

Динамика подъема облака продуктов сгорания при огневой утилизации зарядов твердотопливных энергоустановок на открытом стенде. Процессы и их идентификация

В.П. Лушев¹, А.В. Литвинов¹, Н.Ю. Демидов¹,
С.Н. Козлов^{2,3*}, В.В. Рейно^{3*}

¹ОАО «ФНПЦ «Алтай»

659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1

²Бийский технологический институт

659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 20.04.2012 г.

С позиции оценки эффективности технических природоохранных мероприятий по экологической защите окружающей среды проведены экспериментальные исследования формирования и подъема облака продуктов сгорания (ПС) при сжигании двух идентичных твердотопливных зарядов крупногабаритных энергетических установок на открытом стенде. В одном из опытов использовано орошение факела продуктов сгорания водой с помощью высоконапорного кольцевого коллектора системы водяной экологической защиты для осаждения загрязняющих компонентов смеси в санитарно-защитной зоне стенда. Приведены результаты измерений температуры облака в динамике подъема с использованием тепловизионной регистрации инфракрасного изображения и видеосъемки ПС. Установлены характерные особенности процессов от формирования до максимальной высоты подъема. Предложена система параметров, определяемых методами натурных наблюдений, применимых в качестве исходных данных для математического моделирования распространения продуктов сгорания в атмосфере.

Ключевые слова: твердотопливный заряд, открытый стенд, облако продуктов сгорания, натурные наблюдения, инфракрасное изображение, экологическая безопасность; solid-fuel charge, open test bench, cloud of combustion products, *in situ* observations, infrared image, ecological safety.

Введение

Обеспечение экологической безопасности — необходимое и важнейшее условие при огневых испытаниях и ликвидации по завершении эксплуатации крупногабаритных твердотопливных зарядов (ТТЗ) энергетических установок (ЭУ) на открытом стенде [1–3]. На предприятии в качестве одного из основных технических природоохранных мероприятий в течение ряда лет применяется система водяной экологической защиты (ВЭЗ), выполненная в виде многоступенчатого напорного кольцевого коллектора для орошения факела продуктов сгорания (ПС). Схема сжигания приведена на рис. 1 (цв. вклейка).

Стенд рассматривается как точечный источник выброса в атмосферу загрязняющей смеси высокой концентрации, действующий в течение относительно небольшого отрезка времени. Открытое сжигание ТТЗ ЭУ характеризуется следующими неблагоприятными факторами, воздействующими на окружающую среду: факел продуктов сгорания с расходом от 150 до 500 кг/с и температурой до 3400 К; содержание углекислого газа около 20%, паров воды до 20%; наиболее опасные загрязняющие компоненты — хлористый водород и мелкодисперсный оксид алюминия, составляющие соответственно 18–22 и 30–40% от массы ПС.

Математическое моделирование распространения ПС в атмосфере [4, 5] обеспечивает точность расчета в рамках ограниченных по достоверности предположений и допущений о механизмах протекающих процессов и метеорологических условиях. В связи с этим необходимы экспериментальные исходные данные при разработке базовой математической модели

* Владимир Прокопьевич Лушев (post@frpc.secna.ru); Андрей Владимирович Литвинов; Никита Юрьевич Демидов; Станислав Николаевич Козлов (magistrus@city.ru); Владимир Владимирович Рейно (reyno@iao.ru).

прогноза распространения загрязнения в атмосфере и на прилегающей к стенду территории для оперативной оценки эффективности используемой системы ВЭЗ.

Ниже приводятся результаты натуральных наблюдений с помощью тепловизионной измерительной системы и видеосъемки процесса формирования и подъема облака ПС при сжигании двух одинаковых ТТЗ ЭУ массой 20 т. Сжигание в том и другом случае проводилось в первой половине дня при атмосферном давлении около 100 кПа.

Первый опыт без применения ВЭЗ (далее «сухое» сжигание) проводился при температуре воздуха 296 К, влажности 57%, скорости ветра 0–1 м/с, направлении С-В, ясно, метеорологической дальности видимости 20 км.

Во втором опыте применялась система ВЭЗ с расходом воды 1,3 м³/с. Среднее соотношение расхода ПС и воды, поступающей из коллектора, поддерживалось на уровне 1:4. Температура воздуха 283 К, влажность 64%, скорость ветра 0–1 м/с, направление С-В, ясно, дальность видимости 15 км.

Цель работы – исследование распространения облака продуктов сгорания в атмосфере для оценки эффективности применения системы ВЭЗ при сжигании крупногабаритных ТТЗ ЭУ на открытом стенде.

Задачей натуральных наблюдений является получение в реальном времени численных значений параметров, характеризующих изменение состояния облака от исходного в стадии формирования до максимальной высоты всплытия.

Экспериментальные результаты

Условия измерений и общая характеристика процесса подъема облака ПС. Отсчет времени устанавливался с момента начала сжигания. Наблюдения выполнялись с расстояния примерно 2600 м фронтально к отбойной стенке площадки сжигания. Видимая ширина отбойной стенки около 100 м. Видеосъемка облака проводилась с двух постов под углом около 100°. Данные видеосъемки при необходимости могут использоваться также в оценках расстояния до облака для корректировки расчета пропускания ИК-излучения атмосферой при тепловизионных измерениях температуры.

По данным тепловизионной и видеосъемки пространство перед отбойной стенкой заполнялось продуктами сгорания в течение первых 3–5 с сжигания. За верхней гранью отбойной стенки по направлению факела на высоте около 20 м вертикальное движение облака было доминирующим. Учитывая то, что высота отбойной стенки над площадкой сжигания равна 32 м, в качестве совокупности исходных параметров пускового вертикального течения для оценки распространения и рассеивания облака смеси в атмосфере рассматриваются значения мощности выброса, скорости подъема и средней температуры ПС в зоне отбойной стенки до высоты $h \approx 50$ м. Влияние ветра на данном участке не учитывается.

По данным видеосъемки и тепловизионной регистрации установлено, что подъем облака в обоих опытах характеризуется как осесимметричное вертикальное течение, начальный этап которого определяется притоком ПС от высокотемпературного факела. Изменение ветра с высотой не наблюдается. Следовательно, можно считать, что в слое атмосферы до максимальной высоты подъема облака ПС опыты проводились в шттилевых условиях.

Тепловизионные измерения. Измерения температуры выполнялись бесконтактным способом с помощью инфракрасного (ИК) измерительного комплекса [5, 6], регистрирующего в реальном времени температурную карту контролируемого объекта. Регистратор выполнен на базе тепловизора AGA-780 SW (диапазон длин волн 2,5–5,5 мкм) (Швеция), модернизированного в ИОА СО РАН. При записи теплового изображения регистратор использует непосредственно видеосигнал ИК-сканера с 12-разрядной оцифровкой. Запись и просмотр записанной реализации тепловизионных изображений могут выполняться с частотой 25 кадров/с, а также и в покадровом режиме. За время одной утилизации ЭУ регистрируется более 7500 тепловизионных кадров. Изображение тепловизионного кадра включает цветотемпературную карту объекта в полутонах в прямоугольных координатах и в правой части шкалу в градусах Цельсия или карту и шкалу интенсивностей в кодах АЦП – режим радиометра. Формат записываемого кадра 100 × 100 элементов, длительность 0,04 мс. Регистратор откалиброван по абсолютным значениям температуры на модели «черного» тела до 723 К для используемых объективов и всех положений апертурной диафрагмы сканера.

Тепловизионная съемка производилась с расстояния 2600 м объективом с полем зрения 20° при значении апертурной диафрагмы 5,1. При измерениях распределения температуры на поверхности облака учитывалась функция пропускания атмосферы для спектрального интервала длин волн от 2,5 до 5,5 мкм, она рассчитывалась с использованием алгоритма быстрого счета [7], учитывающего поглощение всех газов и аэрозольное ослабление на горизонтальной трассе. Значения коэффициента излучения поверхности облака принимались близкими к единице, так как облако представляет собой смесь водяного пара, углекислого газа и грунта. В пространстве, в плоскости отбойной стенки, исследуемый объект непрерывно наблюдался в кадре размером примерно 1000 × 1000 м. Единичный элемент кадра составляет приблизительно 10 × 10 м.

На рис. 2 приведены зависимости температуры продуктов сгорания от времени в зоне отбойной стенки по результатам покадровой обработки ИК-изображения облака от момента пуска до окончания сжигания (без водяной экологической защиты и с применением ВЭЗ). Полученные данные позволяют провести анализ влияния системы ВЭЗ на исходные параметры пусковой струи – начального этапа в процессе подъема облака.

Оценка начальных параметров. При «сухом» сжигании средняя температура T_1 облака ПС в рай-

оне отбойной стенки до высоты 50 м (рис. 2, а) составляет 413 К. При сжигании с применением ВЭЗ для тех же координат облака (рис. 2, б) средняя температура $\bar{T}_2 = 313$ К. Разница между измеренными значениями средних температур в опытах $\Delta\bar{T} \approx 100$ К.

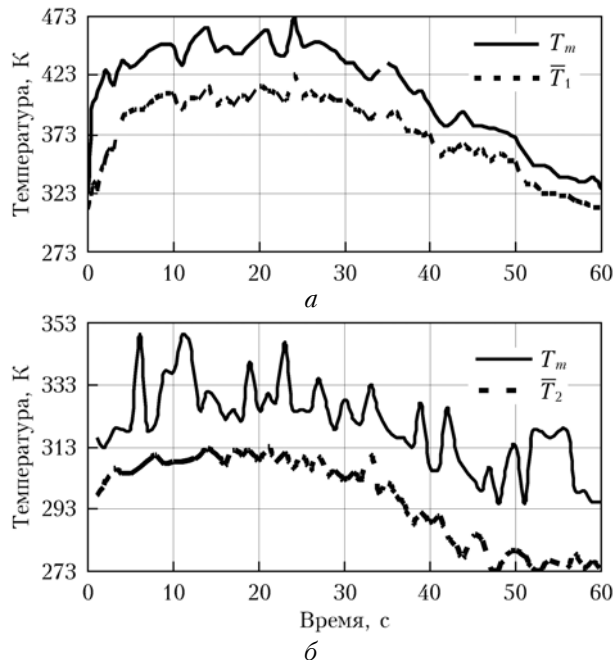


Рис. 2. Диаграммы изменения максимальной T_m и средней \bar{T} температуры облака продуктов сгорания в зоне натекающая факела на отбойную стенку до высоты облака 50 м над площадкой сжигания: а – без применения ВЭЗ; б – с орошением факела системой ВЭЗ

Температура факела T_{in} на выходе из камеры сгорания, по данным работы [8], принимается равной 3400 К. При уменьшении температуры происходит снижение теплосодержания ПС приблизительно до 1720 Дж/(кг · К).

Уменьшению температуры в «сухом» опыте $\Delta\bar{T}_1 = T_{in} - \bar{T}_1 = 2987$ К соответствует изменение энтальпии $\Delta H_1 = 5,138$ МДж/кг. Снижение температуры ПС во втором опыте $\Delta\bar{T}_2 = T_{in} - \bar{T}_2 = 3087$ К, а изменение энтальпии $\Delta H_2 = 5,310$ МДж/кг. Разница в изменении теплосодержания смеси ПС по данным измерения температуры в контролируемой зоне $\Delta H = \Delta H_2 - \Delta H_1 = 0,172$ МДж/кг.

Анализ влияния ВЭЗ на параметры начальных условий формирования облака ПС проведем в рамках следующих предположений.

Первое. Снижение температуры в зоне измерений происходит в результате взаимодействия факела и системы ВЭЗ.

Второе. Полученные данные обусловлены только потерями теплосодержания ПС на нагрев всей воды, подаваемой из коллектора на орошение факела, до температуры кипения.

Если принять справедливым это предположение, то оценка разницы в средних температурах $\Delta\bar{T} = \Delta H / (g C_p) = 10,3$ К. Здесь $g = 4$ – отношение расхода воды к среднему расходу продуктов сгорания;

$C_p = 4190$ Дж/(кг · К) – удельная теплоемкость воды. Приведенная оценка на порядок отличается от разницы средних значений температуры, измеренных в опытах: $\Delta\bar{T} = \bar{T}_1 - \bar{T}_2 \approx 100$ К.

Третье. Разница значений температуры в опытах обусловлена тем, что при орошении факела часть воды нагревается до температуры кипения, превращается в пар и смешивается с продуктами сгорания.

Значение теплоты парообразования воды $r = 2,26$ МДж/кг, что в 6,7 раза больше, чем при нагреве от температуры 293 К до температуры кипения. Минимальная удельная доля воды Δg , нагретая до температуры кипения ($\Delta\bar{T}_3 = 80$ К) и прошедшая парообразование при полном смешении с продуктами сгорания, добавка которой приводит к снижению температуры на ≈ 100 К, определяется из уравнения сохранения энергии и составляет $\Delta g = \Delta H / (\bar{T}_3 C_p + r) = 0,066$. Таким образом, при равенстве всех прочих условий сжигания правомерно третье предположение.

При «сухом» сжигании в поднимающееся облако поступает продуктов сгорания исходного состава (см. выше) $\bar{G}_1 \approx 330$ кг/с, или 20 т/мин.

В опыте с применением ВЭЗ, с учетом принятой выше оценки Δg , образующееся облако представляет собой смесь, содержащую приблизительно на 10% больше паров воды, чем в смеси в «сухом» опыте, т.е. мощность выброса составляет $\bar{G}_2 \approx 360$ кг/с, или около 22 т/мин.

Начальный этап формирования облака ПС как вертикальное течение, выходящее из источника, расположенного над площадкой сжигания на высоте h в приземном слое атмосферы с температурой воздуха T_{at} , можно охарактеризовать следующими параметрами (табл. 1): время от начала сжигания Δt , средняя мощность выброса \bar{G} , средняя скорость подъема \bar{v}_{in} и средняя температура \bar{T} .

Таблица 1

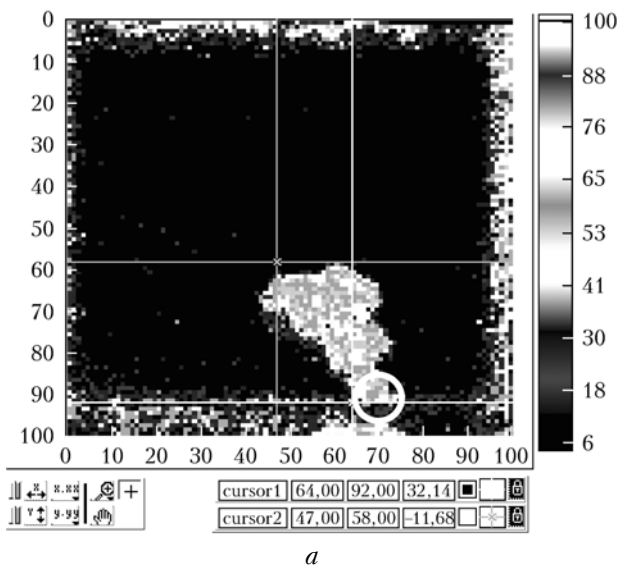
Начальные значения параметров облака продуктов сгорания

| Условия сжигания | T_{at} , К | Δt , с | \bar{G} , кг/с | h , м | \bar{v}_{in} , м/с | \bar{T} , К |
|------------------|--------------|----------------|------------------|---------|----------------------|---------------|
| «Сухое» | 296 | 4,83 | 330 | 50 | 10,4 | 413 |
| С системой ВЭЗ | 283 | 3,49 | 360 | 50 | 14,3 | 313 |

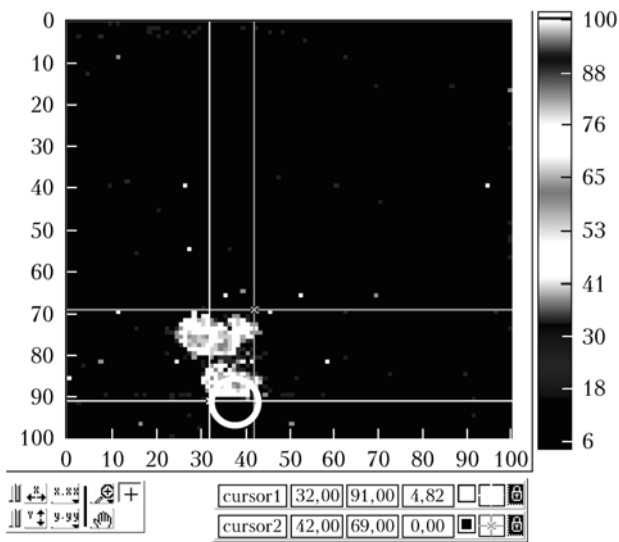
Коллектор ВЭЗ включается на орошение за несколько секунд до начала сжигания, и факел ПС преодолевает барьер из струй воды. Мощность выброса по сравнению с мощностью в «сухом» опыте увеличивается пропорционально поступлению образующихся паров воды в смеси с продуктами сгорания. Этим обусловлена относительно высокая начальная скорость подъема облака \bar{v}_{in} на этой высоте по сравнению со скоростью в «сухом» опыте.

Измерение параметров облака в динамике подъема

Инфракрасные изображения облака ПС на различных стадиях подъема приведены на рис. 3 и 5.



a



b

Рис. 3. Термограмма (№ 1500) облака продуктов сгорания на 60-й с от начала сжигания: *a* – при сжигании без орошения; *b* – с орошением факела системой ВЭЗ

Тепловизионная съемка велась перпендикулярно направлению ветра. Утилизация ЭУ производилась при определенных метеоусловиях в соответствии с требованиями экологической безопасности. Облако ПС должно рассеяться в пределах санитарно-защитной зоны. Наклон к горизонту обусловлен начальным импульсом движения, который сообщается продуктам сгорания направлением факела с азимутом около 30° к трассе наблюдения. На термограммах (см. рис. 3 и 5) нижний курсор соответствует уровню площадки сжигания, а верхний – высоте границы подъема облака за время от начала сжигания. Координаты курсоров по *X* (от 0 до 100) и *Y* (от 100 до 0) и значения температур приведены в таблицах под термограммами, причем отсчет значений ординаты производится сверху вниз из-за особенностей сканирования. Кружком на термограммах обозначена зона отбойной стенки над площадкой сжигания

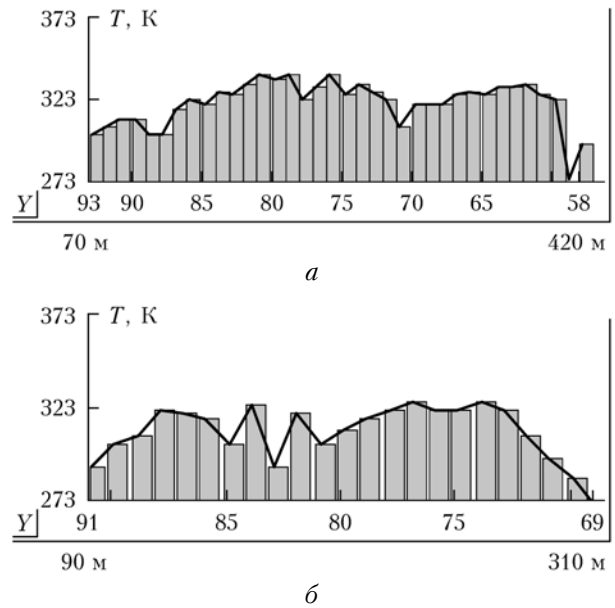


Рис. 4. Температурные профили термограммы (№ 1500) облака ПС (см. рис. 3): *a* – при сжигании без орошения, от 93-й линии на уровне площадки сжигания до верхней границы облака 340 м; *b* – с орошением факела системой ВЭЗ, от 91-й линии на уровне площадки сжигания до верхней границы облака 220 м

для иллюстрации смещения облака. Температурные карты приведены в одном масштабе и с одинаковой температурной шкалой (см. рис. 3 и 5, справа).

Динамика подъема облака при «сухом» сжигании. Облако, образующееся в процессе сжигания (рис. 3, *a*), подобно выбросу от стационарного источника дыма и имеет вид расширяющегося кверху конуса. В процессе подъема происходит фрагментация облака с образованием клубов.

Верхний клуб начинает образовываться на 28-й с от начала сжигания, когда верхняя граница достигает высоты 170 м, а нижняя (на высоте 60–70 м) отделяет его от конвективной колонки. Видимая ширина фрагмента по горизонтали к этому моменту остается близкой к начальному уровню, который был в зоне отбойной стенки, и составляет 140 м. Средняя скорость подъема равна 6,5 м/с, средняя температура $\bar{T} \approx 357$ К.

В табл. 2 приведены некоторые данные о параметрах облака ПС к окончанию сжигания: высота подъема h фронта облака, скорость подъема \bar{v} , температура \bar{T} .

Таблица 2

Параметры облака ПС к окончанию сжигания

| Условия сжигания | T_{at} , К | Δt , с | h , м | \bar{v} , м/с | \bar{T} , К |
|------------------|--------------|----------------|---------|-----------------|---------------|
| «Сухое» | 296 | 60 | 340 | 5,3 | 322,3 |
| С системой ВЭЗ | 283 | 60 | 230 | 2,5 | 316,0 |

Скорость расширения облака около 4,7 м/с. К этому времени конвективная колонка сформировалась в виде двух фрагментов: приземной части, занимающей пространство до 70 м по высоте над площадкой

сжигания, и среднего по положению в пространстве участка протяженностью по вертикали от 70 до 190 м.

На рис. 4, а от нижней границы стенда ($Y = 93$) до верхней границы облака 340 м приведен вертикальный профиль температуры поверхности облака. Распределение температуры в целом отражает деление струи на фрагменты. Наиболее низкая средняя температура $\bar{T} \approx 313$ К наблюдается в приземной части до высоты 60 м ($Y_1 = 93$, $Y_2 = 87$), наиболее высокая $\bar{T} \approx 328,7$ К отмечается на участке колонки от 50 до 220 м ($Y_2 = 88$, $Y_3 = 71$), в верхнем клубе до высот 340 м ($Y_3 = 71$, $Y_4 = 59$) температура меньше и равна 322,3 К.

Верхний клуб смеси замедляет скорость подъема, увеличивается по горизонтали и вертикали со скоростью ≈ 5 м/с. В результате средняя часть конвективной колонки, которая обладает также относительно большим запасом количества движения, смешивается с верхним клубом. Приземная часть конвективной колонки поднимается медленнее, подвергается воздействию осаждающихся продуктов конденсации из верхней части облака, поднимается до максимальной высоты ≈ 330 м и практически вырождается на 5-й мин.

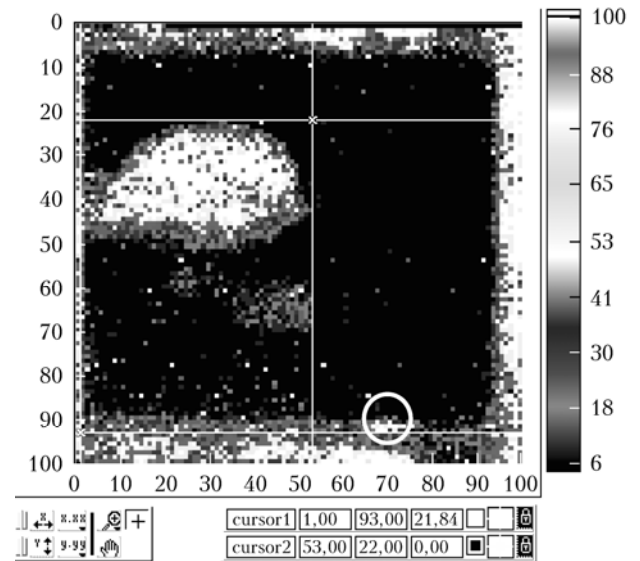
На рис. 5, а приведена термограмма облака на 5-й мин от начала сжигания. Верхняя граница достигает высоты 710 м, теряет сферическую форму и уплощается. К этому времени его ширина составляет 510 м, а размер по вертикали 280 м. Средняя температура фиксируется на уровне 312 К. В течение последующих 2 мин облако всплывает до высоты верхней границы 790 м, расширяется по горизонтали до 540 м и увеличивается по вертикали до 300 м. Средняя температура выравнивается по наблюдаемой термограмме облака и снижается до уровня 303 К.

Динамика подъема облака приведена на рис. 6. Начиная с высоты 630 м, скорость подъема стабилизируется на уровне около 1 м/с. Верхняя граница в течение 5 мин 30 с от начала сжигания поднимается до максимальной высоты ≈ 800 м.

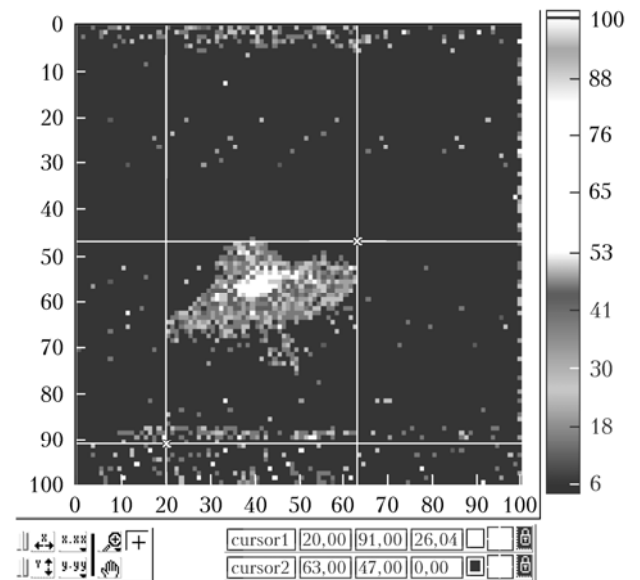
В течение последующих 40–50 мин облако продолжает расширяться, теряет отчетливые границы и растекается над подстилающей поверхностью на высоте примерно 800 м в виде разреженной дымки протяженностью до 1,5 км по горизонтали.

Динамика подъема облака при сжигании с системой ВЭЗ. В этом опыте на высоте приблизительно 100 м из анализа записанной последовательности термограмм, составляющей на 52-й с уже 1300 кадров от начала сжигания, происходит деление облака на два фрагмента (см. рис. 3, б), имеющих близкие размеры как по горизонтали, так и по вертикали. К этому времени фронт облака достигает высоты 210 м. Размер верхнего клуба по горизонтали около 210 м, по вертикали примерно 100 м. Средняя температура $\bar{T} \approx 314,5$ К. Скорость подъема верхнего фрагмента на этом участке 3,2 м/с. Скорость расширения около 1,3 м/с. Приземный клуб в это же время имеет следующие параметры: ширина ~ 160 м, высота по вертикали ~ 90 м, средняя температура $\bar{T} \approx 313$ К.

Динамика подъема облака продуктов сгорания при огневой утилизации зарядов...



а



б

Рис. 5. Термограмма облака продуктов сгорания на конечных стадиях всплыва: а – (т-ма № 6250) сжигание без орошения факела, высота верхней границы облака 710 м над площадкой сжигания, $\bar{T} \approx 303,5$ К, время от начала сжигания 250 с; б – (т-ма № 4500) сжигание с применением ВЭЗ, высота верхней границы облака 440 м над площадкой сжигания, средняя температура в центре $\bar{T} \approx 304$ К, время от начала сжигания 180 с

Некоторые данные о параметрах облака ПС к окончанию сжигания приведены в табл. 2.

На диаграмме рис. 4, б показан вертикальный профиль распределения температуры облака (см. рис. 3, б) от уровня площадки сжигания ($Y = 91$) до верхней границы облака (до $Y = 69$). Значения средней температуры в обоих фрагментах близки по уровню: $\bar{T} \approx 312,2$ К в нижнем фрагменте и $\bar{T} \approx 316,6$ К в верхнем. В промежутке между ними температура смеси на уровне 303 К.

Анализ результатов

Динамику развития облака ПС в целом можно охарактеризовать следующим образом:

- подъем облака под действием начального импульса движения смеси;

- всплытие облака смеси, перегретой относительно атмосферного воздуха, при скорости подъема около 1 м/с;

- квазистойчивое состояние, когда облако достигает максимальной высоты и подъем прекращается.

При «сухом» сжигании скорость подъема облака (1 м/с) устанавливается по достижении высоты 630 м (табл. 3). Инфракрасное изображение облака на данном промежутке подъема очень динамично: происходит интенсивное перемешивание смеси благодаря начальному импульсу поступательного движения. Существенного осаждения конденсата из облака средствами наблюдения не регистрируется. Поэтому можно предположить, что к окончанию этого этапа облако содержит количество ПС, близкое к исходной массе выброса за вычетом приземной части конвективной колонки.

Таблица 3

Параметры облака ПС по достижении скорости подъема около 1 м/с

| Условия сжигания | T_{at} , К | Δt , с | h , м | \bar{v} , м/с | \bar{T} , К |
|------------------|--------------|----------------|---------|-----------------|---------------|
| «Сухое» | 296 | 150 | 630 | 1,0 | 316 |
| С системой ВЭЗ | 283 | 100 | 380 | 1,0 | 304 |

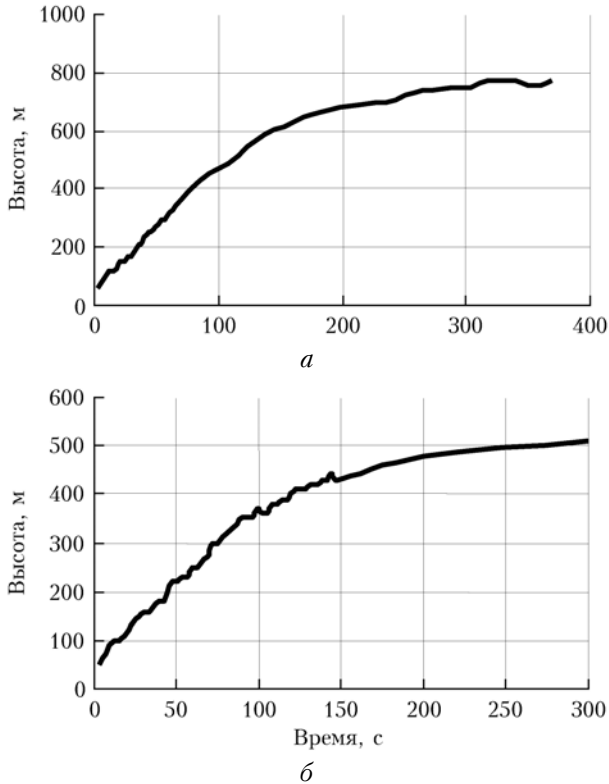


Рис. 6. Высота подъема верхней границы облака ПС в зависимости от времени: а – при сжигании без применения ВЭЗ; б – с применением ВЭЗ

Динамика подъема фронта облака в рассматриваемом опыте приведена на рис. 5, б. По достижении верхней границей высоты ≈ 380 м скорость подъема верхнего фрагмента облака устанавливается на уровне примерно 1 м/с. На 2-й мин от начала сжигания верхний клуб приобретает конусообразную форму. Начиная с высоты приблизительно 330 м, доминирует подъем фронта в средней части облака, формируется конус. Средняя температура и скорость всплытия здесь выше, чем на краях: превышение температуры над периферийной частью $\Delta T \approx 12$ К. В результате облако приобретает форму в виде диска с поднимающимся куполом в центре (см. рис. 5, б).

Нижний клуб поднимается медленнее верхней части облака, подвергается воздействию осаждающихся продуктов конденсации из верхнего фрагмента, быстро теряет температуру и скорость всплытия и вырождается к концу 2-й мин на высоте ≈ 200 м. В этой связи есть основания полагать, что в продолжающемся подъем облака масса ПС составляет около половины исходной массы выброса, а в «сухом» близка к исходной массе выброса.

По результатам видеосъемки подъем облака прекращается к окончанию 4-й мин, когда высота верхней границы достигает 510 м. Продолжается конденсация на частицах ПС паров воды, происходит их интенсивное осаждение. Облако (по результатам видеосъемки) теряет плотность вырождается и на 7-й мин имеющимися средствами наблюдения на фоне атмосферной дымки не регистрируется.

В опыте с применением системы ВЭЗ также наблюдается характерная динамика в сигнатуре облака, обусловленная импульсом движения ПС, полученным при сжигании изделия. Однако уже с момента разделения облака на 52-й с тепловизионная запись в режиме реального времени позволяет наблюдать пульсирующий поток осаждающихся продуктов конденсации с относительно низкой температурой из верхнего клуба в нижний, который буквально тает и в конце 2-й мин практически полностью вырождается. Верхний клуб всплывает до максимальной высоты 510 м, где скорость подъема падает до нуля, преодолевая по инерции за счет запасенного количества движения и температуры нижний слой атмосферной инверсии, начиная с высоты около 300 м. Этим обусловлена и характерная форма облака с выступающим конусом в средней части.

Подъем облака в рассматриваемых опытах с установившейся скоростью на уровне 1 м/с характеризуется синхронными изменениями высоты нижней границы и средней температуры (рис. 7). Облако пульсирует в результате изменения среднеобъемной температуры и объема.

Регистрируемые колебания по мере снижения концентрации ПС уменьшаются по амплитуде. Сопутствующее конденсации выделение «скрытой теплоты» наряду с атмосферными условиями является существенной движущей силой, способствующей повышению уровня турбулизации смеси в поднимаю-

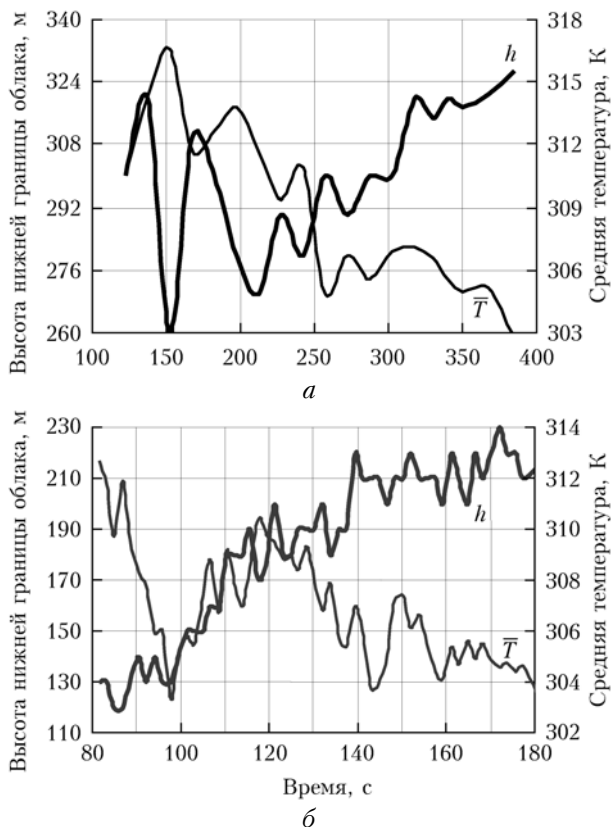


Рис. 7. Изменение средней температуры \bar{T} и высоты нижней границы h в процессе подъема облака ПС: a – при сжигании без применения ВЭЗ; b – с применением ВЭЗ

щемся облаке и в результате быстрому охлаждению, снижению концентрации ПС, скорости и высоты подъема. Повышение концентрации паров воды в ПС при использовании ВЭЗ приводит к интенсификации этого процесса.

По результатам совокупной обработки данных тепловизионной и видеосъемки облако в «сухом» опыте в конце подъема занимает объем $V_1 \approx 0,033 \text{ км}^3$ (см. рис. 5, a), что приблизительно в 4 раза больше, и более однородно по распределению температуры, чем при сжигании с применением системы ВЭЗ (см. рис. 5, b). Здесь облако к окончанию подъема занимает объем $V_2 \approx 0,0084 \text{ км}^3$. Наблюдаемый результат косвенно согласуется с приведенным выше предположением, что при сжигании с применением ВЭЗ в поднимающемся облаке, начиная с момента разделения фрагментов на 52-й с, содержится половина от исходной массы выброса ПС.

Заключение

Проведенные исследования позволяют оценить эффективность применения ВЭЗ в первую очередь по минимальной удельной доле воды, прошедшей парообразование при полном смешении с продуктами сгорания. Установлено, что все остальные характеристики процесса развития облака ПС в атмосфере, начиная от совокупности исходных параметров пус-

кового вертикального течения (см. табл. 1) до максимальной высоты подъема и времени существования, в большей или меньшей степени являются производными от этой величины.

В то же время, поскольку степень увлажнения смеси ПС зависит от расходных характеристик системы ВЭЗ и от схемы коллектора орошения факела, предложенный метод оценки открывает возможность целенаправленного усовершенствования системы ВЭЗ в целом.

Разработанный комплекс натурного для видео- и тепловизионного наблюдения позволяет определять размеры, объем, местоположение и тепловое состояние облака ПС при сжигании ТТЗ ЭУ на открытом стенде в реальном времени, начиная от его формирования в зоне стенда до полного рассеивания в атмосфере.

Полученные экспериментальные результаты, пульсации температуры и объема в частности, показывают, что использование водяной экологической защиты приводит в процессе подъема к более интенсивному снижению концентрации ПС благодаря конденсации и осаджению, вследствие чего снижаются скорость и максимальная высота всплытия. Этот фактор должен соответствующим образом учитываться при оценке концентрации компонентов ПС в атмосфере и определении границ санитарно-защитной зоны стенда.

1. Жарков А.С., Марьяш В.И., Уткин С.М., Ролин Л.Н. Состояние, перспективы и проблемы утилизации ракетных топлив // Сб. трудов Всерос. научно-техн. конф. «Проблемные вопросы методологии утилизации смешанных твердых ракетных топлив, отходов и остатков жидких ракетных топлив в элементах ракетно-космической техники». Бийск: ФГУП «ФНИИЦ «Алтай», 2003. С. 5.
2. Технологические и экологические аспекты ликвидации твердотопливных межконтинентальных баллистических ракет: Монография / Под общ. ред. чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. М.И. Соколовского и д.мед.н. Я.И. Вайсмана. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. 636 с.
3. Архипов В.А., Жарова И.К., Козлов Е.А., Ткаченко А.С. Прикладные аспекты экологии при эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 8. С. 636–641.
4. Хрусталеv Ю.В., Лушев В.П., Потапов М.Г., Павленко А.А., Рейно В.В. Влияние водяной экологической защиты на характеристики продуктов сгорания при сжигании энергетических установок // Вестн. Каз. технол. ун-та. Казань, 2006. № 2. С. 264–267.
5. Рейно В.В., Фирсов К.М., Лушев В.П., Потапов М.Г. Исследование поведения и распределения ИК-излучения облака продуктов сгорания, возникающего при утилизации энергетических систем // XIII Joint. Int. Sympos. «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics». Tomsk, 2006. В-57. Р. 93.
6. Литвинов А.В., Лушев В.П., Рейно В.В. Экологическое сопровождение открытого сжигания энергетических установок методом инфракрасной сигнатуры // Мат-лы Междунар. конф. «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии». Томск: Изд-во Том. ун-та, 2007. С. 110.
7. Мишель А.А., Пташник И.В., Фирсов К.М., Фомин Б.А. Эффективный метод полинейного счета пропускания атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8, № 10. С. 1547–1548.

8. *Потапов М.Г., Попов В.П., Лебедев А.С., Шевырин А.Ю.*
Оценка эффективности оросительной системы экологической защиты при сжигании зарядов РДТТ // Высокотехнологические материалы: демилитаризация, ан-

титерроризм и гражданское применение: Докл. II Международ. конф. «HEMs-2006». 11–14 сентября 2006 г. (г. Белокуриха Алтайского края). М.: ЦНИИХМ, 2006. 304 с.

V.P. Lushev, A.V. Litvinov, N.Yu. Demidov, S.N. Kozlov, V.V. Reyno. Lift dynamics of a cloud of combustion products at fire utilization of charges of solid-fuel power plants at an open test bench. Processes and their identification.

Experimental studies of formation and lift of combustion product clouds at burning of two identical solid-fuel charges of large-sized power plants are conducted at an open test bench for evaluating the effectiveness of the technical environmental activities in ecological protection of environment. Water irrigation of the plume of combustion products by high-pressure ring collector of water ecological protection system for deposition of polluting components of the mixture in the test bench buffer zone was used in one experiment. Results of measurements of the cloud temperature in the lift dynamics using thermal infrared image registration and video recording are presented. The characteristic features of the processes starting from formation to the maximum lifting altitude are determined. The system of parameters determined by *in situ* observations, applicable as input data for mathematical modeling of distribution of combustion products in the atmosphere is suggested.

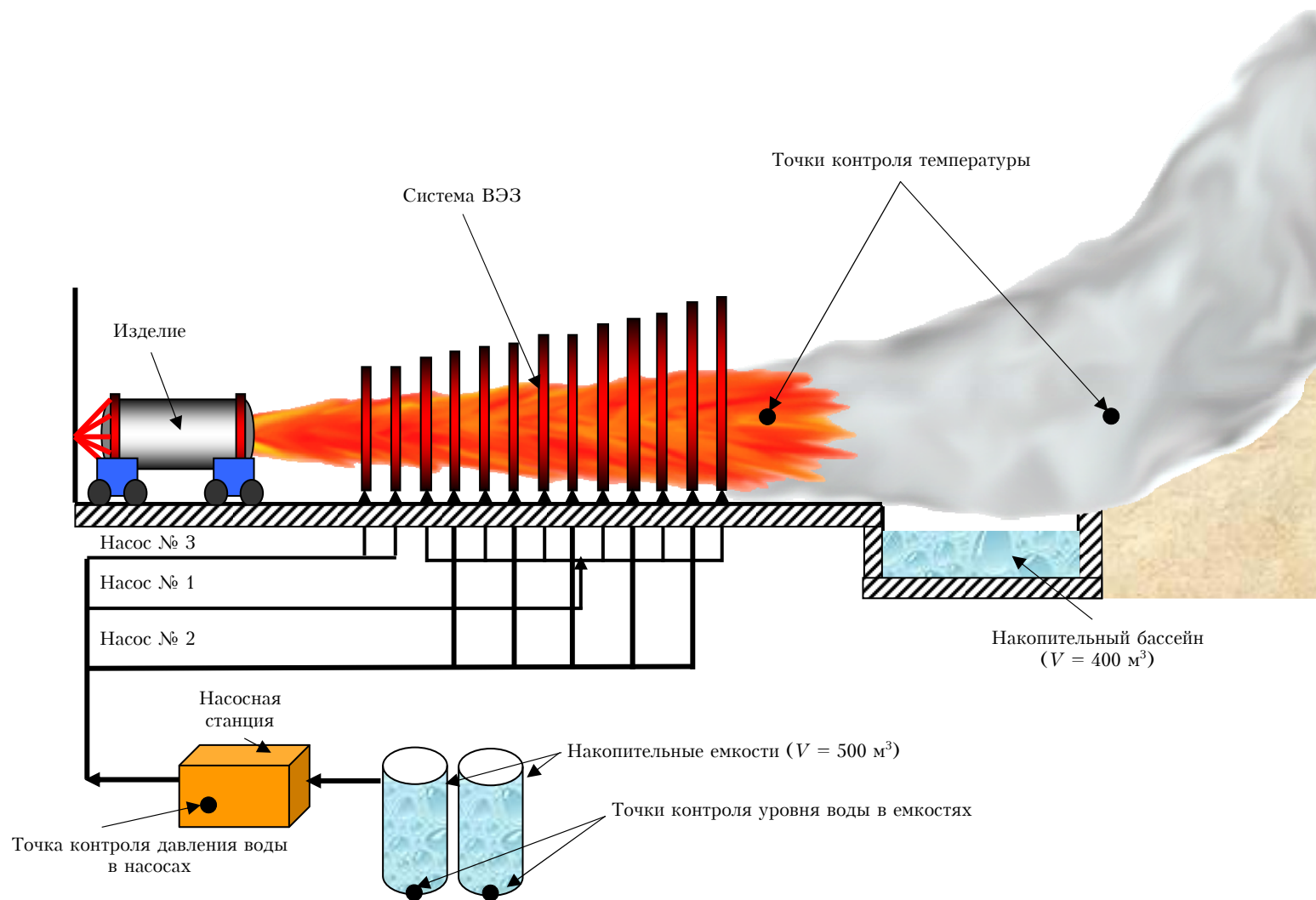


Рис. 1. Схема сжигания твердотопливных зарядов энергетических установок с применением водяной экологической защиты