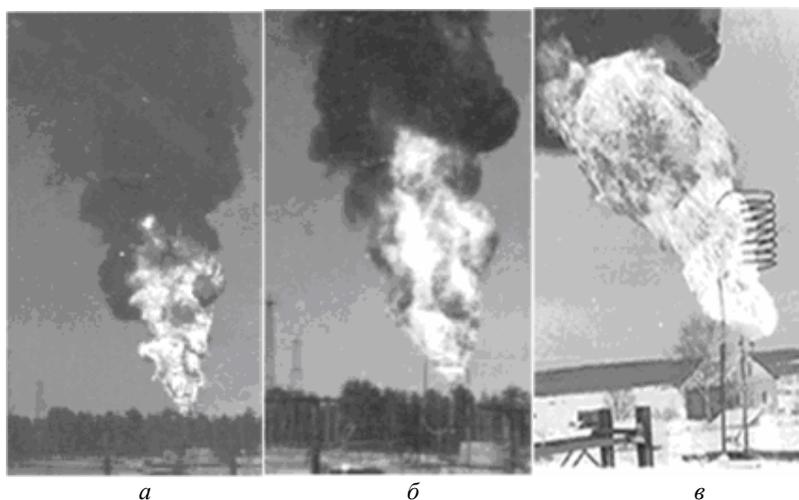


Рис. 5. Компьютерная версия двух последовательных (а) и (б) фотоснимков при непрерывной работе метеотрона III [1]. Эксперимент № 2 (15.12.1978). Продолжительность работы 10 мин. Эксперимент 1.03.79 (в). Производительность гидронасоса 3,4 л/с в обоих экспериментах.

Из систематизированных данных (рис. 4, 5, табл. 2.) видно, что при увеличении давления подачи топлива угол раскрытия факела падает, длина факела увеличивается, уровень организации нижней вихревой структуры растет с изменением качества (от винтового вихря - до вихревой пары). При этом очевидна тенденция на убывание числа крупномасштабных вихревых структур в факеле пламени. Для количественной оценки гидродинамической гомохронности факела используется соотношение шага t_i вихревых структур по длине факела к максимальному радиусу R_i вихревой структуры [28].

Коэффициент k аналогичен обратному числу Струхала (St) и характеризует меру отношения ускорения в данной точке к переносному (конвективному) ускорению. В указанном направлении анализа значение k_{cp} возрастает (см. табл. 2), а число St падает. Для заданной конструкции форсуночной горелки и при постоянных метеоусловиях по величине k_{cp} можно интегрально оценивать динамическую структуру факела пламени. При этом по текущей величине k по длине факела можно оценивать форму вихревой макроструктуры.

Лабораторные исследования с вихревыми кольцами малого диаметра [28] показали, что одинаковые вихревые кольца «нанизанные на одну ось» могут дать устойчивую вихревую структуру в форме винтового вихря при соотношении шага винта к общему радиусу, превышающем $k = 0,3$. При параметре закрутки $S > 0,6$ и $k = 0,5$ очевидно стремление факела к закрутке непосредственно на выходе из форсунки с организацией устойчивого винтового вихря (рис. 4 в, 5 в). Известный эффект утолщения факела при начальной закрутке [3] с уменьшением длины факела препятствует в случае (рис. 4, в) развитию структуры винтового вихря. При значениях k более 1,2 появляются возмущения [28], выраженные в периодических отклонениях от круговой формы (рис. 5, а, рис. 4, табл. 2). Так винтовой вихрь при росте величины k вверх по потоку естественно переходит в качественно новую конвективную структуру, сходную со сферическим вихрем Хилла (рис. 4, в). Все вихревые структуры в области горения факела имеют «манжетную» форму с одинаковой во всех опытах северо-западной ориентацией в пространстве (см. рис. 4, 5). Ветровой поток по «розе ветров» объясняет и кажущиеся «массивными» области вихрей с подветренной стороны. Далее и вверх по потоку величина k меняется нелинейно, и любая вихревая макроструктура трансформируется в вихревое кольцо.

Во всех опытах прослеживается непрерывное стремление факела к построению динамической ярусной вихревой структуры в форме эффекта «пыления» (табл. 2, рис. 4, 5). Геометрические параметры высоты над форсункой h_i и шага t_i вихревых структур по длине факела L повторяются, поэтому вихревые структуры можно назвать когерентными.

На рис. 5, а отчетливо видна начальная генерация индуцированного вихря с обратной закруткой. Согласованное чередование вихрей с разной закруткой не позволяет соседним вихрям организовывать «чехарду» или объединяться при поперечном сдвиге. Можно сказать, что по длине факела они структурно выявляют волновой процесс продольных периодических пульсаций, генерируемых конструкцией установки. При этом каждый второй вихрь является индуцированным (с обратной циркуляцией). При сильном поперечном сдвиге

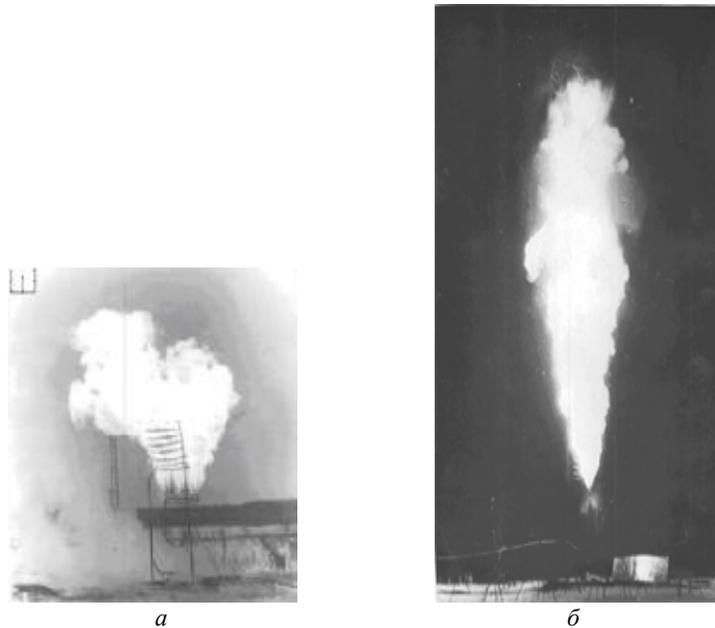


Рис. 6. Факелы пламени при работе метеотрона III в режиме 100 атм с модификацией 4 (а) и 4 (б) форсуночных узлов. Производительность гидронасоса 6.04 л/с

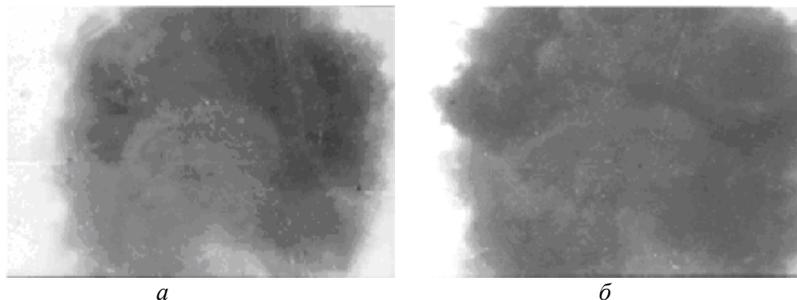


Рис. 7. Компьютерные версии фотоснимков начального участка струи

нижняя вихревая структура и индуцированная вихревая структура с обратной циркуляцией организуют общую закрутку струи (винтовой вихрь). Таким образом, создавая необходимые ускорения потока и, являясь звеном обратной связи между возмущениями параметров среды и скоростью тепловыделения, пламя управляет вихревым движением [6, 8].

При изменении способа подачи топлива с тангенциального на аксиальный, с применением струйной форсунки, закрутка струи в интервале режимов исследования исчезает практически полностью.

При замене центробежной форсунки со шнеком на струйную форсунку или систему струйных форсунок вихреобразование смещается в сторону уменьшения размеров динамических структур (рис. 6). Для системы струйных форсунок в коллекторе (рис. 6, а, сверху) характерно взаимодействие факелов форсуночных пламен с интенсификацией перемешивания и мелкомасштабной турбулентности. Вертикальные составные факела притягиваются вовлечением возду-

ха из промежуточных областей. Это приводит к потере их осевой симметрии, сильной горизонтальной неустойчивости, уменьшению длины и увеличению ширины общего факела. При увеличении ширины факела начинает проявляться тангенциальная составляющая скорости ветра в форме организации приземной смерчевой структуры. Одна струйная форсунка в качестве источника организует вертикальный факел длиной 13 – 15 м с осевой симметрией. Структура области подготовки длиной до 3 м сформирована в границах от нижней кромки приподнятого пламени до симметричного валообразного утолщения импульсом, исходящего из форсунки топлива. Структура области горения длиной до 6 м формируется импульсом горячей топливно-воздушной смеси. Ее верхняя граница очерчена контуром головки факела. Организация вихревого кольца в области головки факела заметна по наличию протуберанца [25] (рис. 6, б). Третья область догорания высотой до 4 м характеризуется большим количеством разномасштабных вихревых структур. Эта область является начальным участком вертикальной задымленной нагретой струи. На этом участке с наветренной стороны снизу в направлении наклона струи «по ветру» от факела пламени хорошо различима структура нагретых вихревых колец на более темном фоне «холодных» клубов струи (рис. 7).

Снизу на рис. 7, а видна верхушка факела и вихревые кольца постоянного диаметра, генерируемые по оси факела. Генерация вихревых колец, соосных с факелом пламени, определяется собственными продольными пульсациями факела. На рис. 7, б представлена характерная ситуация выше по струе. Здесь вихревые кольца на определенном ярусе отходят от осевого перемещения, обретая автономную динамику с качественно иным взаимодействием [29, 30].

Выводы:

1. Турбулентный вертикальный факел пламени с предварительной закруткой генерирует вихревые структуры в форме вихревых пар в нижней части факела.
2. Вихревые пары реорганизуются в устойчивые динамические вихревые макроструктуры «манжетной» формы или объединяются в винтовой вихрь.
3. Сферический вихрь Хилла организуется в форме вырождения винтового вихря. Вихревое кольцо организуется в форме вырождения вихревой макроструктуры.
4. Собственные осевые пульсации пламени являются независимыми источниками генерации вихревых колец.

Литература:

1. *Бызова Н.Л.* Самовозбуждающиеся колебания в потоках тепловой конвекции // Доклады АН СССР, сер. Геофизика. – 1950. – Т. 72, № 4. – С. 675-678.
2. *Власов Е.В., Гиневский А.С.* Когерентные структуры в турбулентных струях и следах // Итоги науки и техники. – М.: ВИНТИ. Механика жидкости и газа. – 1986. – Т. 20. – С. 3-84.

3. *Гупта А., Лилли Д., Сайред Н.* Закрученные потоки – М.: Мир, 1987. – 588с.
4. *Борисов А.Г., Кузнецов В.Р., Шедогубов Ю.М.* Влияние линейных и нелинейных эффектов на крупномасштабную структуру турбулентности в течениях струйного типа // *Механика жидкости и газа.* – 1989. – № 4. – С. 45-54
5. *Березин Ю.А., Трофимов В.М.* Генерация крупномасштабных вихрей под действием неравновесной турбулентности// *Механика жидкости и газа.* – 1996. – № 1. – С. 47-55.
6. *Самсонов В.П.* Самопроизвольные вихревые структуры в пламени. – Томск: Изд-во Том. ун-та. – 2003. 124 с.
7. *Ахметов Д.Г., Никулин В.В., Петров В.М.* Экспериментальное исследование автоколебаний, возникающих при истечении закрученной струи // *Механика жидкости и газа.* – 2004. – №3. – С.60-68.
8. *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
9. *Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г.* Установка для получения вихревых колец в свободной атмосфере// *Прикладные проблемы механики жидкости и газа.* – СГТУ, Севастополь, 2001. – С.122-125.
10. *Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г.* Форсуночные горелки метеотронов II и III// *Современные промышленные технологии.* – НГТУ, Н. Новгород. – 2005. С.11
11. *Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г.* Форсунки метеотронов II и III // *Современные промышленные технологии.* – НГТУ, Н. Новгород. – 2005. – С. 12
12. *Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г.* Модификации горелок метеотрона III // *Современные промышленные технологии.* – НГТУ, Н. Новгород. – 2005. – С.13.
13. *Копыт Н.Х., Стручаев А.И., Краснощеков Ю.И., Рогов Н.К., Шамшев К.Н.* Горение больших объемов диспергированных топлив и эволюция их продуктов в свободной атмосфере // *Физика горения и взрыва.* – 1989. – № 3. – С. 21-28.
14. *Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г.* Производство кольцевых вихревых колец продуктов сгорания в свободной атмосфере // *Дисперсные системы.* – ОНУ, Одесса. 2002. – С. 163-164
15. *Баррер М., Жомотт А., Вебек Б.Ф., Ванденкеркхове Ж.* Ракетные двигатели. – М.: Оборонгиз. 1962. – 176 с.
16. *Нефтепродукты (Справочник).* // Под ред. *Лосикова Б. В.* М.: – Химия. 1966. – 776 с.
17. *Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания* // Под ред. *Н. Ф. Дубовкина.* – М.: Гостехиздат. 1962. – 288 с.
18. *Стрелков С.П., Бендриков Г.А., Смирнов Н.А.* Пульсации в аэродинамических трубах и способы демпфирования их. – Тр. ЦАГИ. 1946. – № 593. – 56с.
19. *Скрипов В. П.* Метастабильная жидкость. – М.: Наука. 1972. – 270 с.

20. Альбом течений жидкости и газа // Сост. и авт. текст *М. Ван-Дайка*: Пер. с англ. *Л.В. Соколовской* // Под ред. *Г.И. Баренблатта* и *В.П. Шидловского*. – М.: Мир. – 1986. – 180 с.
21. *Кондратьев Е.Н., Опятюк В.В., Семенов К. И.* Пульсационный режим испарения капли водно-топливной эмульсии // *Физика аэродисперсных систем*. 2003. – №. 40. – ОНУ, Одесса. – С. 71.
22. *Кондратьев Е.Н., Опятюк В.В.* Каскадный механизм микровзрывов капли водно-топливной эмульсии // *Дисперсные системы*. – Украина, ОНУ, Одесса, 2006. – С. 42-43.
23. *Петров П.А.* Механизм образования вихревых колец // *Механика жидкости и газа*. – 1973. – № 2. – С. 19-26.
24. *Голуб В.В., Шмельмейстер А.М.* Стартовые ударные волны и вихревые структуры, возникающие при формировании струй // *Механика жидкости и газа*. – 1988. – № 5. – С.146-150.
25. *Скорер Р.* Аэрогидродинамика окружающей среды: Пер. с англ.// Под ред. А.Я. Прессмана. – М.: Мир. – 1980. – 549 с
26. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени: Пер. с англ.// Под ред. *Н.А. Чигир*. – М.: Машиностроение. 1981. – 407 с.
27. *Гришин А.М., Зеленский Е.Е.* Аперидическая неустойчивость фронта верхового лесного пожара// *Физика горения и взрыва*. – 1998. – Т.34, №5. – С.23-28.
28. *Лэмб Г.* Гидродинамика: пер. с англ. А.В. Гермогенова и В.А. Кудрявцева // Под ред. *Н.А. Слезкина*. – М.-Л.: ОГИЗ, Гостехиздат, 1947. – 929 с.
29. *Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г.* Исследование взаимодействия крупномасштабных вихревых колец в свободной атмосфере // *Дисперсные системы*. ОНУ, Одесса. 2004. – С.184-185.
30. *Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г.* Экспериментальные исследования кольцевых вихрей продуктов сгорания в свободной атмосфере // *Физика аэродисперсных систем*. – № 43. – 2006. – С. 100-106.

Кузнецов А.А.

Експериментальне дослідження динамічної структури вертикального факела полум'я при роботі метеотрона III

Анотація

При роботі установки метеотрон III у смолоскиповому режимі безперервного генератора вертикального нагрітого струменя при розігрятій спіралі теплообмінника у вільній атмосфері створюється могутній факел полум'я обсягом до 250 м³ і струмінь нагрітих продуктів згорання з розрахунковою додатньою плавучістю до 450 м у стандартній атмосфері. Розглянуті функціональні можливості установки. За візуальними спостереженнями й комп'ютерним версіям фотографій проаналізовані вихрові структури в факелах полум'я й запропоновані механізми їх порушення, організації й еволюції.

Kuznetsov A.A.

**Experimental research of the flame vertical torch dynamic structure
at meteotron III work**

Summary

At work of the meteotron III installation in a torch mode of the continuous generator of the vertical hot jet at heated spirals of a heat-exchanger in free atmosphere was created a powerful torch of a flame (volume up to 250 m³) and hot combustion products jet with calculated positive buoyancy up to 450 m in the standard atmosphere. Functionalities of meteotron III installation were considered. By visual observation and digital images vertex structures in torches of a flame were analyzed and mechanisms of their excitation, the organization and evolution were offered.