

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УСЛОВИЙ НЕВЕСОМОСТИ МЕТОДОМ ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ЗЕМНОМ УСКОРЕНИИ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

*Мелихов<sup>1</sup> А.С., Болодьян<sup>1</sup> И.А., Танклевски<sup>2</sup> Л.Т.*

<sup>1</sup>ФГБУ ВНИИПО МЧС России, г. Балашиха.

<sup>2</sup>ФГАОУ ВО СПбПУ, Санкт-Петербург.

Представлен экономически выгодный способ определения параметров процесса горения полимерных материалов для условий невесомости методом физического моделирования при земном ускорении силы тяжести. Знание указанных параметров необходимо для разработки высокоэффективных средств и способов обеспечения пожарной безопасности в обитаемых гермоотсеках КЛА.

Тенденция развития космической техники такова, что с выполнением требований по снижению массы элементов космических летательных аппаратов (КЛА) постоянно расширяется применение полимерных материалов в составе их конструкций. Из полимерных материалов в обитаемых гермоотсеках КЛА изготавливаются элементы интерьера, гибкие трубопроводы, кабели, имеющие массы, превышающие предельно допустимые по пожарной безопасности значения [1].

Для обеспечения дыхания космонавтов обитаемые гермоотсеки КЛА оснащены средствами регенерации кислорода, при работе которых концентрация кислорода в рабочей атмосфере обитаемых гермоотсеков существенно повышается по сравнению с концентрацией кислорода в обычном атмосферном воздухе, в котором концентрация кислорода составляет около 21%. Так, в рабочей атмосфере обитаемых гермоотсеков долговременных орбитальных станций (ДОС) максимальная концентрация кислорода составляет до 25%, а в рабочей атмосфере обитаемых гермоотсеков транспортных КЛА типа «Союз» и пилотируемый транспортный корабль (ПТК) «Федерация» – 40% [2].

При указанной концентрации кислорода большинство полимерных материалов, из ограничительных перечней предприятий космического профиля с необходимыми для изготовления оборудования обитаемых гермоотсеков КЛА физико-механическими свойствами, являются горючими.

Анализ устройства и условий эксплуатации обитаемых гермоотсеков различных КЛА показало, что полимерные материалы составляют единственную горючую нагрузку в обитаемых гермоотсеках КЛА. Именно с их применением в обогащенной кислородом атмосфере обитаемых гермоотсеков КЛА связано возникновение возгораний в этих изделиях, опасных для космонавтов. При этом, как показывает практика [3], источниками возгораний, как правило, являются тепловые источники зажигания электрической природы, образующиеся при аварийных ситуациях в электроцепях оборудования КЛА.

При эксплуатации обитаемых гермоотсеков КЛА оборудование основное время работает в условиях невесомости. В частности, оборудование обитаемых гермоотсеков ДОС в присутствии космонавтов работает только в условиях невесомости. Оборудование обитаемых гермоотсеков транспортных КЛА работает в невесомости в течение времени, равном примерно 98-99% космического полёта. Так, при совершении 30-ти дневного (720 часов) полёта ПТК «Федерация» с экипажем на борту будет находиться под воздействием ускорения силы тяжести в течение около 8 часов. Это время подготовки и осуществления полёта ПТК включает в себя: время нахождения ПТК на стартовой позиции; время нахождения ПТК на активном участке полёта – при выведении его на орбиту; время маневрирования ПТК на орбите; время посадки ПТК. То есть, пожароопасные ситуации в командном отсеке ПТК в течение 712 часов, а это составляет 98.9% времени штатного полёта ПТК «Федерация», могут возникнуть только в невесомости.

С целью поддержания заданного состава рабочей атмосферы при работе средств регенерации кислорода в рабочей атмосфере, а также температуры и влажности в атмосфере обитаемых гермоотсеков КЛА, осуществляется постоянное вентилирование гермоотсеков со скоростями газовых потоков в гермоотсеках, лежащих в диапазоне от 10 см/с и выше.

Теория [4] указывает, что основным параметром, определяющим режимы и возможность устойчивого горения полимерных материалов в условиях невесомости, является скорость потока

газовой среды с концентрацией кислорода, превышающей значения пределов горения полимерных материалов по концентрации кислорода  $C_{lim}$ .

Потребность в более глубоком понимании механизмов процесса горения полимерных материалов, поиск новых технологий по обеспечению пожарной безопасности в гермоотсеках КЛА вызвали широкомасштабные исследования процесса горения в условиях невесомости.

В этой связи были проведены работы по экспериментальному изучению влияния скорости газового потока на режимы горения полимерных материалов в условиях невесомости.

Исследования проводились как в наземных условиях, так и на борту космической станции «Мир» в орбитальном полете в 1994-1998 гг. [5].

Для этого специально была создана по техническому заданию ФГБУ ВНИИПО МЧС России и доставлена на станцию «Мир» экспериментальная установка (ЭУ) «Скорость» [6].

Общий вид базового блока и пульта управления ЭУ «Скорость» показаны на рис. 1 и 2.

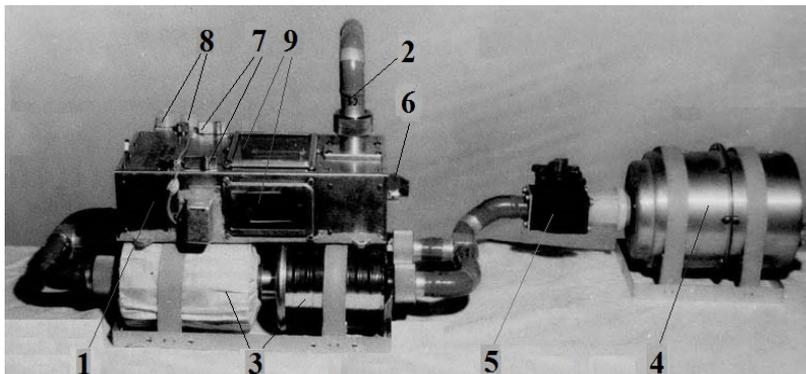


Рис.1. Общий вид базового блока ЭУ «Скорость»: 1–камера горения; 2–трубопровод; 3–фильтры-поглотители продуктов горения; 4–воздуховсасывающий агрегат; 5–регулятор скорости газового потока в камере горения; 6–ручки установки образцов материалов в рабочее положение; 7–ручки подведения электроспирали к образцу; 8–электросоединители; 9–окна для видеосъёмки процесса горения.

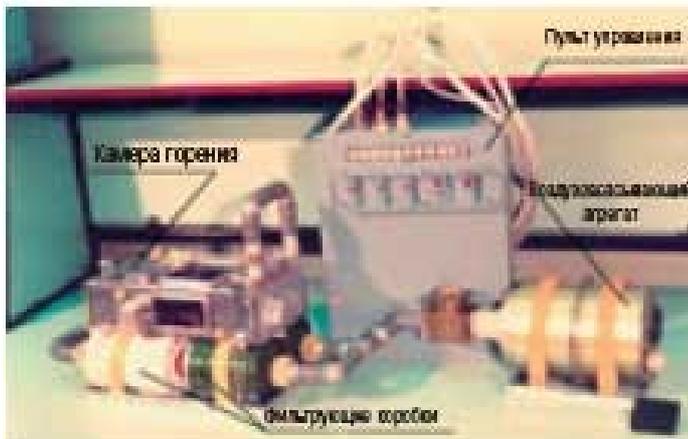


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки «Скорость», включающей базовый блок и пульт управления.

Данные о процессе горения полимерных материалов в условиях невесомости при различных скоростях газового потока и концентрациях кислорода в атмосфере определялись по видеogramмам процессе горения типа той, которая приведена на рис. 3.

На рис. 3. приведена выборка кадров из видеogramмы опыта с горением образца из органического стекла с размерами  $70 \times 8 \times 3$  мм в ЭУ «Скорость» в условиях невесомости на станции «Мир». при давлении атмосферы, равном 0.087 МПа, и при концентрации кислорода 23 %.

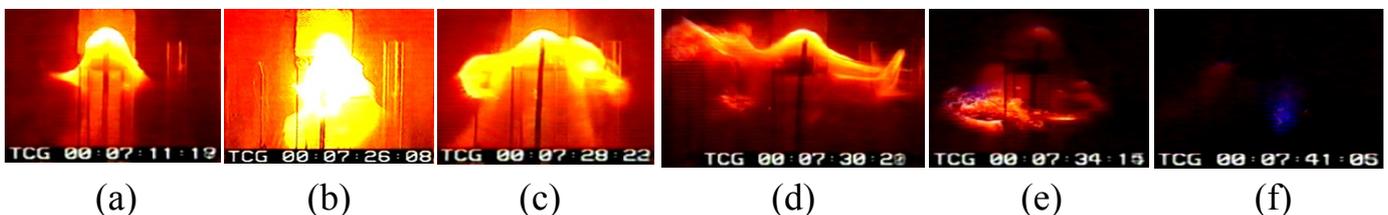


Рис. 3. Процесс развития горения и процесс потухания плоского элемента из органического стекла в ЭУ «Скорость» в условиях невесомости на станции «Мир». Газовый поток на кадрах направлен сверху. Внизу кадров указано время от начала включения видеокamеры.

На кадре (а) в профиль показан горящий образец органического стекла, который был зажжён электрической спиралью за 35 с до момента, зафиксированного на кадре (а), и горит при скорости газового потока, равной 6.4 см/с. Длина пламени составляет 30 мм. После повышения скорости потока до 15 см/с (кадр (b)) интенсивность горения образца резко увеличилась и стала практически близкой, судя по длине и яркости пламени, к интенсивности горения в земных условиях. Длина пламени увеличилась до 65 мм. Далее в камере горения ЭУ «Скорость» была выключена вентиляция. На кадрах (с) и (d) видно, что после выключения вентиляции и остановки вынужденного потока за счёт вязкостных сил пламя начало отходить от поверхности нагретого образца вперёд, в пространство, где ещё находится газовая среда с не с пониженной концентрацией кислорода, и поэтому достаточной для поддержания существования пламени. В этой связи далее произошел отрыв пламени от поверхности образца. На кадре (e) видно, что пламя после этого приобрело форму, близкую к сферической, наиболее выгодную для диффузии окислительной газовой среды в зону пламени [4, 5]. Вследствие снижения из-за отсутствия естественной и вынужденной конвекции поставки к пламени окислительной газовой среды снизилась температура пламени. Как следствие этого снизилась температура поверхности образца и прекратился выход продуктов термодеструкции с поверхности образца. Вследствие прекращения диспергирования органического стекла прекратилось образование в пламени углеродных частиц, свечение которых придавало пламени желто-оранжевый цвет. Из-за снижения в пламени концентрации кислорода в пламени стала образовываться окись углерода, в результате повышения концентрации которой в пламени оно приобрело голубой цвет /кадр (f)/. Затем пламя потухло за счёт теплопотерь излучением. Принятие пламенем голубого цвета указывает на то, что данная горючая система перед потуханием прошла стадию предельных условий горения, которые являются главным явлением в процессе потухания в невесомости. Время прекращения горения образца после выключения вентиляции в данном эксперименте составило 15 с.



Рис. 4. Российские космонавты Викторенко А.С. и Кондакова Е.В. при проведении экспериментов по изучению процессов горения полимерных материалов в условиях невесомости на борту орбитальной станции «Мир».

Исследования по изучению процесса горения полимерных материалов в условиях невесомости на борту космической станции «Мир» в орбитальном полете были проведены с материалами, имеющими крайне отличающиеся физико-химические и физико-механические свойства: органическое стекло, не плавящееся при горении, пластифицированное органическое стекло, плавящееся при горении, хлопчатобумажный шнур, стеклотекстолит, плавящееся – полиацеталь и полиэтилен.

Эксперименты по изучению процессов горения полимерных материалов в условиях невесомости на борту орбитальной станции «Мир» в 1994-98 гг. проводили российские космонавты Викторенко А.С., Кондакова Е.В., Падалка Г.И., Авдеев С.В.

В результате исследований процесса горения полимерных материалов в условиях невесомости на борту космической станции «Мир» в орбитальном полете установлено существование ранее неизвестного параметра процесса горения, которым является предел горения полимерных материалов по скорости газового потока –  $V_{lim}$ , характеризующий пожарную опасность полимерных материалов в условиях невесомости. Он является базовым параметром для разработки высокоэффективных средств и способов обеспечения пожарной безопасности в обитаемых гермоотсеках КЛА.

Зависимость значения  $V_{lim}$  от концентрации кислорода в атмосфере для российского не плавящееся органического стекла приведены на рис. 5.

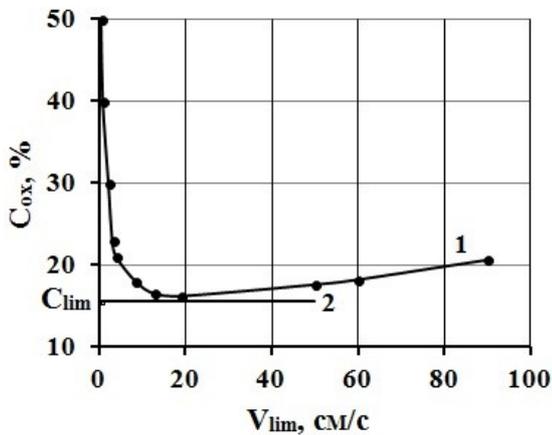


Рис. 5. Зависимость значения  $V_{lim}$  от концентрации кислорода в атмосфере для российского не плавящееся органического стекла: 1 – зависимость экспериментально определённого значения  $V_{lim}$  от  $C_{ox}$  для органического стекла в условиях невесомости. 2 – значение предела горения по концентрации кислорода  $C_{lim}$  для российского не плавящееся органического стекла, равное 15.5 %, определённое при ускорении силы тяжести, равном  $9.81 \text{ м/с}^2$ .

На основании результатов исследований, проведенных в 1994-1998 гг. на космической станции «Мир» в орбитальном полете с использованием параметра  $V_{lim}$  полимерных материалов, была разработана ранее не известная технология пожаротушения и автоматические системы обнаружения пожара с горением полимерных материалов и их тушения для обитаемых гермоотсеков КЛА в условиях орбитального полёта без применения огнетушащих веществ [7].

В основе работы систем автоматического пожаротушения лежит оперативное снижение производительности средств вентиляции в гермоотсеке КЛА после обнаружения пожароопасной ситуации в нём по появлению в атмосфере гермоотсека продуктов горением полимерных материалов. Производительность средств вентиляции при тушении снижается до уровня, при котором во всех точках гермоотсека КЛА достигается скорость вентиляционных потоков, меньшая значения  $V_{lim}$ , являющегося самым малым из всех значений  $V_{lim}$ , определённых для применяемых в гермоотсеке материалов при максимально возможном значении концентрации кислорода в атмосфере гермоотсека. Снижение скорости вентиляционных потоков в гермоотсеке происходит естественным путем – за счет вязкостной диссипации кинетической энергии движения газовой атмосферы.

Реализация такого подхода к пожаротушению имеет принципиальное значение для обеспечения пожарной безопасности обитаемых гермоотсеков орбитальных космических станций, поскольку эти изделия эксплуатируются с экипажем и в автоматическом режиме – без экипажа – только в орбитальном полете. Результаты исследований [4, 5] показывают, что для тушения элементов из полимерных материалов нет надобности в применении огнетушащих веществ. Использование данного способа пожаротушения предельно снижает возможность нарушения экологии атмосферы в обитаемом гермоотсеке КЛА при загорании, поскольку при таком пожаротушении не происходит дополнительное отравление атмосферы огнетушащим веществом.

На рис.5 представлена блок-схема базового варианта автоматической системы пожаротушения для обитаемых гермоотсеков модулей пилотируемых КЛА любого вида. Система пожаротушения может быть выполнена либо автономной, работа которой не зависит от работы систем данного модуля, либо в виде составной части комплекса систем данного модуля КЛА или КЛА в целом. Так это сделано в настоящее время в случае устройства автоматических систем пожаротушения для обитаемых гермоотсеков модулей российского сегмента Международной космической станции.

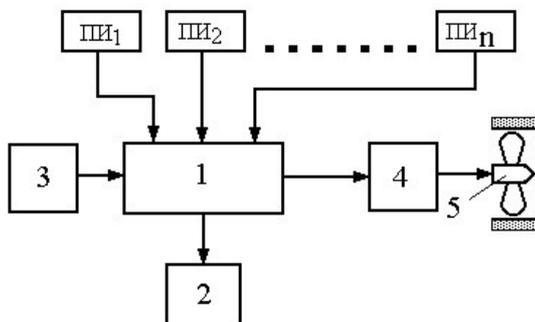


Рис. 5. Блок-схема базового варианта автоматической системы пожаротушения для обитаемых гермоотсеков модулей пилотируемых КЛА: ПИ – пожарные извещатели –  $n$  шт.; 1 – блок анализа пожароопасной обстановки и формирования сигнала «пожар»; 2 – блок сигнализации о пожаре; 3 – блок программируемых команд; 4 – блок управления средствами вентиляции в гермоотсеке; 5 – агрегаты системы вентиляции в обитаемом гермоотсеке КЛА.

Таким образом, для разработки представленных высокоэффективных средств и способов пожаротушения для обитаемых гермоотсеков КЛА с заданными временными параметрами – обеспечивающими своевременное тушение пожара, необходимо определение пределов горения полимерных материалов по скорости газового потока –  $V_{lim}$  в условиях невесомости при различных концентрациях кислорода в газовой среде.

Вследствие ограниченной продолжительности невесомости, создаваемой в свободнопадающих контейнерах и в самолетах-лабораториях, определение значений  $V_{lim}$  многих полимерных материалов этими средствами не представляется возможным вследствие большого времени тепловой релаксации зоны их горения, чем обусловлено длительное время переходных процессов из стабильного состояния при горении при наличии ускорения силы тяжести в стабильное состояние при горении в невесомости. К таким полимерным материалам относятся, например, полимерные материалы, образующие при горении коксовый остаток. Это галогеносодержащие, композиционные и другие материалы.

На долговременных космических станциях определение показателей пожарной опасности полимерных материалов технически сложно и чрезвычайно дорого.

Поэтому были выполнены исследования в поисках способов, имитирующих горение материалов в условиях невесомости и определения показателей пожарной опасности полимерных материалов, не прибегая к созданию состояния невесомости, то есть в условиях действия силы земного притяжения.

Исследованиями, проведенными в данном направлении, было установлено, что наиболее перспективным для этого является способ, в котором процесс горения осуществляется в плоском, горизонтально расположенном движущемся газовом слое, заключенном между двумя параллельными плоскостями. В работе [8] было показано, что уменьшение высоты плоского горизонтально расположенного газового слоя позволяет осуществить процесс теплопередачи, эквивалентный кондуктивному, то есть практически полностью исключить в процессе теплопередачи естественную конвекцию. Данное положение обеспечивает возможность практически полностью исключить в плоском, горизонтально расположенном движущемся газовом слое вертикальное перемещение газовой среды в зоне пламени и изучать процесс горения материалов в условиях, имитирующих невесомость [9]. Определить высоту горизонтально расположенного плоского канала, при которой горение образцов материалов в канале при действии силы земного притяжения протекает так же, как в невесомости, позволили два обстоятельства. Во-первых, установлено [10], что на предельных режимах горения полимерных материалов в азотно-кислородной смеси при концентрациях кислорода от 15 % до 100 % и давлениях от 0,001 до 0,1 МПа максимальная температура в зоне пламени является практически постоянной величиной и не зависит от вида материала. Во-вторых, относительная эффективность подъемной силы, вызывающей естественно-конвективное движение среды при горении в зоне ограниченных размеров характеризуется числом Грасгофа. Если принять ускорение силы тяжести, максимальную температуру в зоне пламени, вязкость среды при максимальной температуре в зоне пламени постоянными величинами для данных условий в опыте, тогда интенсивность естественной конвекции будет определяться только высотой горизонтально расположенного плоского канала.

На основании результатов сравнения значений  $V_{lim}$  для разных материалов, определённых в свободнопадающем контейнере [4] и в горизонтально расположенном плоском канале различной высоты [9] было установлено, что значения  $V_{lim}$  полимерных материалов совпадают при высоте горизонтально расположенного плоского канала  $h_k$ , найденной из соотношения:

$$h_k = 0,49 \cdot (C_{ox})^{-0,3} \cdot P^{-0,5}, \quad (1)$$

где  $C_{ox}$  – объемная доля кислорода в газовой среде;  $P = P_{en} / P_o$  – член, характеризующий давление газовой среды;  $P_o$  – атмосферное давление, МПа;  $P_{en}$  – давление газовой среды в опыте, МПа.

Найденное соотношение впоследствии было подтверждено результатами сравнения значений  $V_{lim}$  материалов с принципиально отличающимися физико-химическими и физико-механическими свойствами, определёнными в горизонтально расположенном плоском канале и на ЭУ «Скорость» на станции «Мир». Принципиальная схема ЭУ «Плоский канал» приведена на рис. 6.

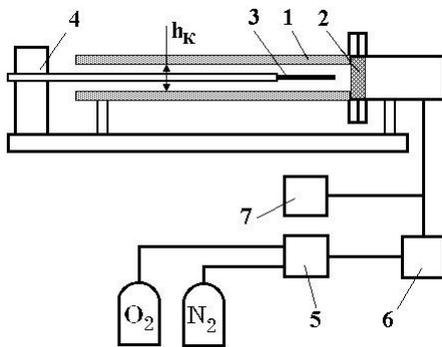


Рис. 6. Принципиальная схема ЭУ «Плоский канал» для определения пределов горения материалов по скорости потока для условий невесомости: 1 – плоская камера горения; 2 – пористый элемент; 3 – образец материала; 4 – механизм с приводом перемещения образца в рабочее положение; 5 – смеситель для создания кислородно-азотной смеси; 6 – расходомер; 7 – газоанализатор.

Работа по определению значения  $V_{lim}$  с помощью предлагаемого устройства проводилась следующим образом. С помощью ЭУ, описанной в работе [11], определялось значение  $C_{lim}$  материала при заданном давлении среды. Значение  $V_{lim}$  для материала определялось, если значение  $C_{lim}$  оказалось меньше концентрации кислорода, при которой будет использоваться материал в гермоотсеке КЛА. По формуле (1) устанавливалась высота камеры горения  $h_k$ . Образцы монолитных материалов изготавливались в виде пластины размером 60x8x(1-3) мм. Образцы тканей и пленок – в виде листов размером 60x30 мм. В камере горения создавался поток азотно-кислородной смеси с заданной концентрацией кислорода. После воспламенения торца образца от электроспиральи он вводился в камеру горения. Фотокамерой фиксировались форма и размеры пламени.

За величину  $V_{lim}$  принималось среднее значение между скоростью потока, при которой горение образца продолжалось, и скоростью потока на 10% меньшей, при которой горение образца прекращалось за время меньше 20 с.

Ниже, с целью доказательства возможности определения параметров процесса горения полимерных материалов для условий невесомости методом физического моделирования процесса горения при земном ускорении силы тяжести на ЭУ «Плоский канал», представлены данные, полученные с помощью установки «Плоский канал» и проведено сравнение этих данных с результатами опытов по изучению параметров горения материалов, полученными на ЭУ «Скорость» на космической станции «Мир» в 1998 г.

На рис. 7-9 приведены зависимости нижнего предела горения по скорости потока  $V_{lim}$  от концентрации кислорода в атмосфере, полученные на ЭУ «Плоский канал» и на ЭУ «Скорость» на космической станции «Мир» в 1998 г.

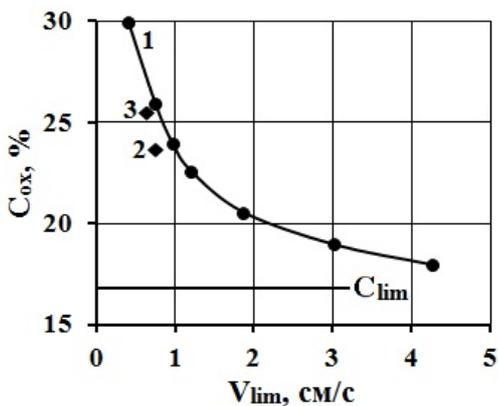


Рис. 7. Зависимость значений  $V_{lim}$  от  $C_{ox}$  (1) для образцов плавящееся органического стекла (США), полученных на ЭУ «Плоский канал», и значения  $V_{lim}$  (2) и (3) для образцов данного органического стекла, полученные в ЭУ «Скорость» на борту станции «Мир» в условиях орбитального полёта. Значение  $C_{lim}$  плавящееся органического стекла равно 17%.

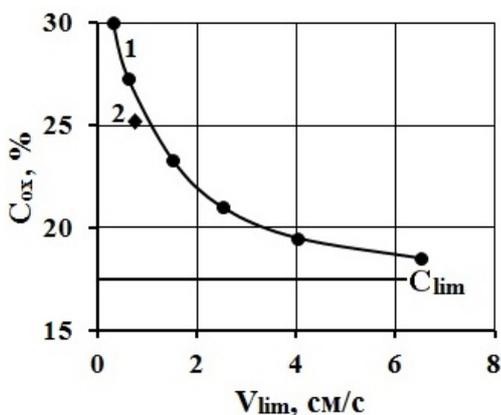


Рис. 8. Зависимость значений  $V_{lim}$  от  $C_{ox}$  (1) для образцов полиэтилена (США), полученных на ЭУ «Плоский канал», и значение  $V_{lim}$  (2) для образца полиэтилена, полученное в ЭУ «Скорость» на борту станции «Мир» в условиях орбитального полёта. Значение  $C_{lim}$  полиэтилена равно 17.5%.

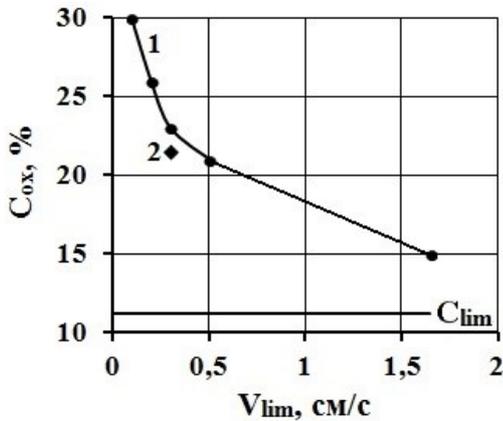


Рис. 9. Зависимость значений  $V_{lim}$  от  $C_{ox}$  (1) для образцов полиацеталей (США), полученных на ЭУ «Плоский канал», и значение  $V_{lim}$  (2) для образца полиацеталей, полученное в ЭУ «Скорость» на борту станции «Мир» в условиях орбитального полёта. Значение  $C_{lim}$  полиэтилена равно 11,2 %.

Процесс горения полимерных материалов в количественном отношении проиллюстрирован на примере данных для органического стекла и полиэтилена, полученные на станции «Мир» и в ЭУ «Плоский канал», приведенных на рис. 7 и 8. Показатели  $V_{lim}$ , полученные на станции «Мир» составили у органического стекла при  $C_{ox} = 23,7\% - 0,75$  см/с, а при  $C_{ox} = 25,4\% - 0,62$  см/с; у полиэтилена при  $C_{ox} = 25,4\% - 0,4-0,75$  см/с. Видно, что значения показателя  $V_{lim}$ , полученные на станции «Мир» несколько меньше значений, полученных в ЭУ «Плоский канал». Это можно объяснить тем, что в плоском канале капля расплава охватывалась пламенем в меньшей степени, чем на ЭУ «Скорость». Поэтому теплоотдача от пламени к капле в плоском канале снижена, что оказывает влияние на значение  $V_{lim}$ .

Близость по величине показателя  $V_{lim}$  при одинаковом значении  $C_{ox}$  указывает на незначительные теплотери из зоны горения в стенки камеры горения ЭУ «Плоский канал». Это указывает на возможность применения ЭУ «Плоский канал» для определения пределов горения материалов по скорости потока для условий невесомости.

Зависимости нижнего предела горения полимерных материалов по скорости потока  $V_{lim}$  от концентрации кислорода в атмосфере, полученные на ЭУ «Плоский канал», имеют две области.

Левая область зависимости соответствует режиму горения, при котором малое увеличение скорости потока приводит к быстрому увеличению способности к горению полимерных материалов, выражающемуся в снижении концентрации кислорода в атмосфере, при которой возможно горение полимерных материалов. Этому участку зависимости соответствует диффузионный режим горения. В области больших скоростей потока способность полимерных материалов к горению начинает снижаться. Этому участку зависимости соответствует кинетический режим горения.

На рис. 10а и 10б приведены кадры из видеосъемки процесса горения образцов полиацеталей в ЭУ «Плоский канал» (рис. 10а) и в ЭУ «Скорость» на космической станции «Мир» (рис. 10б). Эти данные получены при практически равных скоростях газового потока и концентрации кислорода, равной 21,5 %. Кадры из видеосъемки соответствуют данным, приведенным на рис. 9.



Рис. 10. Горения образцов полиацеталей: а) — в ЭУ «Плоский канал»; б) — в ЭУ «Скорость» на космической станции «Мир».

Видно, что физические модели горения образцов полиацеталей в обоих случаях подобны: пламя при малых скоростях газового потока, равных 0,3-0,5 см/с, не охватывает каплю, а располагается в лобовой части горящей капли полиацеталей, наиболее доступной для потока окислительной среды. Это указывает на то, что в том

и другом случае горение в лобовой области образца поддерживается только вынужденным потоком.

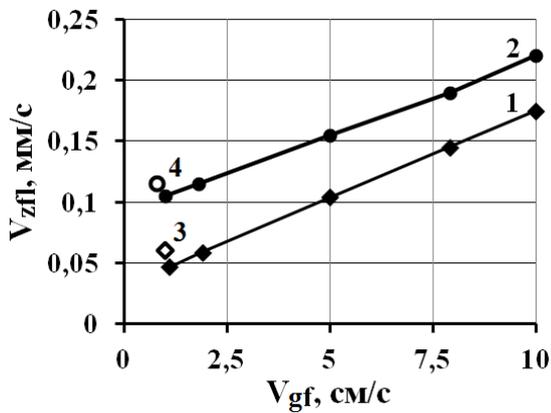


Рис. 11. Результаты определения скорости распространения зоны горения по образцам полиацетала: 1, 2 – ЭУ «Плоский канал»; 3, 4 – ЭУ «Скорость» на станции «Мир» при  $C_{ox}$ : 1, 2 – 22,5%; 3, 4 – 23,6%.

С помощью ЭУ «Плоский канал» определены величины скоростей распространения зоны горения  $V_{zfl}$  по образцам материалов в условиях невесомости. На рис. 11 приведены результаты определения величин  $V_{zfl}$  для полиацетала, полученные в «Плоском канале» и в ЭУ «Скорость» на станции «Мир». Эти значения  $V_{zfl}$  близки.

Видно, что величина  $V_{zfl}$  в условиях невесомости увеличивалась при повышении скорости потока газовой среды и концентрации кислорода в атмосфере  $C_{ox}$ .

С помощью ЭУ «Плоский канал» определены параметры горения материалов с большим временем тепловой релаксации переходных процессов. Представленным методом изучен процесс тления в условиях, соответствующих невесомости. Обнаружен нижний предел тления по скорости потока.

Также измерены значения температуры в зоне тления и скорость тления при строго определенных газодинамических условиях.

Таким образом доказана возможность определение параметров процесса горения полимерных материалов для условий невесомости методом физического моделирования при земном ускорении силы тяжести с помощью экспериментальной установки типа «Плоский канал».

Основанием для этого является соответствие данных, полученных с помощью ЭУ «Плоский канал», и данных, полученных с помощью ЭУ «Скорость» на космической станции «Мир».

#### Список литературы

1. Попов А.М., Николаев В.М., Мелихов А.С., Болодьян И.А. / Расчетно-экспериментальное исследование горения полимерных материалов в замкнутых объемах при повышенном содержании кислорода в атмосфере. // В сб. научн. тр. «Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах». – М.: ВНИИПО МВД СССР. Вып. 2. 1977. – С. 31-38.
2. Справочник пользователя. / Российский сегмент МКС. // ОАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева. 2016. – 191 с.
3. Накакуки А. / Пожары и противопожарные мероприятия в камерах высокого давления и концентрации кислорода. // В журнале «Андзен Когаку». 1972, т. 2, № 5. – С. 98-105.
4. Мелихов А.С., Потякин В.И., Рыжов А.М., Иванов Б.А. // О предельных режимах горения полимеров в отсутствии свободной конвекции. // Физика горения и взрыва. 1983. № 4. – С. 27-30.
5. Ivanov A.V., Balashov E.V., Melikhov A.S. et al. / «Experimental Verification Flammability in Space». // National Aeronautics and Space Administration. Glenn Research Center. NASA/CR-1999-209405. Cleveland, Ohio, USA. November 1999. – p. 54.
6. Техническое задание ФГБУ ВНИИПО МЧС России на создание экспериментальной установки «Скорость». 1990. – 23 с.
7. Патент России № 2116092. / Способ обеспечения пожарной безопасности обитаемых гермоотсеков космических летательных аппаратов. // Приоритет изобретения от 05.12.1995 г. Авторы: Мелихов А.С., Зайцев С.Н., Иванов А.В. Опубликовано службой ФИПС Роспатента 27.07.98. Бюл. № 21.
8. Михеев М.А., Михеева И.М. / «Основы теплопередачи». // – М.: Изд-во «Энергия». 1977. – 344 с.
9. Патент России № 2116093. / Устройство по определению предела горения материалов по скорости потока для условий невесомости. Авторы: Мелихов А.С., Иванов А.В., Потякин В.И. // Приоритет от 05.12.1995. Опубликовано службой ФИПС Роспатента 27.07.1998. Бюл. № 21.
10. Мелихов А.С., Потякин В.И., Фланкин Е.В. / Предельные условия горения материалов при пониженных давлениях. // В журнале «Физика горения и взрыва». – Новосибирск.: 1982, № 3. – С. 44-47.
11. Болодьян И.А., Волохина А.В., Жевлаков А.Ф., Мелихов А.С., Потякин В.И. / О способности тканей к горению при повышенных давлениях. // В сб. научн. тр. «Вопросы горения и тушения полимерных материалов в обогащенных кислородом средах». – М.: ВНИИПО МВД СССР, Вып. 2, 1977. – С. 14-18.