

Заключение

Таким образом, предложено объяснение концентрационных пределов газовых смесей. Изложим вкратце происходящих при этом физическую картину процессов. Суть ее состоит в следующем: при удалении от стехиометрического состава ($\sigma \rightarrow 0$ или $\sigma \rightarrow \infty$) температура горения снижается, что влечет за собой быстрое падение скорости пламени. В результате количество тепла в прогретом слое увеличивается, главным образом из-за возрастающего его размера, равного примерно κ/u_n . Это влечет за собой рост потерь тепла из зоны пламени.

Потери обусловлены также уменьшением размера очага горения d по мере приближения к концентрационному пределу, т. к. $1/d \sim S/V$, где S – поверхность очага; V – его объем. Небольшое снижение температуры горения приводит к снижению теплового потока из очага горения, но оно не способно полностью скомпенсировать возрастающих потерь за счет падения скорости u_n и размера d . Эта тенденция, в конечном счете, и приводит к наименьшей возможной температуре $T_b^*(\sigma_{\pm})$ и скорости горения $u_n^{\min}(T_b^*) = u_n^{\min}(\sigma_{\pm})$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маршалл В. Основные опасности химических производств: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 672 с.
2. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах: Пер. с англ. – М.: Мир, 1968. – 592 с.
3. Вильямс Ф.А. Теория горения: Пер. с англ. – М.: Наука, 1971. – 615 с.
4. Климов А.М. Ламинарное пламя в турбулентном потоке // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1963. – № 3. – С. 49–58.
5. Зельдович Я.Б. Химическая физика и гидродинамика: Избранные труды. – М.: Наука, 1984. – 347 с.
6. Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Теоретическая физика. Т. VI. Гидродинамика. – М.: Наука, 1986. – 733 с.
7. Нетлетон М. Детонация в газах: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 280 с.

Поступила 7.12.2006 г.

УДК 504.3.054:629

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ НЕСИММЕТРИЧНОГО ДИМЕТИЛГИДРАЗИНА В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

А.Е. Долотов, Г.В. Кузнецов, Т.Н. Немова*

Томский политехнический университет

*Томский государственный архитектурно-строительный университет

E-mail: elf@tpu.ru

Смоделирован процесс испарения капель несимметричного деметилгидразина при их движении к поверхности земли после разгерметизации топливных баков ракет-носителей на высотах до 50 км.

Введение

Проблема загрязнения атмосферы несимметричным диметилгидразином (НДМГ), находящимся в баках жидкостных ракетных двигателей ракет-носителей [1, 2] после отработки первых ступеней, пока остается актуальной. Это во многом обуславливается тем, что до настоящего времени не определен конкретный механизм попадания этого загрязнителя на поверхность Земли. С одной стороны отсутствуют прямые доказательства попадания этого вещества в почву или структуры фитоценозов. С другой стороны в районах отделения первых ступеней ракет-носителей (например, Горный Алтай [3]) есть примеры аномального развития некоторых биологических систем, в то время как другие негативные факторы воздействия на эти системы отсутствуют. Известные результаты моделирования процессов «эволюции»

облака жидкого НДМГ [4, 5] после разгерметизации топливных баков на больших высотах не позволяют сформировать однозначный ответ на вопрос о фазовом состоянии НДМГ в атмосфере.

Целью данной работы является численное моделирование процесса испарения капли НДМГ при ее движении к поверхности Земли с учетом неоднородного температурного поля капли, изменяющихся во времени условий теплообмена с внешней средой и силы сопротивления.

Постановка задачи

При формировании задачи принималось допущение о том, что капля НДМГ при ее движении не деформируется и сохраняет форму сферы в течение всего полета до завершения процесса испарения. Учитывался конвективный теплообмен НДМГ с

внешней средой, параметры которой (температура, давление и плотность) рассматривались переменными по высоте в соответствии с представленными в [6] распределениями. Не учитывался радиационный теплообмен с внешней средой. При расчете скорости движения капли v принималось, что на нее действуют силы тяжести и сопротивления газовой среды. Вычисление коэффициента конвективного теплообмена α НДМГ с воздухом проводилось с учетом зависимости α от плотности ρ и скорости перемещения капли НДМГ v .

Особенностью задачи является перемещение внешней границы капли в результате испарения НДМГ с переменной во времени скоростью w . Величина w зависит от температуры поверхности капли, которая нелинейно изменяется по мере ее движения к поверхности Земли. В такой постановке задача сводится к решению следующей системы дифференциальных уравнений с соответствующими граничными и начальными условиями.

Распределение температуры при начальном условии $t=0, T=T_0$ описывается уравнением теплопроводности для капли в форме сферы:

$$C(T) \cdot \rho(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda(T) \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right),$$

где $C(T), \rho(T), \lambda(T)$ – температурные зависимости НДМГ для теплоемкости, плотности, теплопроводности; r – текущий радиус; T – температура НДМГ на радиусе r ; t – время.

Граничные условия:

$$r = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0;$$

$$r = R, \quad \alpha \cdot (T_B - T) - w_{исп} \cdot \theta_{исп} = \lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial r};$$

где R – внешний радиус капли; α – коэффициент теплоотдачи; T_B – температура воздуха; $w_{исп}, \theta_{исп}$ – скорость и теплота испарения НДМГ.

Скорость испарения вычисляется для текущего значения времени по следующей формуле:

$$w_{исп} = \frac{\alpha \cdot (T_B - T_s)}{\theta_{исп}},$$

где T_s – температура насыщения НДМГ.

Для вычисления коэффициента теплоотдачи с начальными условиями $v=0, t=0$ решалось уравнение движения сферической капли:

$$\frac{dv}{dt} = g - \frac{3 \cdot C_D \cdot \rho_B}{8 \cdot R \cdot \rho} \cdot (v - v_B)^2,$$

где g – ускорение свободного падения; C_D – коэффициент сопротивления; ρ_B, v_B – плотность и скорость воздуха.

При постановке задачи также приняты следующие допущения. Капля имеет сферическую форму и не деформируется в полете. При фиксированном радиусе все точки капли имеют одну и ту же температуру. Теплота испарения НДМГ $\theta_{исп}$ принимается постоянной и равной теплоте испарения при на-

чальных условиях. Скорость воздуха v_B равна нулю. Функции $C(T), \rho(T), \lambda(T)$ получены экстраполяцией табличных значений [7]. Давление и температура воздуха на определенной высоте находятся как функции от высоты, полученные интерполяцией данных стандартных таблиц на широте 45° [6]. Не рассматривались возможные химические взаимодействия НДМГ с воздухом и парами воды.

Результаты и обсуждения

Задача решена для капель диаметром 5 и 1 мм при их начальной температуре 290 К. Изменение характерных размеров капель, как следует из проведенного анализа, не должно существенно отражаться на фазовом состоянии НДМГ. По полученным зависимостям времени испарения капли от начальной высоты видно, насколько быстро испаряются капли диаметром 5 мм (табл. 1) и 1 мм (табл. 2).

Таблица 1. Зависимость времени испарения $t_{и}$ НДМГ от начальной высоты при диаметре капли 5 мм

Высота H , км	Время испарения капли $t_{и}$, мс
50,00	10
43,90	20
41,45	29
40,95	40
40,75	50
40,70	70
40,00...0,00	-

Таблица 2. Зависимость времени испарения $t_{и}$ НДМГ от начальной высоты при диаметре капли 1 мм

Высота H , км	Время испарения капли $t_{и}$, мс
50,00	0,1
41,60	0,2
40,90	0,3
40,75	0,4
40,70	0,5
40,00... 0,00	-

Таблица 3. Зависимость разности температур между поверхностью капли и газовой средой от высоты, К

Высота H , км	Диаметрам капли d , мм	
	5	1
39,980	17,9	4,7
39,957	13,9	1,6
39,926	11,1	0,4
39,646	4,7	0,4
30,081...0,106	1,4	0,4

Установлено, что если разгерметизация происходит на высотах от 50,0 до 40,7 км, то наблюдается полное испарение НДМГ для капель всех размеров. С высоты менее 40,7 км капли НДМГ движутся, не испаряясь, до самой поверхности Земли. Установленные закономерности обусловлены термодинамикой фазовых превращений НДМГ [7] и изменением температуры и давления воздуха с изменением расстояния до поверхности Земли [6]. Численный анализ показал, что разность темпера-

тур между поверхностью капли и газовой средой при $d=5$ мм всегда будет больше аналогичной разности температур при $d=1$ мм (табл. 3), хотя скорость движения капли большего диаметра превышает скорость капли меньшего диаметра (рис. 1).

Полученные результаты можно объяснить, если проанализировать зависимости коэффициентов теплоотдачи каплей разных диаметров от скорости движения (рис. 2). Установлено, что коэффициент теплоотдачи для капли при $d=5$ мм будет меньше, чем при $d=1$ мм. В диапазоне изменения высоты $0 < H < 40$ км, учитывая изменения скорости каплей разного диаметра с высотой (рис. 1), были рассчитаны зависимости α от скорости движения (рис. 2).

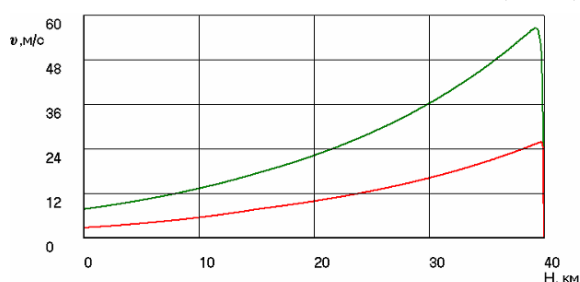


Рис. 1. Зависимость скорости движения капли НДМГ от высоты при диаметре капли, мм: 1) 5; 2) 1

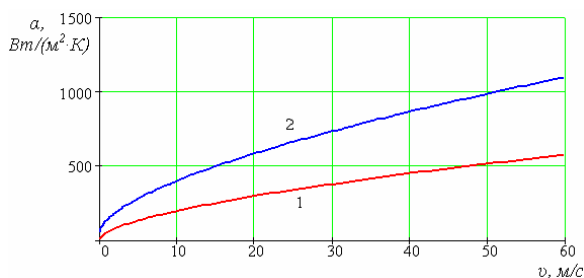


Рис. 2. Зависимости коэффициентов теплоотдачи каплей разных диаметров от скорости движения при диаметре капли, мм: 1) 5; 2) 1

Зависимости перепада температуры и скорости движения капли НДМГ от высоты (табл. 3 и рис. 1) подтверждают необходимость учета неоднородности распределения температуры по радиусу на начальном участке движения. Чем больше размер капли, тем больше требуется времени, чтобы она полностью прогрелась или остыла.

Следует также отметить, что капли НДМГ могут не достигать поверхности Земли не только из-за их испарения, но и вследствие сопротивления воздуха. Так, чем меньше диаметр капли, тем дольше она может двигаться до поверхности Земли (рис. 3).

Установленная зависимость (рис. 3) показывает, что НДМГ может распространяться на достаточно

большие расстояния, оставаясь в жидком состоянии. Так, например, капля начальным диаметром 1 мм при достаточно умеренной скорости ветра на больших высотах 10 м/с может переместиться на расстояние до 50 км от места разгерметизации топливного бака. Капли меньших диаметров будут еще дольше находиться в воздухе и, соответственно, переноситься массами воздуха на еще большие расстояния.

Полученные в данной работе теоретические результаты показывают, что механизм превращений НДМГ при его движении к поверхности Земли достаточно сложен. Фазовые состояния этого вещества зависят от многих факторов, и целесообразным является дальнейший анализ наиболее вероятных сценариев физико-химических превращений каплей жидкого НДМГ при их движении в воздухе. Учет всех особенностей прогрева и испарения каплей НДМГ может существенно повысить точность прогноза загрязнения атмосферы в районе отделения первых ступеней ракет-носителей.

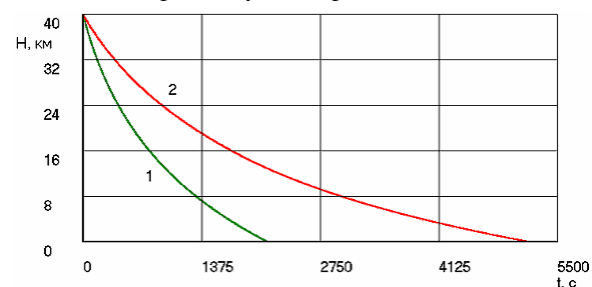


Рис. 3. Зависимость высоты нахождения каплей над поверхностью Земли от времени при диаметре капли, мм: 1) 5; 2) 1

Выводы

Показано, что несимметричный диметилгидразин будет полностью испаряться при разгерметизации топливных баков ракет-носителей на высотах от 50,0 до 40,7 км при его начальной температуре 290 К. Начиная с высоты порядка 40 км НДМГ перестает испаряться и далее движется к поверхности Земли в жидкофазном состоянии. Фазовое состояние НДМГ зависит в большей степени от высоты разгерметизации и начальной температуры. Скорость испарения капли зависит от ее диаметра. Согласно результатам расчета время испарения для капли диаметром 5 мм на два порядка больше, чем для капли, диаметром 1 мм. Время достижения земной поверхности каплей диаметром 1 мм более чем в два раза превышает соответствующее время для каплей диаметром 5 мм.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (код проекта № 06-08-00873-а)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую среду: Справочное пособие / Под ред. В.В. Алдушина, С.И. Козлова, А.В. Петрова. – М.: АНКИЛ, 2000. – 600 с.
2. Архипов В.А., Березиков А.П., Козлов Е.А. и др. Моделирование техногенных загрязнений при отделении ступеней ракет-носителей // Известия вузов. Физика. – 2005. – № 11. – С. 5–9.
3. Стрельцова Т.А., Ушакова Г.В., Черданцева О.И. и др. Моделирование воздействия НДМГ на культурные растения // Фундаментальные проблемы охраны окружающей среды и экология природно-территориальных комплексов западной Сибири: Материалы научной конференции. – Горно-Алтайск, 2000. – С. 123–125.
4. Архипов В.А., Березиков А.П., Козлов Е.А. и др. Моделирование процессов образования и эволюции жидко-капельного облака при разгерметизации в атмосфере топливных баков ракет // Фундаментальные проблемы охраны окружающей среды и экология природно-территориальных комплексов западной Сибири: Материалы научной конференции. – Горно-Алтайск – 2000. – С. 78–79.
5. Немова Т.Н., Кузнецов Г.В., Мамонтов Т.Я., Бульба Е.Е. Численное моделирование состояния капель диметилгидразина при движении из верхних слоев атмосферы к поверхности Земли // Известия вузов. Физика. – 2006. – № 6. – С. 112–115.
6. ГОСТ 24631-81 Государственный стандарт союза ССР. Атмосферы справочные. Параметры. Государственный комитет СССР по стандартам. Москва.
7. Большаков Г.Ф. Химия и технология компонентов жидкого топлива. – Л.: Химия, 1983. – 320 с., ил.

Поступила 15.10.2007 г.

УДК 621.181.001.4:621.18

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ МЕТАЛЛА НА КОРРОЗИЮ ТРУБ ПАРОВЫХ КОТЛОВ

А.С. Заворин, Л.Л. Любимова, А.А. Макеев, А.А. Ташлыков, А.И. Артамонцев, Б.В. Лебедев

Томский политехнический университет
E-mail: ghost@tpu.ru

На основе рентгенофазового анализа образцов из трубной стали 20 проведена оценка степени структурной неоднородности металла. Изучено её влияние на межзеренную и внутризеренную ползучесть и связанные с ними процессы общей и язвенно-питтинговой коррозии труб паровых котлов.

1. Введение

Процессы коррозии в пароводяных трактах ТЭС и АЭС являются причиной периодически дискутируемых и поднимаемых до отраслевого уровня проблем надежности парогенераторов и теплообменных труб [1, 2]. Создаваемые программы повышения надежности теплоэнергетического оборудования предусматривают мероприятия, направленные на совершенствование водно-химических режимов (ВХР), выбор коррозионно-стойких сталей и сплавов и контроль металла, а также реконструктивные работы [3, 4]. Для оценки ВХР на тепловых и атомных электростанциях разрабатываются и используются системы химико-технологического мониторинга, позволяющие оценивать и прогнозировать поведение примесей в пароводяном тракте, т. к. известно, что среди причин, вызывающих повреждаемость коррозией поверхностей нагрева, отмечаются в качестве имеющих первостепенное значение факторы водно-химического режима как внешние факторы воздействия.

В качестве количественного показателя скорости коррозии применяют коррозионные потери металла за длительный период в заданной среде. Однако, несмотря на то, что влияние каждой стандартной среды (пароводяная, щелочная, водородная, кисло-

родная, кислотнo-фосфатная и др.) в отдельности изучается, сведения о скоростях коррозии даже в стандартных средах весьма ограничены, не говоря уже о практическом многообразии сред, в которых эксплуатируется теплоэнергетическое оборудование. Но и с другой стороны, при всем многообразии коррозионно-агрессивных сред признаки и характер коррозионных повреждений для них достаточно однообразны – это локальные язвенно-питтинговые повреждения на фоне общей коррозии.

При анализе механизмов коррозионной повреждаемости поверхностей нагрева в меньшей степени представлены оценки влияния внутренних факторов. К ним относят наличие фаз и зерен, межфазных и межзеренных границ, неоднородность структуры и материальную неоднородность, неравноосность и разнозернистость, аномальные расширения кристаллических решеток и др [5]. Среди этих вопросов выделяется еще менее изученная область – влияние внутренних остаточных структурных напряжений и их перераспределения в процессе работы труб в условиях температур и давлений на развитие язвенно-питтинговой коррозии. Исключение из анализа механизма коррозии этого фактора лишает сложную коррозионную проблему того комплексного подхода, который