Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 12. С. 577–585 Thermal processes in engineering, 2024, vol. 16, no. 12, pp. 577–585

Научная статья УДК 544.032 URL: https://tptmai.ru/publications.php?ID=184348 EDN: https://www.elibrary.ru/BRSSSD

Численное моделирование процесса тушения пожара жидким фреоном в отсеке ЛА

Л.В. Гуров⊠

AO «Туполев», Москва, Российская Федерация leonidgourov@yandex.ru[⊠]

Аннотация. В работе проводится расчетное исследование физико-химических процессов, протекающих при пожаре, когда для борьбы с пламенем используется фреон 114В2. В качестве исследуемого объекта рассмотрен прототип двигательного отсека ЛА, который оборудован системой пожаротушения. Полагалось, что пожар в отсеке произошел вследствие утечки керосина. Для проведения численного моделирования был рассмотрен сценарий, согласно которому, в начальный момент времени в небольшой области отсека происходит зажигание смеси воздуха и паров керосина. Пламя, распространяясь по отсеку, настигает установленные в нем тепловые датчики, после чего подается условный сигнал на подачу фреона. Используемая в расчетах методика базировалась на решении системы уравнений Навье–Стокса, уравнений химической кинетики и уравнений движения лагранжевых частиц.

Ключевые слова: уравнения Навье–Стокса, химическая кинетика, многофазное течение, испарение капель, система пожаротушения

Для цитирования. Гуров Л.В. Численное моделирование процесса тушения пожара жидким фреоном в отсеке ЛА // Тепловые процессы в технике. 2024. Т. 16. № 12. С. 577–585. URL: https:// tptmai.ru/publications.php?ID=184348

Original article

Numerical simulation of fire suppression in aircraft compartment by refrigerant

L.V. Gurov[⊠]

JSC Tupolev, Moscow, Russian Federation leonidgourov@yandex.ru[⊠]

Abstract. This paper analyses the numerical results obtained in the transient CFD study of fire phenomena in the aircraft compartment that has a fire extinguisher system installed. To perform the study, a simplified 3D CAD model of the full-scale compartment with dedicated sprinklers to supply refrigerant (Freon 114B2) was considered. When setting the initial conditions for the calculation it was as-

[©] Гуров Л.В., 2024

sumed that some kind of fuel leakage occurred in the compartment so that its space is filled with a mixture of air and kerosene. To see how the final result is affected by the heat release rate of fire, this mixture was specified as stoichiometric for one simulation and as fuel-lean for the other one.

A small igniter located in the lower part of the compartment is used to initiate the chemical processes. The refrigerant is supplied once the reaction zone becomes large enough so that temperature exceeds the critical value in certain regions, where thermal sensors are supposed to be installed.

The ignition and combustion processes were simulated using a simplified kinetic model that includes 77 chemical reactions for 30 components, where kerosene is represented in the form of $C_{12}H_{23}$ molecule. This model was supplemented with the Freon 114B2 molecule of $C_2Br_2F_4$ (gaseous phase) that was accounted for in the chemical reactions where third body was present.

Further assumption was made regarding the refrigerant streams supplied – it was suggested that as the stream exits the sprinkler it does break up immediately into droplets that are treated in the computation as Lagrangian particles coupled with Ranz–Marshall evaporation model. Thus, the energy released in the chemical reactions gets absorbed with the evaporated particles as they fall into the fire area. When calculating the vapor pressure at the given temperature for the refrigerant considered, Antoine equation is used, while the latent heat of vaporization is determined using Clausius-Clapeyron equation.

The results obtained in the calculations indicate that for the given model of aircraft compartment with two sprinklers installed and refrigerant supplied at 8 kg/s rate fire suppression lasts about 0,7 sec. Yet, the refrigerant streams supplied from the sprinkler are also notable for enhancing the mixing of burnt/unburnt regions – this has a significant impact on the production rate of the combustion products during the first 0,1 sec.

Keywords: Navier–Stokes equations, chemical kinetics, multiphase flow, droplet evaporation, fire extinguisher system

For citation. Gurov L.V. Numerical simulation of fire suppression in aircraft compartment by refrigerant. *Thermal processes in engineering*. 2024, vol. 16, no. 12, pp. 577–585. (In Russ.). URL: https://tpt mai.ru/publications.php?ID=184348

Введение

Важной задачей при проектировании летательного аппарата (ЛА), отдельные отсеки которого относятся к категории пожароопасных, является создание эффективной системы пожаротушения. Такая система, помимо своевременного срабатывания, должна гарантировать подачу огнегасящего вещества (фреона 114В2 [1] или 13В1 [2]) непосредственно в очаг возгорания. Если первое обеспечивается посредством размещения датчиков, которые при превышении допустимого значения температуры отправляют сигнал на систему подачи огнегасящего вещества, то второе достигается за счет использования коллекторов раздачи специальной конфигурации, которая бы учитывала особенности геометрии отсека и компоновки оборудования в нем.

Наиболее типичным примером пожароопасной зоны является двигательный отсек. Одна из причин возникновения пожара здесь связана с возможными утечками топлива, которое, испаряясь, образует с воздухом легковоспламеняющуюся смесь. Если при этом реализуются условия, когда происходит зажигание смеси, то определенное влияние на дальнейшую динамику развития и тушения пожара будут оказывать такие параметры как коэффициент избытка топлива и степень однородности смеси, а также интенсивность конвективного переноса в отсеке. В данной работе, используя средства численного моделирования, мы проанализируем, как протекают во времени указанные процессы для нескольких частных случаев, базирующихся на предположении, что смесь воздуха и паров керосина на момент воспламенения является однородной.

В качестве исследуемого объекта рассмотрен полномасштабный прототип двигательного отсека ЛА, оборудованный коллекторами раздачи огнегасящего вещества. Используемый метод исследования предполагает проведение моделирования газодинамических и физико-химических

воздуха и паров керосина является либо стехиометрической ($\phi = 1$), либо бедной ($\phi = 0.75$).

процессов, включая фазовые превращения. По результатам проведенных расчетов планируется определить следующий набор параметров:

1) Количество огнегасящего вещества, затрачиваемого на тушение пожара;

2) Состав продуктов сгорания;

3) Относительная доля топлива, вступившего в химическую реакцию с кислородом на момент подачи огнегасящего вещества, а также на момент завершения тушения пожара.

Следует отметить, что растущий за последние годы интерес к использованию численного моделирования при исследовании процессов, связанных с пожаром как явлением, способствовал не только развитию разного рода методик расчета, но и также созданию специализированных программных комплексов. Так, в [3] были представлены результаты моделирования тушения факела, полученные с использованием продукта Vulcan-CFD. Механизм тушения здесь заключался в подаче газообразного фреона в зону рециркуляции (вблизи держателя пламени), в результате чего скорость химических реакций в ней начинала снижаться, и пламя гасло. В свою очередь, об использовании жидкого огнегасящего вещества (воды) при моделировании тушения пожара сообщалось в [4], где рассматривался случай возгорания на стеллаже. Результаты расчетов, полученные в указанной работе с использованием продукта FireFOAM, показали хорошее совпадение с экспериментом. К слову, рассмотренный авторами подход к моделированию движения жидкой фазы огнегасящего вещества был использован и в настоящей работе.

Постановка задачи

Геометрическая модель отсека, в котором размещается двигательная установка и коллектора раздачи огнегасящего вещества, представлена на рис. 1. Считается, что все пространство отсека (объемом 2 м³) заполнено однородной топливовоздушной смесью с температурой 100 °С и давлением 1 атм, при этом на верхней границе отсека располагается вентиляционная решетка, отверстия которой также находятся под постоянным давлением 1 атм. Топливо представляет собой суррогат авиационного керосина в виде молекулы C₁₂H₂₃ [5, 6], а воздух состоит из молекул O₂ и N₂ в мольном соотношении 21:79. Были рассмотрены случаи, когда данная смесь

Рис. 1. Общий вид отсека ЛА с двигательной установкой, коллекторами раздачи огнегасящего вещества, пятью датчиками пожара и условным источником воспламенения (обозначен красным цветом)

Физическая постановка задачи подразумевала рассмотрение временного интервала, где в начальный момент в небольшой области (на рис. 1 помечена красным цветом) происходит зажигание смеси. Далее идет процесс распространения пламени по объему. Параллельно, в отдельных точках, где предполагается размещение датчиков пожара (на рис. 1 отмечены буквами Д), отслеживаются мгновенные значения температуры. Полагалось, что если в трех таких точках в некоторый момент времени реализуется температура выше 300 °С, то поступает условный «сигнал» на подачу огнегасящего вещества. В качестве такового здесь был рассмотрен жидкий фреон 114В2 (химическая формула – C₂Br₂F₄), который хранится на борту в баллонах высокого давления [7]. Здесь было важно учесть, что огнегасящее вещество поступает в отсек не сразу после «сигнала», а с небольшой задержкой, поскольку некоторое время, по факту, затрачивается на прохождение тракта, соединяющего баллоны с коллекторами раздачи. Поскольку длина данного тракта считалась известной, указанное время задержки было здесь заранее определено и составило 0,45 с.

Из-за высокой динамики физико-химических процессов, обусловленных подачей фреона в пространство отсека, возникают некоторые сложности численного моделирования, поскольку в дан-



ном случае мы имеем дело с большим количеством струй, которые, распадаясь на еще более мелкие по масштабу структуры, полностью или частично испаряются. Различные подходы к численному моделированию истекающей жидкой струи, отличающиеся между собой по степени детализации, были проанализированы в работе [8]. Так, наиболее строгий подход предполагает использование метода VOF (Volume of Fluid), где, по определению, требуется высокий уровень дискретизации каждой струи. Очевидный недостаток такой постановки в контексте рассматриваемой задачи – исключительно высокие вычислительные затраты. В то же время, известен менее ресурсоемкий подход, базирующийся на гипотезе о мгновенном распаде каждой струи на сферические капли, что позволяет на уровне решаемых уравнений выделить в задаче два типа сред – сплошную (газовую) и дисперсную (капельную). В первом случае для описания движения, массо- и теплообмена используется подход Эйлера, а во втором – Лагранжа. Такой подход, безусловно, идеализирует процесс истечения струй, не позволяя получить детальную картину распыла, однако тестовые расчеты, проведенные для одиночной струи с использованием метода VOF, показали, что струя практически полностью распадается на капли на расстоянии, равном примерно 40 диаметров выходного отверстия. В нашем случае это соответствует 40 мм, что пренебрежимо мало в масштабе рассматриваемой задачи.

Что касается выбора начального диаметра капель, то в наиболее грубом приближении его можно приравнять к диаметру выходного отверстия [8]. В этом случае суммарная площадь контакта внешней поверхности капель с окружающим газом окажется минимальной, из-за чего интенсивность их испарения будет замедлена. Также минимальным при этом будет отклонение вектора их скорости, что, очевидно, не совсем адекватно отражает реальность. Наоборот, если задавать здесь слишком малый диаметр капель, то их движение будет более беспорядочным, что, в свою очередь, может негативно отразиться на устойчивости всего расчета. В качестве компромисса, принятое в настоящей работе значение начального диаметра капель составило ~1/16 диаметра выходного отверстия (0,06 мм). Начальная температура капель задавалась равной 20 °С, при этом суммарный расход капель (8 кг/с) был равномерно распределен по всем отверстиям коллектора, общее число которых составляло 168.

Моделируемый механизм тушения пожара в данном случае заключался в поглощении испаряющимися каплями энергии, выделившейся в результате химических реакций между кислородом и керосином. При условии своевременного попадания капель в очаг горения это позволит затормозить распространение пламени по объему отсека, в результате чего часть керосина останется непрореагировавшей. Ингибирование фреоном химических реакций здесь не учитывалось из-за крайне ограниченных данных по кинетике соответствующих процессов.

По мере протекания горения и последующего тушения пожара в отсеке отслеживалась скорость наработки основных продуктов сгорания – молекул СО₂, СО и H₂O. Пожар считался потушенным, когда скорость наработки данных молекул становилась нулевой, а температура на всех датчиках (рис. 1) становилась ниже 300 °C.

Весь цикл расчетов выполнен на 60-ядерном процессоре с тактовой частотой каждого ядра 3,2 ГГц. Решалась система уравнений, включающая в себя уравнения Навье-Стокса для химически реагирующей газовой смеси, а также уравнения движения лагранжевых частиц для жидкой фазы фреона (более подробное описание решаемых уравнений приведено в следующем разделе). Объем расчетной сетки составлял 1,6 млн ячеек, шаг по времени – 2×10^{-4} с. Горение пары «керосин + кислород» описывалось с помощью редуцированной кинетической модели, включающей в себя 77 химических реакций для 30 сортов компонент. Данная модель, несмотря на относительно небольшое число реакций, показала в [9] хорошее совпадение с экспериментальными данными по таким ключевым параметрам как время задержки воспламенения и скорость распространения ламинарного пламени при различных значениях Φ .

Основные уравнения

Как было ранее сказано, постановка задачи предполагала рассмотрение двух видов сред – капельной (дисперсной) и газовой (сплошной). Баланс массы, импульса и энергии для каждой

из них описывается отдельными уравнениями. Так, для капельной среды данные уравнения имеют следующий вид:

$$\frac{du_{p_i}}{dt} = g_i + f_{p_i},\tag{1}$$

$$\frac{dm_p}{dt} = \dot{m}_p,\tag{2}$$

$$\frac{dT_p}{dt} = q_p^{conv} + q_p^{ev},\tag{3}$$

$$\frac{dx_{p_i}}{dt} = u_{p_i}.$$
(4)

В векторном уравнении (1), описывающем изменение скорости одной капли в направлении каждой из 3-х координатных осей (i = 1,2,3), g_i – ускорение свободного падения; f_{p_i} – действующая на каплю сила сопротивления, которая определяется следующим образом:

$$f_{p_i} = \frac{3}{4} \frac{\mu C_D R e_p}{\rho_p d_p^2} \left(u_i - u_{p_i} \right), \qquad (4.1)$$

где $\rho_{\rm p}, d_p$ – плотность и диаметр капли; μ, u_i – вязкость и скорость газовой среды; $Re_p = \frac{\rho d_p}{u} |\vec{u} - \vec{u_p}|$ (число Рейнольдса для капли).

Для вычисления коэффициента сопротивления *C*_D в (4.1) использовалась эмпирическая зависимость Шиллера:

$$C_D = \frac{24}{Re_p} \left(1 + 0.15 Re_p^{0.687} \right). \tag{4.2}$$

При записи уравнения (2), описывающего изменение массы капли, полагаем, что единственным механизмом здесь является диффузия испарившегося фреона (далее по разделу – «пара») от поверхности капли в газовую среду. Скорость данного процесса, согласно [10], определяется следующим образом:

$$\dot{m}_p = -\pi d_p \rho D_v \ln(1+B) Sh_p,$$
 (4.3)

где Sh_p – число Шервуда для капли; D_v – коэффициент диффузии пара; $B = \frac{p_s W_v - Y_v p W}{p W - p_s W_v}$ (число Сполдинга); p_s – давление насыщенного пара; Y_v – массовая доля пара в газовой среде; W_v , W – молярная масса пара и газовой среды; ρ , p – плотность и давление газовой среды. Для вычисления давления насыщенного пара p_s при заданной температуре использовалось уравнение Антуана вида: $log_{10}p_s = A - B/(T+C)$, где A = 6,10296, B = 1176,556 и C = -33,003 [11].

Число Шервуда в (4.3) определялось через эмпирическую зависимость Ранца–Маршалла [12]:

$$Sh_p = 2(1+0,3Re_p^{1/2}Sc^{1/3}),$$
 (4.4)

где Sc – число Шмидта для газовой среды.

Изменение температуры капли, согласно уравнению (3), происходит за счет ее конвективного теплообмена с окружающим газом (4.5), а также за счет ее испарения (4.6):

$$q_p^{conv} = \frac{6\alpha}{\rho_p C_p d_p} \left(T - T_p \right), \tag{4.5}$$

$$q_p^{ev} = \dot{m}_p \frac{L}{m_p C_p},\tag{4.6}$$

где $\alpha = \frac{Nu_p\lambda}{d_p}$ (коэффициент теплоотдачи); $Nu_p = 2(1+0,3Re_p^{1/2}Pr^{1/3})$ (число Нуссельта для капли, определенное через эмпирическую зависимость Ранца–Маршалла [12]); Pr – число Прандтля для газовой среды; C_p – теплоемкость капли.

Теплота испарения *L* в (4.6) определялась методом Клапейрона-Клаузиуса:

$$L = \frac{RT^2}{p_s} \frac{dp_s}{dT}.$$
 (4.7)

Наконец, уравнение (4) описывает изменение координаты капли. Здесь было принято допущение, что капля исключалась из расчета, если она долетала до стенки. Иными словами, процесс накапливания капель на стенке с последующим образованием жидкой пленки в задаче не моделировался.

Далее приведем аналогичные балансовые уравнения для газовой среды (5–9). Для лучшего восприятия, данные уравнения здесь записаны без учета членов, отражающих вклад турбулентности.

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) + \frac{\partial p}{\partial x_i} =
= \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{i,j}) + \rho g_i + F_P^i,$$
(5)

$$\frac{\partial \rho Y_m}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i Y_m}{\partial x_i} =$$

$$\frac{\partial \rho (u_i - \partial Y_m)}{\partial x_i} =$$
(6)

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{mn} \frac{\partial A_m}{\partial x_i} \right) + R_m + P_m,$$

$$\partial \rho H \qquad \partial$$

$$= \frac{\partial}{\partial t_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i H) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[u_j(\tau_{i,j}) + \lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] + \frac{\partial p}{\partial t} + \rho u_i g_i + Q_p,$$
(7)

$$p = \rho RT/W, \tag{8}$$

$$H = \sum_{m=1}^{N_m} h_m Y_m + \frac{u^2}{2},$$
 (9)

где *h_m* и *Y_m* – соответственно, энтальпия и массовая доля компоненты *m*.

В векторных уравнениях (5), описывающих баланс импульса, член F_P^i в правой части отражает обмен импульсом между газом и всеми каплями, находящимися в заданной сеточной ячейке объемом ΔV :

$$F_{P}^{i} = -\frac{1}{\Delta V} \sum_{l=1}^{Np_{\Delta V}} m_{p}^{l} \frac{du_{p_{i}}}{dt}.$$
 (9.1)

В правой части уравнения (6), описывающего баланс массы компоненты m в газовой смеси, член R_m отражает изменение ее массы за счет химических реакций. Если компонента является инертной, то данный член равен нулю. В остальных случаях, когда компонента m задействована в N_r реакциях с N компонентами, данный член имеет следующий вид:

$$R_{m} = W_{m} \times \sum_{r=1}^{Nr} \Gamma_{r} (v_{m,r}^{"} - v_{m,r}^{'}) k_{r} \prod_{k=1}^{N} [C_{k,r}]^{\eta_{k,r}^{'}} + \eta_{k,r}^{"}, \qquad (9.2)$$

где $v_{m,r}^{''}$ и $v_{m,r}^{'}$ – стехиометрические коэффициенты, соответственно, для продукта *m* и реагента *m* в реакции *r*; $\eta_{k,r}^{''}$ и $\eta_{k,r}^{'}$ – частный порядок реакции *r* по продукту *k* и по реагенту *k*, соответственно; Γ_r – множитель, отражающий вклад катализаторов в скорость химической реакции *r*; k_r – константа скорости химической реакции *r*; *C* – молярная концентрация.

Также в (6) присутствует член P_m , отражающий изменение массы компоненты *m* за счет испарения капель. Для рассматриваемой задачи данный член принимает ненулевое значение только для молекулы фреона C₂Br₂F₄ и выглядит следующим образом:

$$P_m = -\frac{1}{\Delta V} \sum_{l=1}^{Np_{\Delta V}} \frac{dm_p^l}{dt}.$$
(9.3)

Наконец, в правой части уравнении баланса энергии (7) присутствует член Q_p , отражающий изменение энергии газовой смеси за счет испарения капель и конвективного теплообмена с ними:

$$Q_{p} = -\frac{1}{\Delta V} \sum_{l=1}^{Np_{\Delta V}} C_{p}^{l} m_{p}^{l} \frac{dT_{p}^{l}}{dt}.$$
(9.4)

Очевидно, что для решаемой задачи данный член является определяющим, поскольку позволяет напрямую учесть снижение температуры газовой среды, обусловленное поглощением энергии испаряющихся капель. В условиях, когда кислород и пары керосина в объеме прореагировали не полностью, нетрудно понять, что данный эффект будет способствовать снижению скорости химических реакций.

Анализ результатов

На рис. 2 показано, как в точках установки датчиков пожара меняются по времени значения температуры, начиная с момента зажигания. Видно, что для случая стехиометрической смеси $(\Phi = 1)$ пламя настигает датчики быстрее, чем для случая бедной ($\Phi = 0.75$), что вполне закономерно. В обоих случаях позднее всего рост температуры отмечен на датчике Д10 (см. рис. 1), который примыкает не к верхней границе отсека, как остальные, а к одной из боковых стенок. Интересна динамика изменения температуры в процессе тушения пожара в точке установки указанного датчика для случая $\Phi = 0.75$ – здесь отчетливо прослеживается повторный рост температуры в момент $\tau = 1,5$ с, т.е. спустя почти 1/2 секунды с момента начала подачи фреона в отсек. Это дает основание считать, что проникновение фреона в данную зону для борьбы с пожаром немного затруднено. Одно из возможных решений подобной проблемы – скорректировать направление струй, изменив в конструкции коллектора положение нескольких выходных отверстий.



Рис. 2. Динамика изменения температуры в точках установки датчиков пожара при горении и тушении: a – стехиометрической смеси ($\Phi = 1$) и δ – бедной смеси ($\Phi = 0,75$)

На рис. З показано, на какие зоны отсека успел распространиться пожар к моменту начала подачи фреона из отверстий коллекторов. Для визуализации данных зон были построены изо-поверхности по температуре t > 1000 °C, из которых следует, что пожаром охвачено около 25 % объема отсека. В обоих рассмотренных случаях зона горения под действием гравитационных сил устремляется к верхней границе отсека, настигая расположенные здесь датчики пожара.



Рис. 3. Визуализация зоны горения в отсеке на момент начала подачи фреона для случаев: $\Phi = 1$ (*a*) и $\Phi = 0.75$ (δ)

Как известно, истечение струи способствует интенсификации процессов смешения. В контексте рассматриваемой задачи этот эффект проявился практически сразу после подачи фреона из отверстий. Так, на начальном этапе было отмечено, что некоторое, но непродолжительное время пламя продолжает распространяться по объему отсека, что хорошо видно на рис. 4. Представленные здесь изоповерхности (для случая $\Phi = 1$), построенные спустя ~1/10 секунды после начала подачи фреона, показывают, что пламенем охвачено уже 35 % объема отсека. Добавленные на данном рисунке траектории движения капель фреона, раскрашенные по значению их диаметра, показывают, насколько отличается интенсивность их испарения в зоне горения и за ее пределами. Видно, что при попадании капель в зону горения, где давление насыщенного пара фреона, по определению, более высокое, капли практически полностью успевают испариться, поглотив при этом выделившуюся в химических реакциях энергию. Наоборот, вблизи нижней границы отсека, где температуры (и, соответственно, давление насыщенного пара) более низкие, капли практически не меняются в диаметре и, следовательно, в тушении пожара практически не задействуются. Отметим, что на рис. 4 также можно наблюдать зоны, которые, с одной стороны, охвачены пламенем, но проникновение капель фреона в них затруднено, из-за чего борьба с пожаром может потребовать больше времени.



Рис. 4. Визуализация зоны возгорания ($\Phi = 1$) в процессе тушения пожара + траектории капель фреона ($\tau = 1,06$ с)

На графиках, представленных на рис. 5, показана зависимость скорости наработки продуктов сгорания от времени, начиная с момента зажигания смеси и заканчивая моментом завершения тушения пожара. Для более объективной оценки влияния потоков фреона в общую динамику процессов сюда также добавлены результаты, полученные из предположения, что система пожаротушения не сработала.

Видно, что к моменту начала тушения ($\tau \approx 1$ с) скорость наработки молекул CO₂ и H₂O уже вышла на плато, при этом за последующий интервал времени, равный ~0,2 с, происходит ее лавинообразный рост, что особо хорошо видно для случая $\Phi = 1$. Данный эффект подчеркивает то обстоятельство, что на начальном этапе тушения механическое воздействие потоков фреона на смесь сильнее, чем термодинамическое. Так, большое число струй (т.е. капель) в сочетании с высокой скоростью их истечения (около 40 м/с) способствуют интенсивному развитию слоев смешения, что вполне закономерно приводит к увеличению количества вовлеченных в химический процесс компонент.



Рис. 5. Зависимость скорости наработки основных продуктов сгорания (молекул $CO_2(a)$, $H_2O(\delta)$, CO(e)) от времени

Испарение капель фреона, попадающих в зоны пожара, приводит к снижению температуры продуктов сгорания - в случае их перемешивания с еще непрореагировавшими компонентами это, как было ранее отмечено, позволяет снизить скорость отдельных химических реакций, что, в результате, корректирует весь химический процесс. Так, на завершающей стадии тушения пожара, мы видим, что наработка молекул СО2 прекращается – вместо них идет образование молекул СО, что вполне характерно в условиях пониженных температур. Наконец, на момент завершения тушения пожара ($\tau = 1,65$ c) было отмечено, что для случая $\Phi = 0,75$ примерно 55 % керосина не успело вступить в химическую реакцию вовсе. Иная картина прослеживается для случая $\Phi = 1$, где, формально, также видны все признаки того, что пожар потушен. Так, скорость наработки продуктов сгорания здесь также приняла нулевые значения, а их температура опустилась ниже 300 °C, однако в данном случае это связано с полным сгоранием имеющегося керосина. Моделирование процесса тушения пожара для данного конкретного случая, по сути, свелось к моделированию процесса отбора энергии у продуктов сгорания за счет испаряющихся капель фреона, которые перед этим способствовали исключительно быстрому их перемешиванию с еще непрореагировавшими компонентами.

Заключение

Применительно к полномасштабному прототипу двигательного отсека ЛА, оборудованного системой пожаротушения, проведено расчетнотеоретическое исследование процессов распространения и тушения пожара, обусловленного утечками керосина. Были рассмотрены случаи тушения пожаров разной мощности, которая регулировалась значением коэффициента избытка топлива (Φ) в однородной керосино-воздушной смеси, заполняющей объем отсека. Расчеты проводились для значений $\Phi = 1; 0,75,$ где, по результатам, было отмечено, что с момента зажигания смеси до срабатывания системы пожаротушения проходит около 0,5 с и еще 0,45 с затрачивается на прохождение огнегасящим веществом (фреоном 114B2) тракта, соединяющего баллоны и коллектора раздачи. На момент подачи фреона из отверстий коллекторов примерно 25 % объема отсека оказывается охвачено пожаром. Для обоих рассмотренных случаев время борьбы с пожаром составило не более 0,7 с – за данное время количество израсходованного фреона составило 5,6 кг. Показано, что при горении бедной смеси ($\Phi = 0,75$) потоки фреона, несмотря на интенсификацию процессов перемешивания продуктов сгорания с еще непрореагировавшими компонентами, успевают остановить распространение пламени по объему отсека, в результате чего примерно 55 % имеющегося керосина остается непрореагировавшим. При горении стехиометрической смеси ($\Phi = 1$) потоки фреона способствуют настолько лавинообразному росту химических процессов, что на момент завершения тушения пожара весь находящийся в отсеке керосин успевает сгореть. На основании полученных результатов предполагается провести работы по оптимизации конструкции коллекторов раздачи, изменив расположение отдельных отверстий для лучшего проникновения струй фреона в зоны горения.

Список источников

- Самолет ТУ-145Б. Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию. Книга 2. Часть 1, 1975. 162 с.
- Нормы летной годности самолетов транспортной категории НЛГ 25 (Часть 25). М.: Федеральное Агентство воздушного транспорта, 2022. 355 с.
- Hewson J., Tieszen S., Sundberg W. et al. CFD modeling of fire suppression and its role in optimizing suppressant distribution // Proceedings of the Halon options technical conference, 2003.
- Meredith K.V. Fire Suppression Modeling with Computational Fluid Dynamics: State of the Art // Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (April 21–26, Saint Petersburg, Russia).
- Gokulakrishnan P., Joklik R., Viehe D. et al. Optimization of Reduced Kinetic Models for Reactive Flow Simulations // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2014. Vol. 136. № 1.
- 6. Akerblom A. LES modelling of spray combustion // PhD Thesis, Lund University. 2021. 90 p.
- Огнетушители типа 1М и 2М. Руководство по технической эксплуатации, АПС-6600-6300 РЭ. 1987. 38 с.
- Dembele S., Dombrovsky L. Modelling fire suppression by water sprays in CFD: a review of progresses and challenges // 18th International Water Mist Conference (19–20 September 2018; London).

- Zettervall N., Fureby C., Nilsson E.J.K. A reduced chemical kinetic reaction mechanism for kerosene-air combustion // Fuel. Vol. 269. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117446
- Снегирев А.Ю., Сажин С.С., Талалов В.А. Модель и алгоритм расчета теплообмена и испарения капель диспергированной жидкости // Научно-технические ведомости Санкт-Пегербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки. 2011. № 1 (116), С. 44–55.
- Stephenson R.M., Malanowski S. Handbook of the Thermodynamics of Organic Compounds // Elsevier, New York. 1987. 552 p.
- 12. Ranz W., Marshall W. Evaporation from Drops // Chemical Engineering Progress. 1952. №. 48. pp. 141–146.

References

- 1. *The TU-145B aircraft. Operation and maintenance manual. Book 2. Part 1*, 1975. 162 p.
- Airworthiness standards for NLG 25 transport category aircraft (Part 25). Moscow: Federal'noe Agentstvo vozdushnogo transporta; 2022. 355 p.
- 3. Hewson J, Tieszen S, Sundberg W et al. CFD modeling of fire suppression and its role in optimizing suppressant distribution. *Proceedings of the Halon options technical conference, 2003.*
- Meredith KV. Fire Suppression Modeling with Computational Fluid Dynamics: State of the Art. Proceedings of the Ninth International Seminar on Fire and Explosion Hazards (April 21–26, Saint Petersburg, Russia).
- Gokulakrishnan P, Joklik R, Viehe D et al. Optimization of Reduced Kinetic Models for Reactive Flow Simulations. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2014;136(1).
- 6. Akerblom A. LES modelling of spray combustion. *PhD Thesis, Lund University.* 2021. 90 p.
- 7. Fire extinguishers of type 1M and 2M. Technical operation Manual, APS-6600-6300 RE. 1987. 38 p.
- Dembele S, Dombrovsky L. Modelling fire suppression by water sprays in CFD: a review of progresses and challenges. 18th International Water Mist Conference (19-20 September 2018; London).
- Zettervall N, Fureby C, Nilsson EJK. A reduced chemical kinetic reaction mechanism for kerosene-air combustion. *Fuel*. 269. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117446
- Snegirev AYu, Sazhin SS, Talalov VA. Model and algorithm for calculating heat transfer and evaporation of droplets of dispersed liquid. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki. 2011;(1 (116)):44–55.
- Stephenson RM, Malanowski S. Handbook of the Thermodynamics of Organic Compounds. Elsevier. New York. 1987. 552 p.
- Ranz W, Marshall W. Evaporation from Drops. *Chemical Engineering Progress*. 1952:(48):141–146.