

УДК 629.734

**С. С. КОМАРОВ, Н. И. МИСКАКТИН****ПЕРСПЕКТИВНЫЕ  
АЭРОПНЕВМОУПРУГИЕ  
ТЕХНОЛОГИИ СПАСЕНИЯ  
СПУСКАЕМЫХ ОБЪЕКТОВ**

Рассматриваются предпосылки и особенности создания перспективного средства спасения спускаемых объектов. Формируется проблема пневмоупругости спускаемых аэропневмоупругих систем. Показана актуальность проблемы аэропневмоупругости для авиакосмической техники, позволяющей решать задачи, связанные не только с обеспечением безопасности полета и устойчивости посадки, но и с созданием условий комфорта для экипажа и сохранности грузов. *Пневмоупругость; спускаемый объект; ударное взаимодействие с экраном; воздушная подушка; пневмоконструкции; композиционные материалы*

**Комаров  
Сергей Сергеевич**

ст. науч. сотр., рук. СКБ авиац. устройств. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УАИ, 1967). Д-р техн. наук по динамике, прочности машин, приборов и аппаратуры (УГАТУ, 1999). Иссл. в обл. пневмоупругости транспортных систем.

**Мискактин  
Николай Иванович**

ст. науч. сотр. того же СКБ. Дипл. физик-теоретик (БГУ, 1976). Канд. техн. наук по проектированию и конструкциям судов (Ленингр. кораблестр. ин-т, 1987). Иссл. в обл. теории оболочек и газовой динамики.

**М**ногие современные конструкции и инженерные сооружения взаимодействуют с газовой средой. Для летательных аппаратов газовая среда служит основным источником внешнего нагружения. В других конструкциях, таких как парашюты и несущие мягкие поверхности, среда, кроме всего прочего, формирует надувные средства перемещения. В рассматриваемых пневмокаркасных конструкциях (амортизаторах, парaplанах, гибких ограждениях аппаратов на воздушной подушке, дирижаблях, ангарах, лодках и т. п.) газовая среда выступает в качестве регулятора жесткости конструкции в целом, а также отдельных ее элементов и источника внутреннего нагружения.

Процессы взаимодействия перечисленных объектов с окружающей средой сопровождаются аэропневмоупругими явлениями, которые характеризуются большим многообразием и мо-

гут стать причиной возникновения в конструкциях не только опасных колебаний, но еще существенного перераспределения нагрузок [1]. Широкий спектр аэропневмоупругих процессов, которому подвергаются конструкции при взаимодействии с окружающей средой, в одних случаях может вызвать развитие усталостных разрывов и трещин, приводящих к преждевременному исчерпанию ресурса конструкции. В других случаях, при интенсивных переходных режимах, может наступить исчерпание несущей способности системы из-за хрупкого разрушения композиционных материалов или малоциклового усталости. В третьих, вызвать существенные, соизмеримые с размерами самой конструкции, деформации, и она продолжает работать в измененном (складчатом) виде, но уже с отличными характеристиками. Известны многочисленные примеры, когда аэропневмоупругие деформации приводили к авариям и катастрофам летательных аппаратов и судов на воздушной подушке.

Стремление ко все более высоким скоростям движения спускаемых объектов по внешней траектории и, соответственно, при динамическом взаимодействии с экраном требует постоянного совершенствования средств их спасения, использования в них композиционных материалов и систем адаптивного управления, но при этом способствует широкому применению аэропневмоупругих систем с регулируемой конфигурацией и жесткостью. Эти процессы сопровождаются повышением уровня колебаний конструкции, возросшим проявлением различных аэропневмоупругих явлений (например, воздушной подушки и авторегулирования давления в подкупольной полости пневмооснований при динамическом взаимодействии с экраном). Средства спасения спускаемых объектов должны эксплуатироваться в широком диапазоне скоростей и высот неподготовленных площадок приземления, при ветре с различным по траектории спуска направлением воздействия. Поэтому расширение эксплуатационных требований к средствам спасения спускаемых объектов по предельной скорости приземления и устойчивости пробега по пересеченной площадке при посадке с ветровым сносом потребовало создания принципиально новых конструктивных схем средства спасения, обладающих высокой эффективностью срабатывания энергии спускаемых объектов.

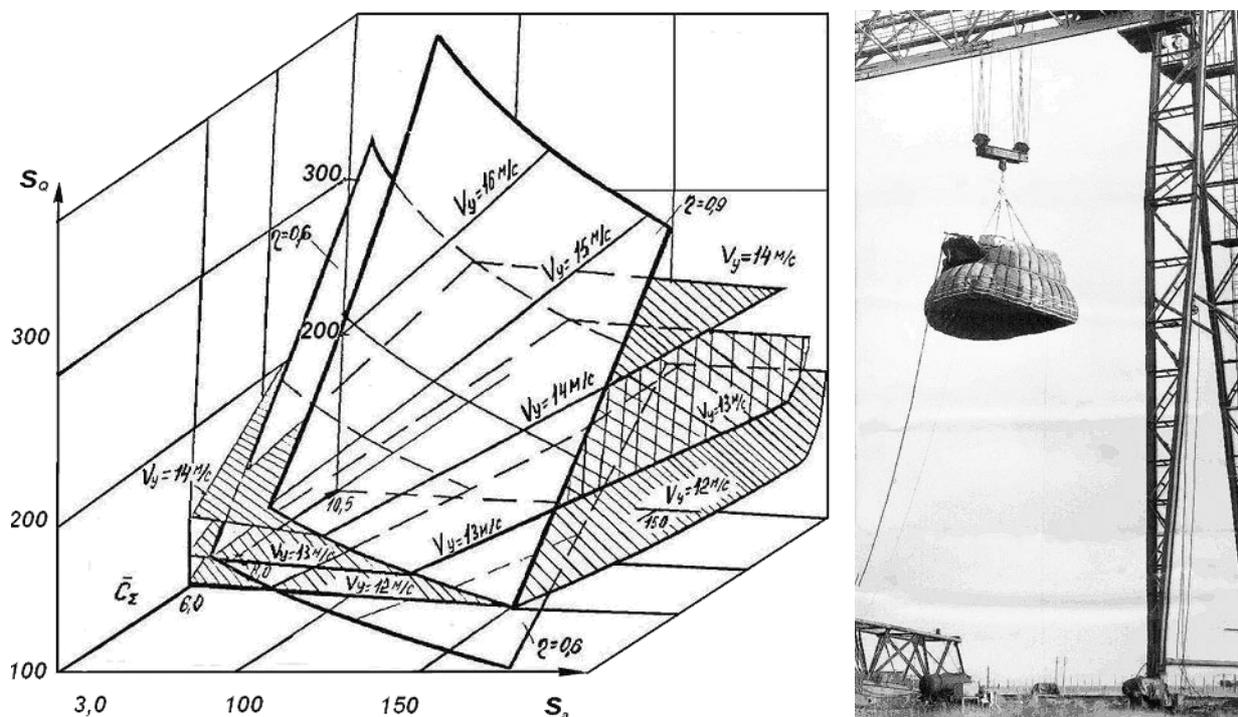


Рис. 1. Зависимость скорости приземления аэропневмоупругой системы от эффективности срабатывания энергии спускаемого объекта

Исследования показали, что скорость приземления аэропневмоупругой системы, оптимальной по эффективности срабатывания энергии спускаемого объекта, растет с увеличением эффективности. Так, при повышении эффективности пневмоупругой системы с  $\eta = 0,6$  до 1,0 оптимальная скорость приземления системы растет от  $V_{y0} = 14$  до 20 м/с (рис. 1).

Широкое использование систем автоматизированного, совместно с БЦВМ, управления жесткостью аэропневмоупругих систем позволяет осуществить адаптацию спускаемых систем с постоянно меняющимися условиями парашютной фазы спуска либо ветровыми нагрузками и рельефом площадки приземления в момент посадки и пробега, полнее и точнее управлять ими.

Сложный характер взаимодействия спускаемых аэропневмоупругих систем с окружающей средой, а также с бортовыми системами (БЭУ, БЦВМ), находящимися на борту спускаемого объекта, приведены на рис. 2.



Рис. 2. Характеристика проблемы аэропневмоупругости средства спасения спускаемых систем

Прежде чем приступить к рассмотрению проблем создания перспективного средства спасения, остановимся на принятой в статье терминологии. Поскольку практически все известные средства спасения спускаемых объектов содержат в своем составе парашюты и посадочные устройства, которые в зависимости от фазы спуска включаются в работу, введем термин «спускаемые аэропневмоупругие системы», который предполагает систему, включающую, наряду со спускаемым объектом, парашюты и надувные посадочные устройства. При этом понятие «спускаемые аэроупругие системы» предполагает изделие, содержащее спускаемый объект и каркасированные мягкие несущие поверхности (парашюты, надувные крылья и т. д.), а понятие «спускаемые пневмоупругие системы», включает в себя, кроме спускаемого объекта, принудительно наполняемые в полете или при динамическом взаимодействии с экраном, пневмоконструкции (рис. 3). Причем в зависимости от назначения средства спасения, перечисленные системы могут быть включены в работу последовательно или одновременно (например, как это имеет место при десантировании грузов). Отметим, что спускаемые аэроупругие системы типа «мягкие несущие поверхности – спускаемый объект» являются отдельным случаем рассматриваемых систем спасения [2, 3, 5].

Особенно актуальны задачи аэропневмоупругости для авиакосмической техники, так как решение данной проблемы связано не только с обеспечением безопасности полета и устойчивости посадки, но и с созданием условий комфорта для экипажа и сохранности грузов.

Экспериментальные сбросы на копровых стендах пневмоупругих систем, снабженных надувными посадочными устройствами в виде каркасированных пневмооснований, показали [4, 6], что при динамическом взаимодействии с экраном в таких системах наблюдаются эффекты воздушной подушки и авторегулирования давления в подкупольной полости любых незамкнутых оснований.

Исполнение каркаса пневмооснований в виде секционированных панелей с принудительным регулируемым наддувом позволило выявить следующие новые качества такого средства спасения, а именно; адаптивное регулирование конфигурации пневмоконтрукции и начальной жесткости каждого из ее отсеков. Последние свойства позволили существенно расширить диапазон надежного и устойчивого приземления предлагаемого пневмоупругого средства спасения по массе спускаемых объектов и скорости приземления.

Основной задачей при создании аэропневмоупругих систем спасения является обеспечение их безопасного и устойчивого приземления за счет полного срабатывания энергии, накопленной спускаемым объектом к моменту начала спуска.

Анализ информации о движении спускаемой аэропневмоупругой системы и сопутствующих ему эффектах позволил сформировать содержательное описание процесса, т. е. осуществить первую попытку четко изложить закономерности протекающего процесса и поставить прикладные задачи. Содержательное описание процесса посадки спускаемой системы послужило исходным материалом для последующих этапов формализации, а именно, построения формализованной схемы процесса и его математической модели.

Формализации реального процесса посадки спускаемых аэропневмоупругих систем предшествовало исследование механизмов возникновения новых физических эффектов, таких как образование в наружных полостях повышенного давления (воздушной подушки) (рис. 5, 6) и авторегулирование давления в незамкнутых полостях пневмоконтрукций (рис. 4), и сопровождающих их явлений.

Динамика посадки спускаемых аэропневмоупругих систем существенно зависит от характера сил, действующих на них, которые, в свою очередь, определяются их пневмоупругими свойствами. Переход от моделей спускаемых аэропневмоупругих систем как абсолютно твердого тела к пневмоупругим моделям в виде системы массовых точек, соединенных между собой упругими и демпфирующими связями, необходим не только для более полного учета сил инерции, порождаемых относительными перемещениями частей спускаемых пневмоупругих систем, но и для более глубокого познания механизмов пневмоупругой неустойчивости, которые существенно отличаются от тех, которые свойственны движению абсолютно твердых тел.

Таким образом, проблема пневмоупругости для своего решения на современном этапе требует более точных данных по аэродинамике, статическим и динамическим деформациям пневмоконтрукций и новому уровню моделей динамического взаимодействия спускаемых аэропневмоупругих систем с экраном.

В известных публикациях по динамике полета летательных аппаратов рассматриваются только траекторные флуктуации и оцениваются характеристики устойчивости и управляемости, при этом упругость конструкции либо совсем не учитывается, либо оценивается приближенно путем введения поправок в аэродинамические коэффициенты при расчетах статических деформаций.



Рис. 3. Классификация спускаемых аэропневмоупругих систем

Вместе с тем при посадке спускаемых пневмоупругих систем преобладают динамические процессы, обусловленные большими деформациями и контактным взаимодействием пневмооснований с экраном, порывами ветра, неровностями поверхности приземления, турбулентностью атмосферы и т. д., которые носят нелинейный колебательный характер и влияют на устойчивость движения системы, а также на прочность пневмоконструкций и их ресурс.

Для правильного понимания таких процессов, выработки мероприятий для устранения вредных последствий этих явлений необходимо в уравнениях динамики посадки спускаемых объектов более точно отразить пневмоупругие свойства рассматриваемых систем.

Сложный характер динамического взаимодействия спускаемых аэропневмоупругих систем с окружающей средой показал (рис. 7), что при формировании внешнего вида и компоновки перспективного средства спасения необходимо широкое привлечение детализированных математических моделей, которые в полной мере позволят в процессе посадки оценить влияние тех или иных внештатных ситуаций на спускаемую систему (рис. 8).

В связи с этим возникла необходимость разработки новой научной проблемы, объясняющей физические эффекты воздушной подушки и авторегулирования давления в подкупольных полостях пневмоконструкции при динамическом взаимодействии с экраном. Эта проблема носит комплексный характер, предъявляет высокие требования к системным исследованиям и базируется на основных положениях нестационарной газодинамики, динамики движения твердого тела и теории мягких оболочек.

Данную научную проблему назовем пневмоупругостью и будем рассматривать как одну из разновидностей проблемы аэроупругости [1].

Пневмоупругость или теория взаимодействия мягких каркасированных оболочек с экраном представляет достаточно новый раздел механики сплошной среды.

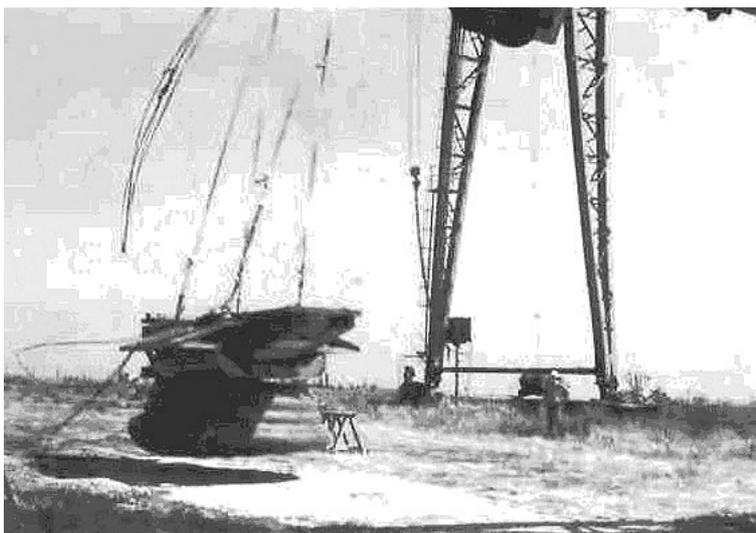


Рис. 4. Посадка спускаемой аэропневмоупругой системы

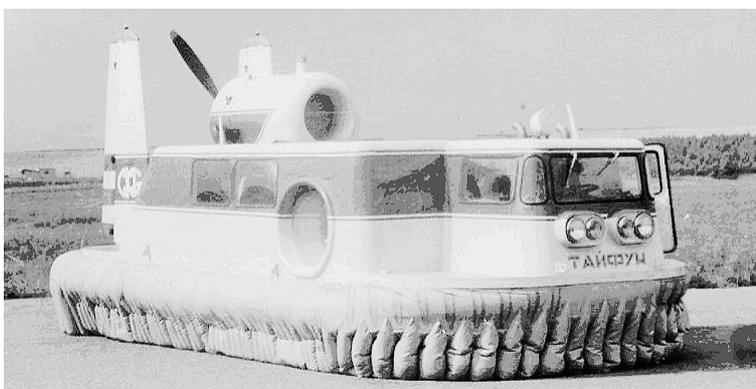


Рис. 5. Движение по земле аппарата на воздушной подушке «Тайфун»



Рис. 6. Движение по воде аппарата на воздушной подушке «Скат»

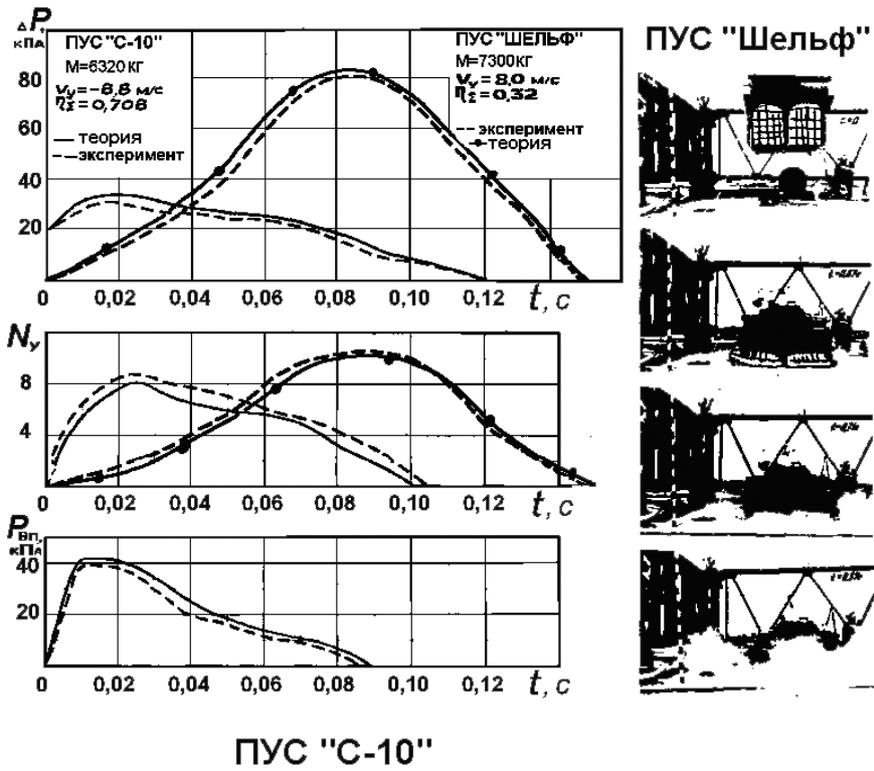


Рис. 7. Копрные испытания спускаемых пневмоупругих систем



Рис. 8. Пробег спускаемой пневмоупругой системы по площадке приземления

Термин «пневмоупругость» не является исчерпывающим, так как включает, наряду с пневматическими и упругими силами, также и силы инерции. В случае, когда силы инерции не учитываются, имеем дело со статической пневмоупругостью.

По аналогии с классификацией аэроупругости, предложенной Колларом [4, 6], многообразие явлений пневмоупругости можно классифицировать с помощью диаграммы, отражающей сочетание тех или иных сил, участвующих в соответствующих пневмоупругих явлениях. Отдельные виды явлений пневмоупругости отличаются друг от друга по их отношению к этим силам.

Традиционно, при рассмотрении явлений аэроупругости, обращаются к треугольнику сил, с вершинами в которых помещены аэродинамические и упругие силы, а также силы инерции (рис. 9).



Рис. 9. Треугольник сил пневмоупругости

В связи с тем, что динамика спускаемых аэропневмоупругих систем, как правило, представляется через перемещение спускаемого объекта как жесткого тела, относительно которого совершаются упругие колебания, традиционную диаграмму аэроупругости несколько видоизменим.

Так как динамика спускаемых пневмоупругих систем представляется через перемещение системы как жесткого тела, относительно которого совершаются колебания, то силы инерции разделим на две составляющие, одна из которых соответствует упругим колебаниям пневмоупругой системы, другая — ее движению как абсолютно твердого тела.

Например, явление динамической пневмоупругости гибких ограждений аппаратов на воздушной подушке (подобно флаттеру) лежит внутри треугольника, так как оно включает все три типа сил и должно быть связано со всеми вершинами.

Несмотря на сложность точного определения границ, касающихся вопросов пневмоупругости, класс задач, объединенных на диаграмме сплошными линиями с вершинами треугольника, обычно рассматривается в качестве основного. Конечно, на диаграмму можно нанести и другие задачи, граничные с перечисленными. Отметим, что для пневмоупругости возможны свои явления и задачи, отличные от задач аэроупругости, например, пневмотермоупругость.

Таким образом, пневмоупругость — научная проблема, описывающая новый физический эффект авторегулирования давления в подкупольной полости незамкнутых пневмоконструкций при динамическом взаимодействии с экраном, требующая системного подхода к исследованию динамики спускаемых пневмоупругих систем спасения, совершающих движение в газовой среде вблизи экрана (рис. 10).

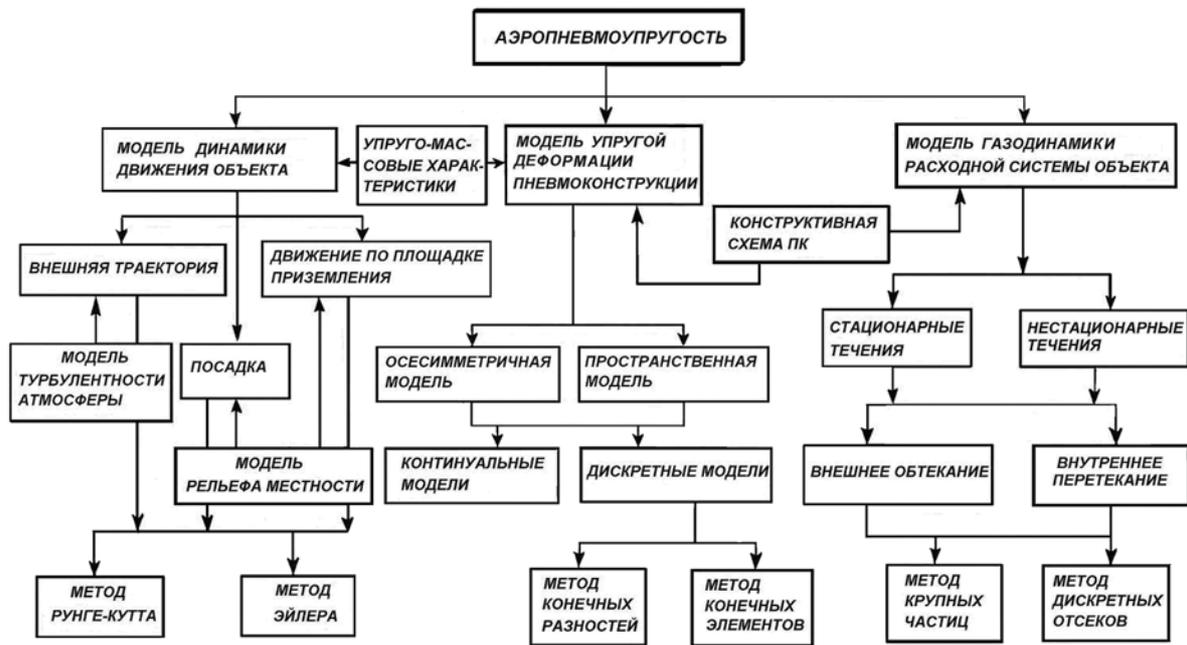


Рис. 10. Структура математической модели аэропневмоупругости средства спасения

Особенно ярко нелинейные свойства пневмоупругих систем проявляются при посадке спускаемых объектов с ветровым сносом на неподготовленные площадки или при десантировании объектов с предельно малых высот (рис. 11). Разрабатываемые пневмоупругие системы спасения спускаемых объектов позволяют существенно изменить технологию посадки. Использование эффекта воздушной подушки позволяет спускаемой системе только с помощью тормозных парашютов гасить большую кинетическую энергию спускаемого объекта, обеспечивая при этом устойчивое приземление последнего в заданное место с малым уровнем перегрузок. Поэтому для оценки устойчивости движения спускаемых систем важной становится нелинейная постановка задачи пневмоупругости, которая позволяет выявить влияние начальных условий, новых промежуточных положений равновесия и т. д. Решение подобных задач требует привлечения методов исследования систем нелинейных дифференциальных уравнений. Эти системы, как правило, многомерны и не допускают аналитических решений.

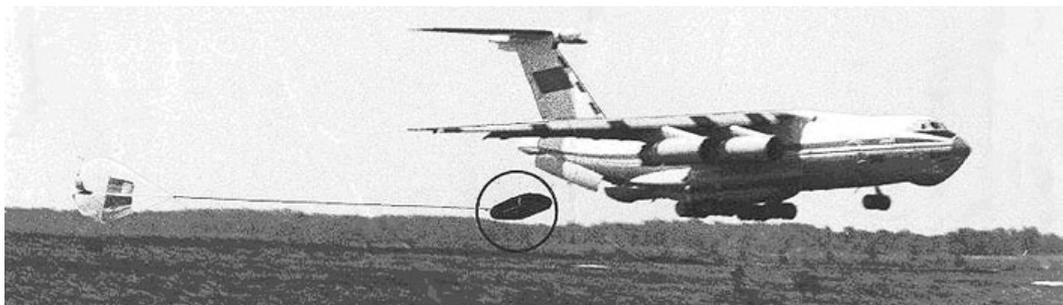


Рис. 11. Посадка спускаемой аэропневмоупругой системы

Следует отметить, что проблема создания адекватной математической модели посадки спускаемых пневмоупругих систем — исключительно трудоемкая задача и в конечном счете, успех вычислительного эксперимента полностью зависит от степени разрешимости этой узловой проблемы.

В силу ограниченных технических и финансовых возможностей наземных экспериментальных установок и летного эксперимента в авиационной и космической технике, в последнее время интенсивно развивается направление, ориентированное на создание и опережающее функ-

ционирование математических моделей разрабатываемых объектов на основе метода вычислительного эксперимента.

Рассмотрение динамики спускаемых пневмоупругих систем показало, что посадка спускаемого объекта в составе указанной системы спасения является сложным физическим процессом.

Экспериментальные сбросы на копровом стенде пневмоупругих систем, снабженных рассматриваемыми пневмооснованиями в виде незамкнутых пневмокаркасных оснований, показали, что при динамическом взаимодействии с экраном в таких основаниях наблюдаются эффекты воздушной подушки и авторегулирования давления в подкупольной полости, которые реализуются следующим образом (рис. 12).

На прямом ходе обжатия каркасированных пневмооснований происходит интенсивный рост давления в их полостях. Причем если в пневмокаркасах оснований рост давления не ограничен и определяется степенью его упругой деформации и герметичностью технологических швов, соединяющих тканый материал, то в подкупольных полостях оснований при замыкании их экраном образуется воздушная подушка, давление в которой растет только до критической величины.

При достижении давления в подкупольной полости (воздушной подушке) критической величины пневмокаркас оснований теряет устойчивость формы, нижняя кромка поднимается, перепуская сжатый в подкупольных полостях (рабочее тело) воздух в окружающую среду. После снижения давления в подкупольной полости критической величины нижняя кромка каркасированной оболочки опускается, закрывая зазор, что вызывает опять рост давления в воздушной подушке и т. д. Заметим, что описанный автоколебательный процесс происходит непрерывно на протяжении всего прямого, а частично и обратного хода обжатия пневмооснования.

Благодаря описанной схеме работы пневмооснования и удается обеспечить постоянство давления в подкупольной полости пневмоупругой системы спасения. Таким образом на прямом ходе обжатия пневмооснования реализуется бесконтактный колебательный режим работы пневмооснования, причем степень обжатия пневмооснования зависит от величины начального давления наддува пневмокаркаса, т. е. его вертикальной жесткости. Остаточный объем воздушной подушки, образуемый после обжатия пневмооснования на прямом ходе, оказывает значительное влияние на характер обратного хода пневмоупругой системы. Дело в том, что оставшаяся после завершения прямого хода обжатия пневмооснования в воздушной подушке масса сжатого рабочего тела обладает определенной энергией, которая и формирует обратный ход пневмоупругой системы и отскок спускаемого объекта. Эта энергия на обратном ходе затрачивается на ускорение спускаемого объекта и на преодоление разряжения в подкупольной полости пневмооснования.

Обратный ход обжатия основания пневмоупругой системы — наиболее неблагоприятный режим работы спускаемой пневмоупругой системы. Поэтому при эксплуатации спускаемых пневмоупругих систем необходимо тщательно подбирать начальную вертикальную жесткость



Рис. 12. Фазы посадки спускаемых пневмоупругих систем

пневмокаркаса основания с помощью давления наддува, чтобы свести к минимуму остаточный объем пневмооснования. На обратном ходе обжатия пневмооснования в его подкупольной полости развивается отрицательное давление, которое существенно снижает вертикальную и изгибную жесткости пневмокаркаса. Снижение жесткости пневмокаркаса и контактное взаимодействие пневмооснования с экраном вызывает смещение центра масс спускаемого объекта относительно центра давления пневмооснования и, соответственно, интенсивный пикирующий момент. Движущийся спускаемый объект наклоняется носом к экрану и, если давление наддува пневмокаркаса основания или изгибная жесткость основания малы, то происходит зарывание корпуса спускаемого объекта в грунт и опрокидывание пневмоупругой системы при пробеге (рис. 13).

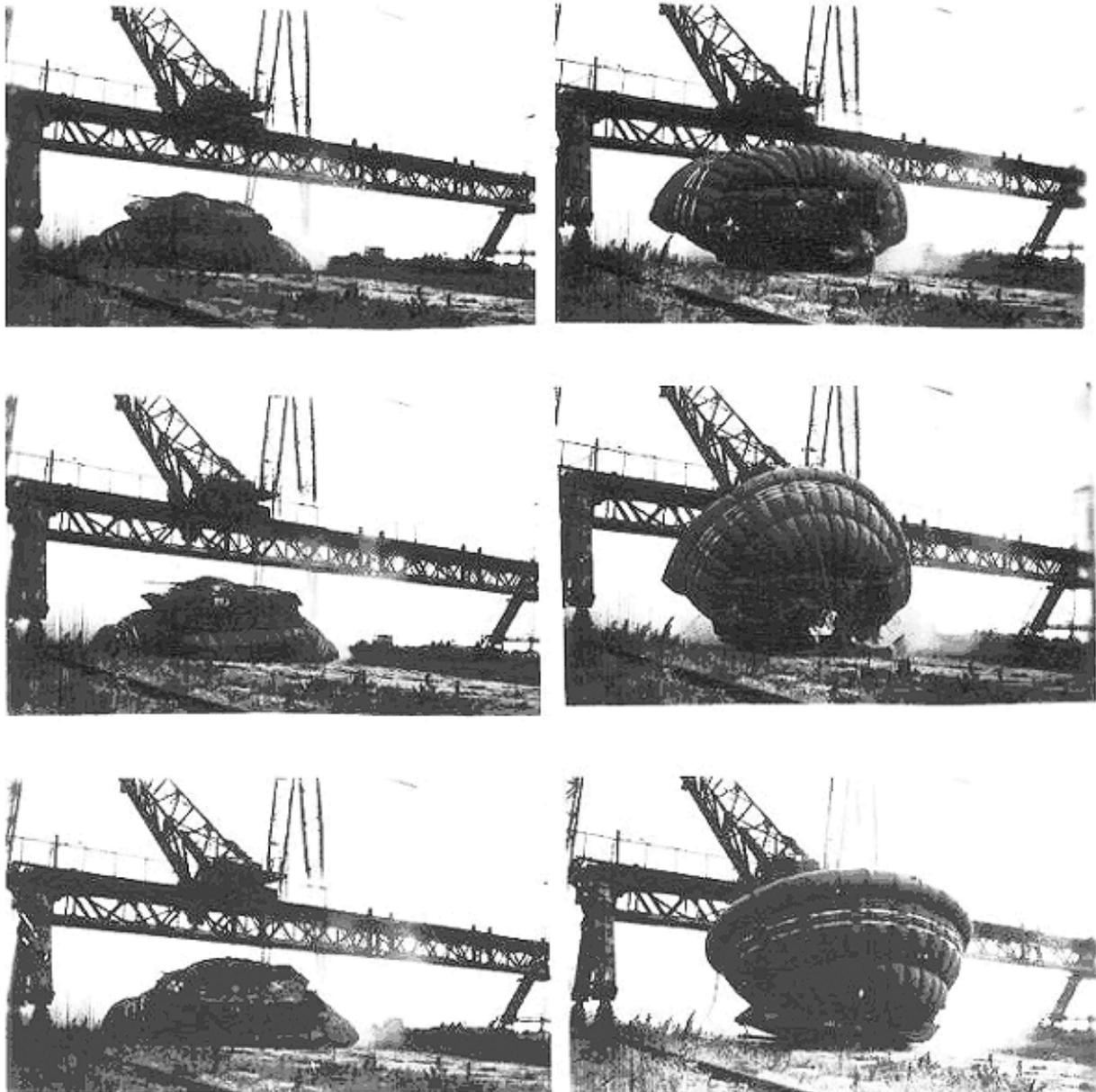


Рис. 13. Зарывание в грунт и опрокидывание спускаемой пневмоупругой системы при пробеге по экрану

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования на физических объектах и математических моделях посадки спускаемых аэропневмоупругих систем позволили наметить основные направления совершенствования их конструктивных схем.

Исследования показали, что:

- наиболее эффективным конструктивным типом пневмооснований в составе спускаемых пневмоупругих систем является пневмокострукция, содержащая набор каркасированных незамкнутых мягких оболочек и использующая экранный эффект (воздушную подушку);
- лучшим способом форсирования энергетических возможностей пневмооснований является принудительный наддув пневмокаркаса от внешнего источника давления. Изменение степени начального наддува автономных отсеков пневмооснований позволяет в широком диапазоне регулировать вертикальную жесткость пневмооснования и, соответственно, добиваться оптимального перераспределения несущей способности как между пневмокаркасом основания и воздушной подушкой, так и между отдельными разнесенными отсеками пневмооснования;
- отличительной особенностью работы спускаемых аэропневмоупругих систем при посадке является наличие колебаний пневмокаркаса основания на всем пути обжата относительно некоторого переменного положения равновесия, задаваемого статической формой его упругой характеристики  $H_a(Kp)$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бисплингофф, Р. Л.** Аэроупругость / Р. Л. Бисплингофф, Х. Эшли, Р. Л. Халфмэн. М. : Изд. ин. лит., 1955. 800 с.
2. **Белоцерковский, С. М.** Исследование парашютов и дельтапланов на ЭВМ / С. М. Белоцерковский, М. И. Ништ, А. Т. Пономарев, О. В. Рысев. М. : Машиностроение, 1987. 240 с.
3. **Ильгамов, М. А.** Введение в нелинейную гидроупругость / М. А. Ильгамов. М. : Наука, 1991. 200 с.
4. **Комаров, С. С.** Основы пневмоупругости мягких средств спасения спускаемых объектов / С. С. Комаров, Н. И. Мискактин, Н. Ю. Цвиленева // Наука и технологии. М. : РАН, 2005. С. 302–313.
5. **Морозов, В. И.** Математическое моделирование сложных аэроупругих систем / В. И. Морозов, А. Т. Пономарев, О. В. Рысев. М. : Физматлит, 1995. 736 с.
6. **Комаров, С. С.** Анализ эффективности пневмоупругих систем спасения при посадке спускаемых объектов / С. С. Комаров, Н. И. Мискактин // Вестник УГАТУ. Уфа, 2002. Т. 2, № 2. С. 179–186.