

На пути к пятому и шестому поколению

Часть IX. Отсеки вооружений - вычитая, преумножай



Булат Павел. 43 года.

Закончил в 88 году БГТУ
"ВОЕНМЕХ", (Ленинградский
механический институт)
Кандидат наук.
Механика жидкости, газа и
плазмы

Я убежден, что посредством чисто математических конструкций мы можем найти те понятия и закономерные связи между ними, которые дадут нам ключ к пониманию явлений природы.

Альберт Эйнштейн

Даже если объяснять с предельной ясностью, кто-то все равно не поймет.

Следствие из третьего закона Чизхолма

Отсеки вооружений - один из главных отличительных признаков истребителей 5-ого поколения. Кажется странным, что столько времени обходились без них. Еще на Як-9 времён второй мировой войны за кабиной лётчика вместо дополнительного топливного бака мог устанавливаться отсек с бомбой. Почему же на реактивных истребителях внутренние отсеки вооружения не использовались? Почему их стали применять на самолётах пятого поколения?

С одной стороны, появились новые требования, такие как малозаметность и сверхзвуковая крейсерская скорость. С другой стороны, появились композиционные материалы, позволяющие сделать отсек лёгким, но достаточно прочным для того, чтобы выдержать значительные нестационарные нагрузки. В настоящей статье приведены результаты исследований нестационарных отрывных течений, проводившихся более 20 лет, а также некоторые перспективные компоновочные решения по подвеске ракетного вооружения.

Краткие сведения из теории

Скорость большинства современных истребителей ограничена величиной равной двум числам Маха ($M=2$). Особенности российского театра военных действий могут потребовать и больших скоростей, как минимум, $M=2.5$. Обтекание отсеков вооружений с открытыми створками сопровождается сложными нестационарными явлениями, теория которых завершена только в 2004 г. Её краткий обзор приведён в приложении к данной статье. Здесь мы приведём основные сведения, совершенно необходимые для дальнейшего изложения.

Обтекание отсеков относится к теории течений с внезапным расширением (ТВР) потока, тесно связанной с проблемой донного давления. Долгое время такие технические объекты, как донные срезы ракет, камеры Эйфеля аэродинамической трубы, резонаторы газодинамических лазеров, эжекторы, диффузоры форсажных камер изучались независимо друг от друга, пока в конце 80-х годов не выяснилось, что во всех этих случаях имеют место различные проявления одних и тех же явлений.

Обтекание обратной ступеньки - задача, в определённой мере, классическая для газовой динамики. Картина течения существенно отличается для случая дозвуковых (рис.1а) и сверхзвуковых скоростей (рис.1б).

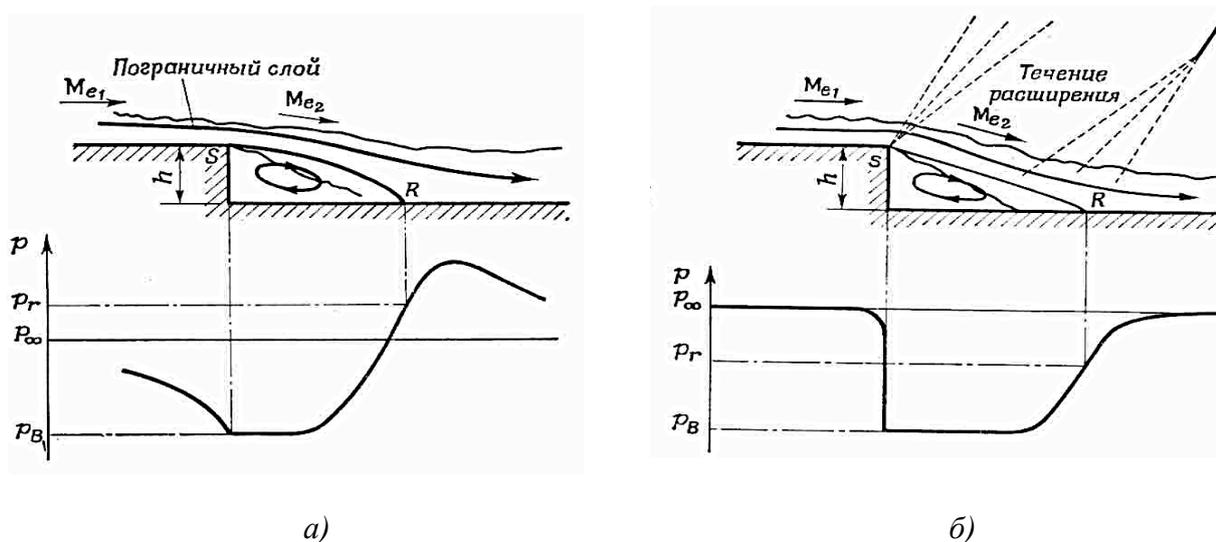


Рис. 1. Обтекание обратной ступеньки при $M < 1$ и $M > 1$.

На дозвуковых скоростях поток может быть полностью рассчитан методами теории пограничного слоя и слоя смешения. Колебания возможны, но их амплитуда мала, а частота, наоборот большая. При $M > 1$ ТВР приходится рассматривать в условиях полной постановки задачи с учётом вязко-невязкого взаимодействия потоков и наличия ударных волн. При определённом сочетании параметров могут возникать мощные низкочастотные колебания, которые способны разрушить элементы конструкции.

ТВР подобны в плоском и осесимметричном случае, при внешних (рис.2) и внутренних задачах (рис.3). Хотя, на первый взгляд, картина существенно отличается, но основные элементы течения и закономерности явлений общие. Всегда можно выделить донную область, найти некоторое среднее донное давление, которое определяет картину течения в целом.

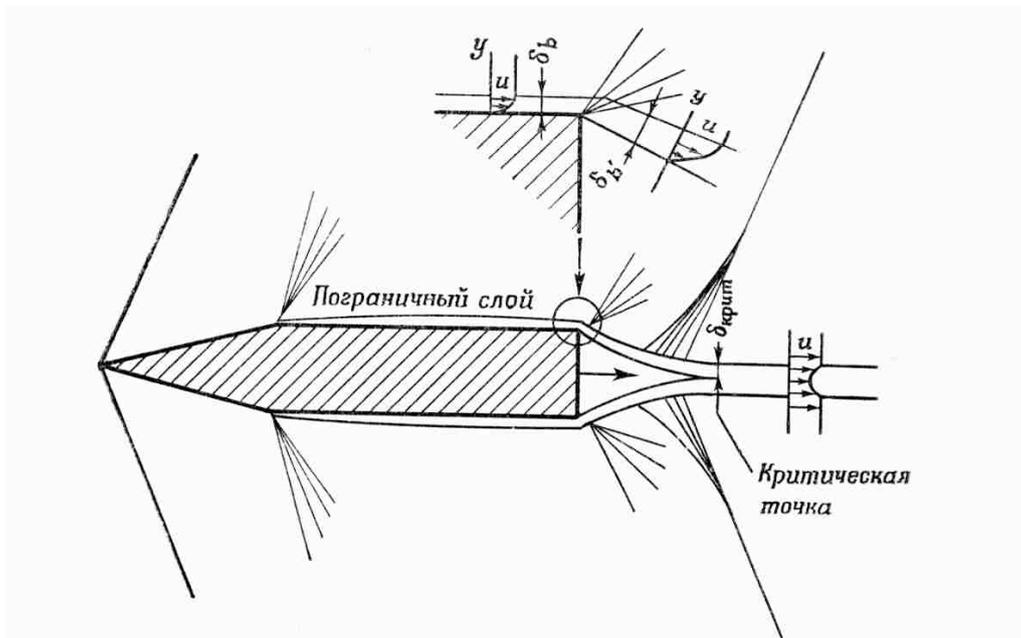
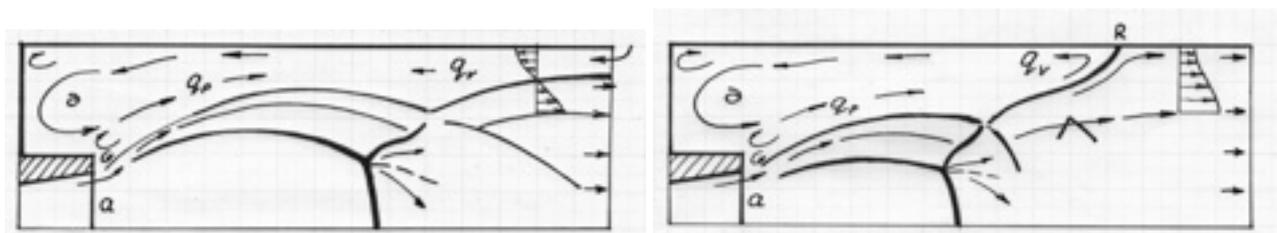


Рис.2. Внешнее течение с внезапным расширением.

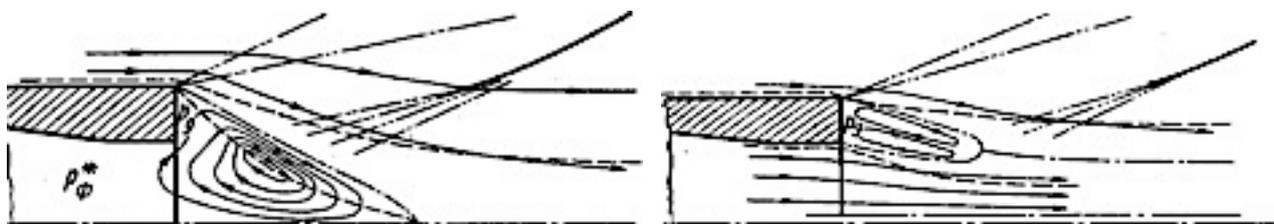


а) Открытая донная область

б) Закрытая донная область

Рис 3. Внутреннее течение с внезапным расширением.

При изучении обтекания донных частей ракет и снарядов в 50-е годы 20-ого века были введены понятия открытого и закрытого следа (рис.4). Аналогично, в случае внутренней задачи можно ввести понятие открытой и закрытой донной области. В закрытой донной области газ обновляется сравнительно медленно, только за счёт массообмена со слоем смешения. Само течение в донной области циркуляционное. В открытой донной области (открытом следе) имеет место возвратное течение в донную область. Газ обновляется быстро.



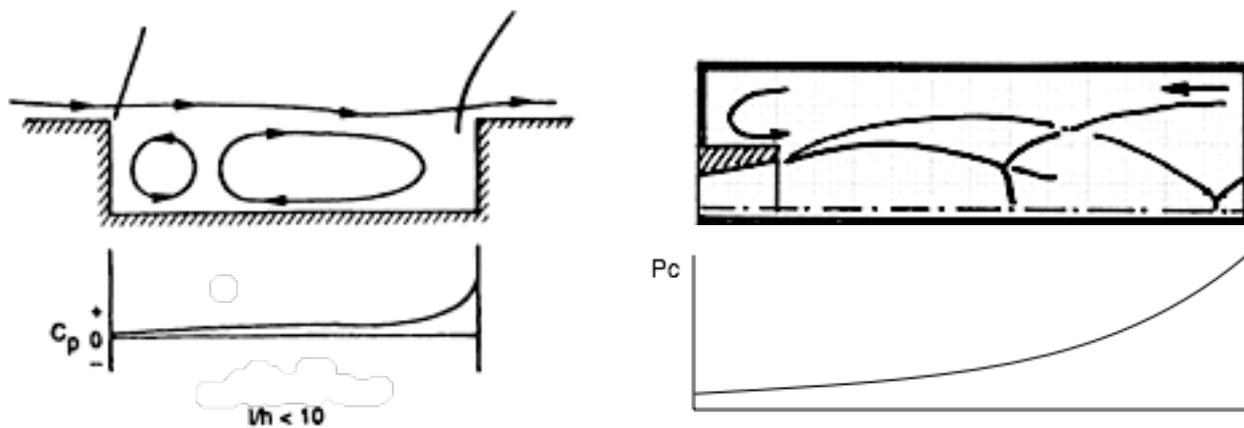
а) Закрытый след

б) Открытый след

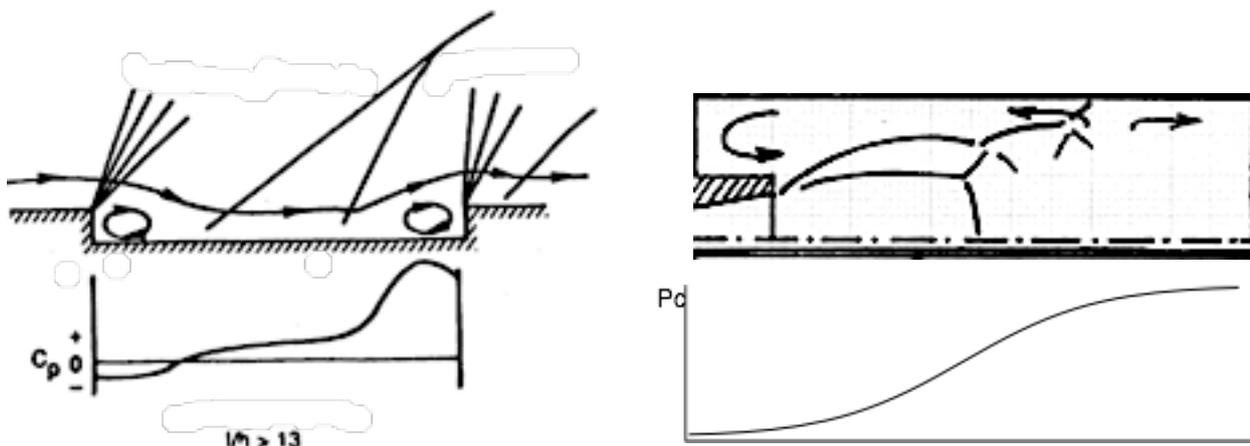
Рис.4. Внешнее течение типа «открытый след» и «закрытый след».

Можно выделить класс автомодельных течений, когда давление в донной области целиком определяется параметрами выше по потоку.

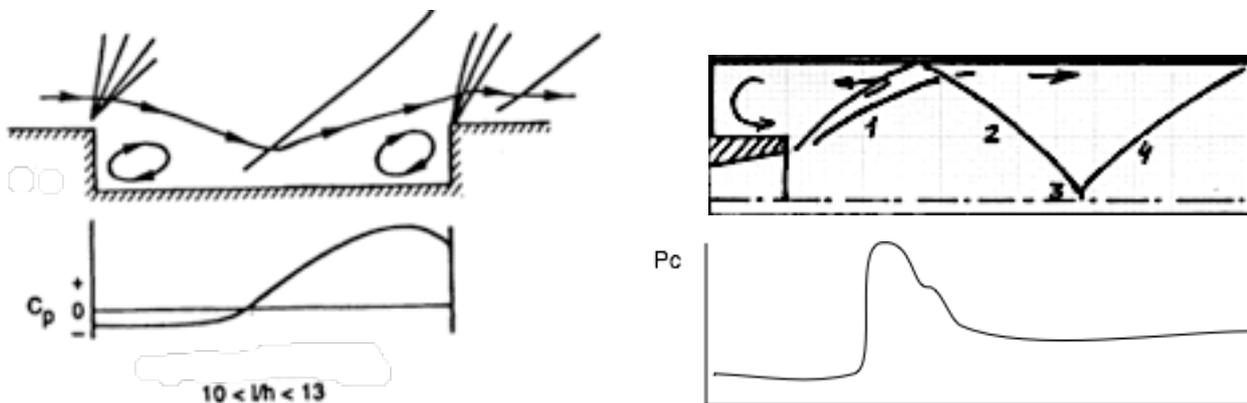
Отсеки вооружений, как правило, нельзя считать ни осесимметричными, ни плоскими. Их обтекание носит существенно трехмерный характер. Тем не менее, для них характерны те же режимы течения, что и в случае истечения газа из сверхзвукового сопла в осесимметричную трубу (рис.5). Если длина отсека недостаточно велика по сравнению с его глубиной, то течение подобно течению в осесимметричной трубе, на срезе которой установлена диафрагма, т.е. появляется дополнительный параметр задачи, а именно диаметр отверстия диафрагмы.



а) Течение с открытой донной областью.



б) Течение с закрытой донной областью.



в) Автомоделное течение.

Рис.5. Аналогия течения в отсеках вооружений и осесимметричном канале.

Внешняя задача отличается от внутренней отсутствием отражённого скачка 2 и точки его отражения от оси 3. Висячий 1 и хвостовой 4 скачки присутствуют всегда. Несмотря на эту разницу, все стационарные режимы и зависимость основных параметров от скорости и скоростного напора набегающего потока подобны.

Детальное исследование [1] низкочастотных колебаний выявило их релаксационную псевдогармоническую природу. Из этого следует, что они могут быть представлены в виде совокупности гармонических функций, соответственно, можно выделить главную частоту (нулевую моду), определяющую максимальную амплитуду колебаний (рис.6).

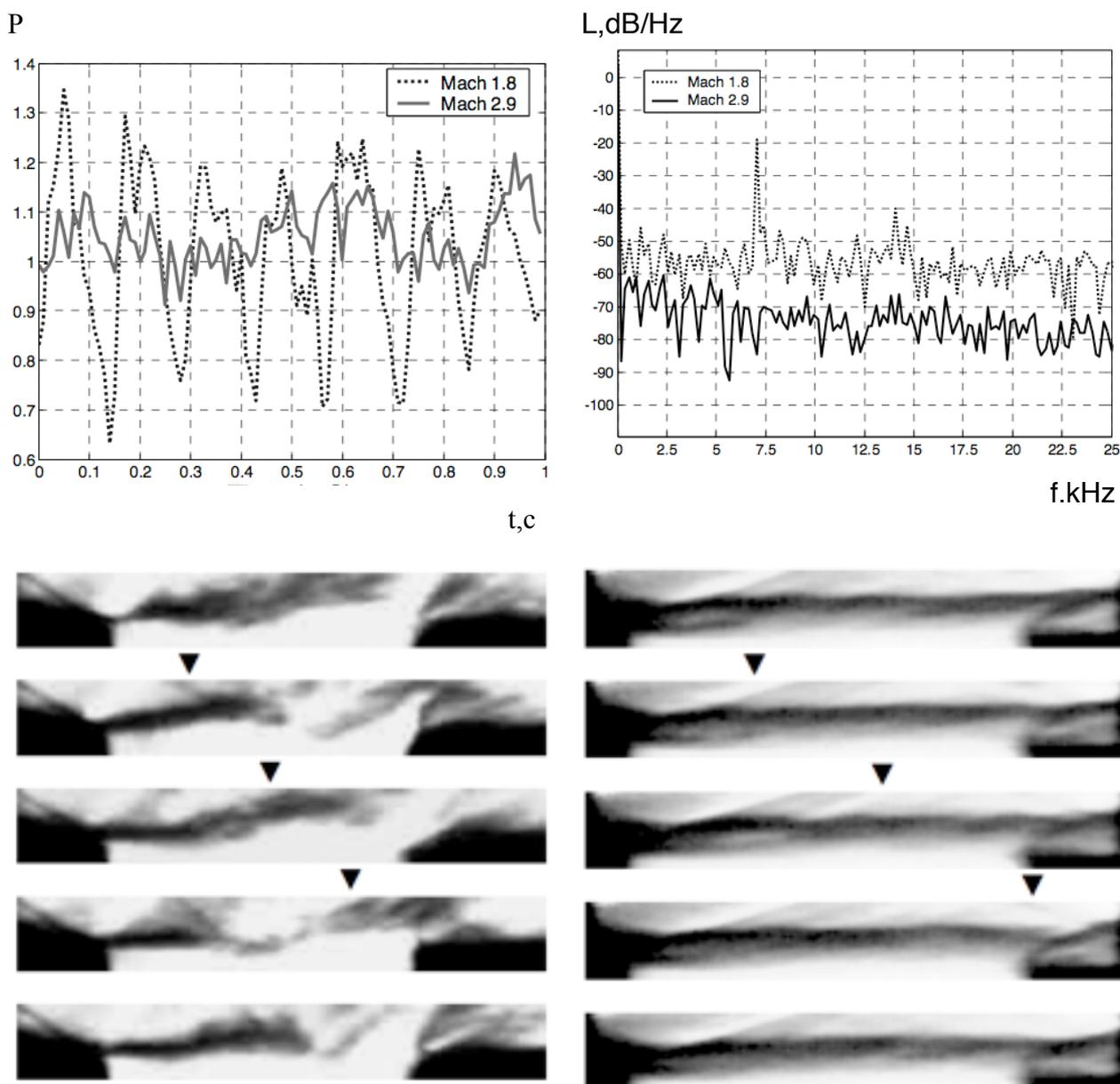


Рис.6. Колебания среднего давления в отсеке и спектр мощности колебаний.

Частота и амплитуда нулевой моды зависит только от параметров набегающего потока, высоты обратной ступеньки и угла схода слоя смещения с кромки. Также можно выделить первую моду, зависящую ещё и от длины отсека (трубы). Первая мода проявляется в наложении на основные колебания вторичных пульсаций, частота следования которых

больше частоты основных колебаний. Существуют вторые и последующие моды. Только они зависят от формы характерного поперечного сечения отсека (канала).

Вторая мода искажает форму колебательного цикла, определяет его отличие от идеальной формы цикла, характерной для осциллятора Ван-дер-Поля. На графиках распределения спектральной мощности колебаний по частотам обычно удаётся выделить нулевую и первую моду колебаний (рис.6 справа вверху). Таким образом, вторые и последующие моды колебаний для проектирования конкретных технических изделий несущественны и факторами, от которых они зависят, можно пренебречь. Так переход от двухмерного осесимметричного течения внутри трубы к трехмерному внешнему обтеканию отсека приводит размытию основного колебательного цикла и наложению нескольких колебательных процессов, но все основные закономерности сохраняются. Это важнейшее открытие позволило изучать ТВР на моделях, которые наиболее удобны для каждого конкретного случая. Так визуализацию течения обычно производят на плоских установках (рис.7), а параметрическое исследование режимов удобнее проводить на осесимметричных установках с внутренним течением (труба с соплом внутри).

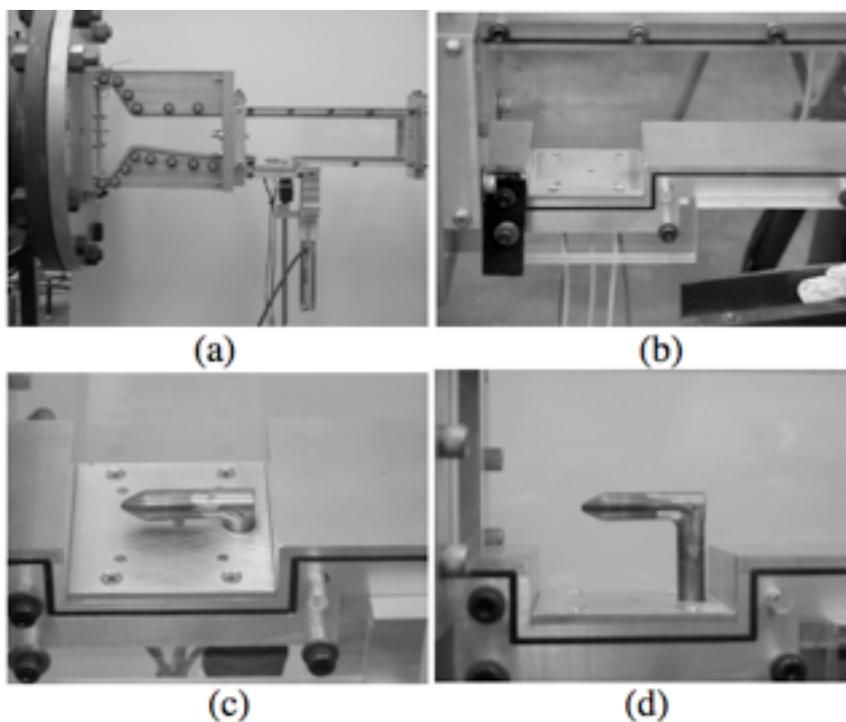


Рис.7. Плоская установка [2] для визуализации потока внутри отсека.

a) сопло с переходником для создания равномерного сверхзвукового течения, b) модель отсека вооружений с прозрачными стенками, c) модель ракеты внутри отсека, d) модель ракеты, выходящей из отсека.

Основные проблемы, связанные с пуском ракет из отсека на сверхзвуковой скорости, и рекомендации по их решению

Можно выделить три основные группы вопросов:

1. Действие на стартующую ракету, при старте её из отсека на сверхзвуковой скорости, знакопеременных моментов, что может привести к столкновению с носителем или срыву наведения из-за резкого ухода с траектории.
2. Возникновение мощных низкочастотных колебаний в отсеках с открытыми створками.

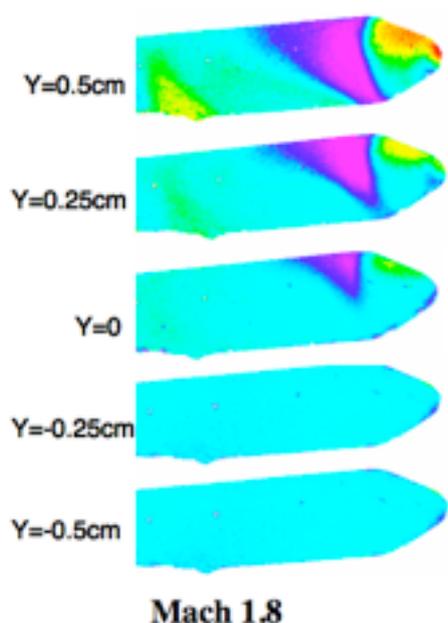


Рис.8. Поле давления при выходе ракеты из отсека вооружений.

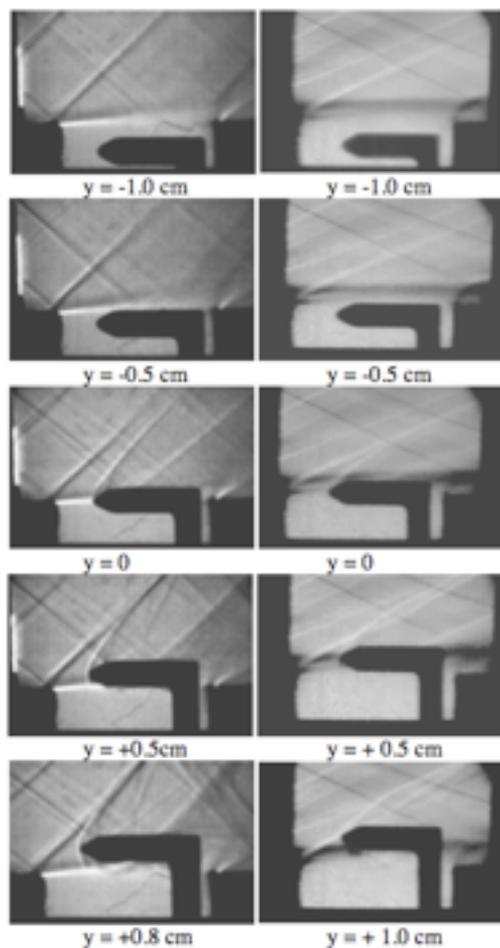


Рис.9. Течение и ударные волны при выходе ракеты из отсека вооружений.

3. Возникновение при открытии створок сложной ударно-волновой структуры, в том числе, бегущих ударных волн.

Если ракета выходит из отсека с небольшим углом атаки, то возникает момент в сторону увеличения угла атаки (рис.8). Чем выше скорость, тем больше момент. Эффективность рулей в данном случае мала, а двигатель запускать опасно из-за влияния выхлопной струи на отсек вооружений. Даже, если ракета выходит из отсека строго параллельно оси летательного аппарата, её все-равно разворачивает из-за взаимодействия оживальной или конической головной части со слоем смешения (рис.9).

На F-22 и F-35 эта проблема решается за счёт выдвижения ракеты с помощью мощных трапедий за пределы слоя смешения. Однако, проблему прохождения ракеты сквозь конический (или косой) скачок уплотнения выдвижные устройства не решают. Взаимодействие головной части ракеты с фронтом ударной волны вызывает появление момента, вращающего ракету в сторону носителя. Пуски ракет Falcon с SR-71 показали, момент на кабрирование на больших сверхзвуковых скоростях настолько велик, что существует реальная опасность попадания ракеты в носитель. С этим можно бороться, вынося отсеки с более лёгкими ракетами ближе к передним кромкам крыла, а также введением в программу управления ракетой специального манёвра для преодоления фронта ударной волны. Именно так поступили на F-22, разместив УР «Сайдуиндер» в отдельных боковых небольших отсеках. На видео, запечатлевших пуск этих ракет, видно, что «Сайдуиндер» в самом начале полёта совершает манёвр «зигзаг», сначала уходя от носителя, а затем, возвращаясь на свою траекторию. Существуют и другие технические решения, о чём пойдет речь ниже.

Физика колебаний на дозвуковых и сверхзвуковых скоростях имеет различную природу. При $M < 1$ мелкие вихри в слое смешения генерируют акустические высокочастотные волны. Они переотражаются от стенок отсеков и создают пульсации давления. Методы борьбы с высокочастотными акустическими колебаниями хорошо отработаны. Они основаны на установке внутри отсеков перфорированных вибрационных

экранов. Ёмкости, образованные полостями за отверстиями, имеют собственную частоту, равную частоте подавляемых колебаний.

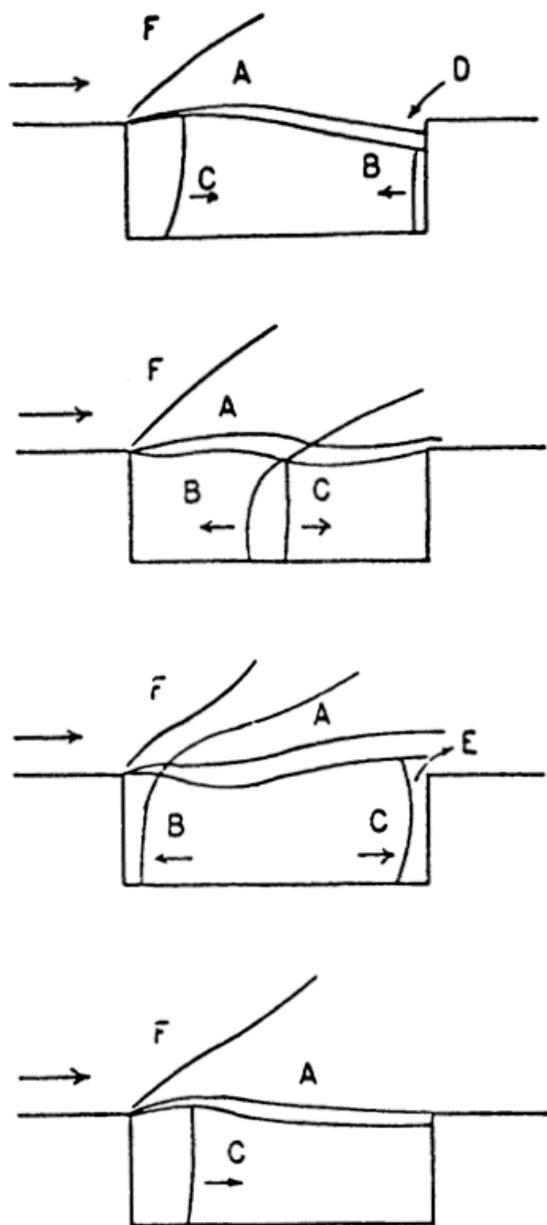


Рис.10. Бегущая ударная волна внутри отсека.

выталкивается дополнительный газ «Е». Эти колебания расхода воздуха в отсеке не связаны с характеристиками слоя смешения, они сопоставимы по величине амплитуды с расходными колебаниями, но имеют отличную от них частоту. Крупные вихри и бегущие ударные волны внутри отсека - наиболее опасны. Следовательно, геометрию отсека нужно подобрать таким образом, чтобы крупные вихри туда не попадали, а бегущие ударные волны не образовывались.

Расходные низкочастотные колебания можно подавить, подавая дополнительный расход воздуха из области высокого давления в донную область, либо создавая в ней необходимое разрежение. Например, это можно сделать при помощи устройства [5], показанного на рис.

Гораздо опаснее низкочастотные колебания, возникающие на сверхзвуковых скоростях. На их изучение потрачены значительные усилия [3]. Выявлено [4], что колебания носят расходный характер. Это означает, что при определенном сочетании параметров набегающего потока и геометрии отсека (трубы, канала, обратного уступа) стационарное течение существовать не может. Колебания происходят из-за возникновения дисбаланса наполнения и опорожнения донной области.

Если отсек недостаточно длинный для данной скорости потока, на его заднюю стенку могут оказывать воздействия крупные вихри (рис.6). Их скорость примерно равна 0.7 от средней скорости в слое смешения. На сверхзвуковых скоростях попадание крупного вихря в отсек может привести к разрушительным последствиям из-за значительных градиентов скоростного напора внутри вихря.

Еще более опасным являются бегущие ударные волны («в» и «с» на рис.10), возникающие в коротких отсеках (диафрагмированных каналах). Прохождение ударных волн сквозь друг друга приводит к изменению распределения давления внутри отсека и вертикальному перемещению слоя смешения «А», образованию второй ударной волны во внешнем потоке, а также возникновению дополнительной колебательной моды. Вследствие перемещения ударной волны «в» в донную область вовлекается дополнительное количество газа «D», а ударной волной «с»

11. Управляя заслонкой 7, можно добиться отсутствия колебаний при любой скорости потока.

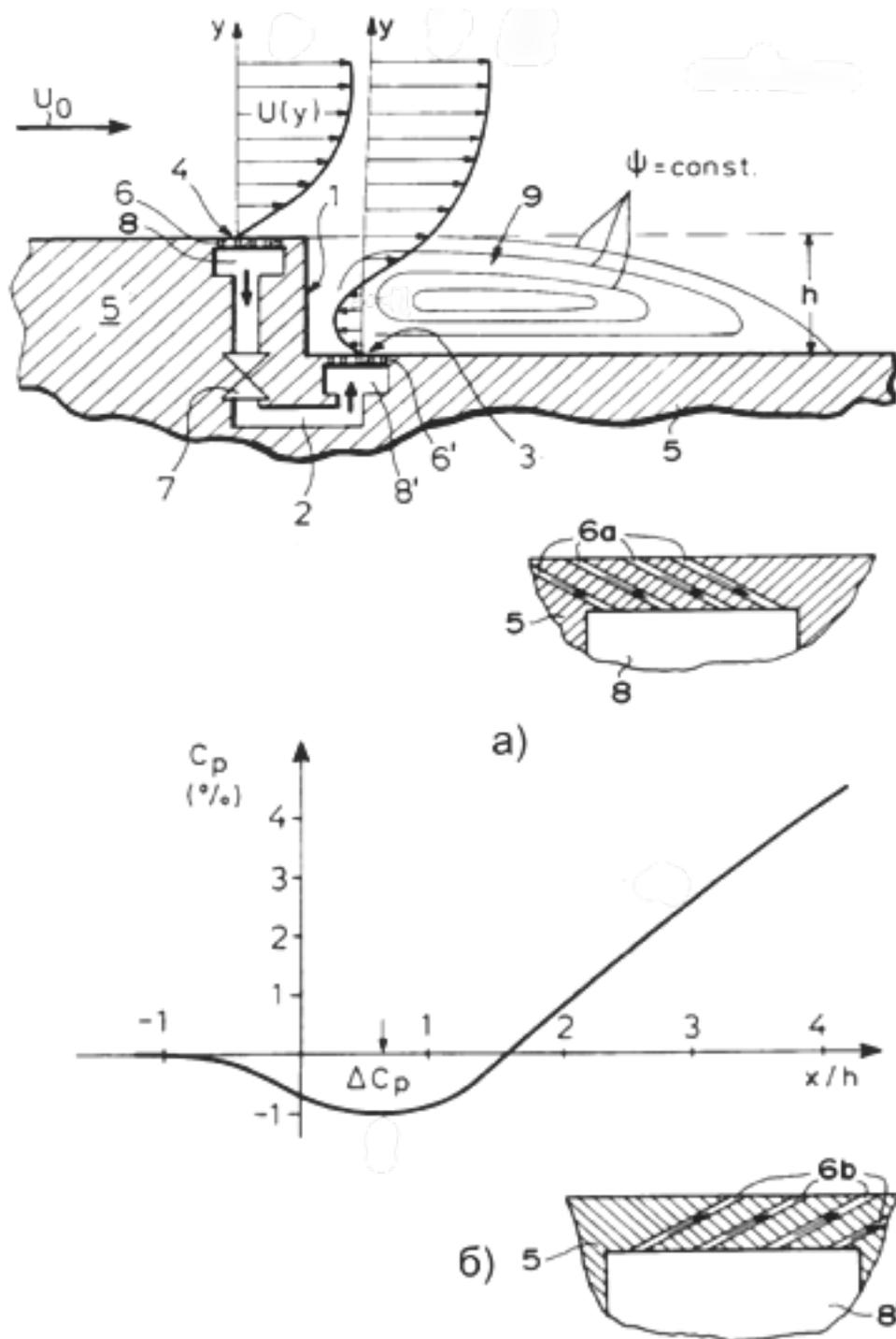


Рис.11. Управление расходными колебаниями.

1-донный срез, 2-канал поддува, 3-днище отсека вооружений, 4-дренажные отверстия в обшивке, 5-конструкция отсека, 6 (6а, 6b)-дренажные отверстия в донной области, 7-заслонка с обратным клапаном, 8-форкамеры, 9-циркуляционное течение.

Методы борьбы с расходными колебаниями требуют тщательного подбора геометрии отсеков. Существуют такие соотношения длины, ширины и глубины отсеков, что подавить

колебания невозможно. F-22 являет собой пример неудачного решения данной проблемы. Видимо, это объясняется тем, что его конструкция и геометрия были «заморожены» ещё во времена, когда теория ТВР не была завершена.

Примеры удачных конструктивных решений

Результаты расчётного и экспериментального изучения нестационарных донных течений [6,7] позволяют сделать некоторые выводы:

1. Для исключения образования бегущих ударных волн отсеки вооружений должны быть узкими и длинными (удлинение не менее 8).
2. Для минимизации воздействия крупных вихрей ширина отсека должна быть как можно меньше.
3. Для ослабления расходных колебаний глубина отсека должна быть небольшой и обязательно меньше его ширины (не менее, чем в 1.5 раза).
4. Поскольку течение в донной области полностью определяется углом натекания потока на стенку, и числом Маха в этой точке, а эти параметры для каждой скорости внешнего течения свои, то необходимо управлять углом отрыва слоя смешения от донной кромки отсека.

На рис.12 показано одно из возможных технических решений [8]. При открытии створок отсека выдвигается специальная рампа, отклоняющая слой смешения на заданный для данной скорости полёта угол. Это позволяет обеспечить более равномерное распределение давления внутри отсека, а также уменьшить момент пикирования, возникающий при прохождении боеприпаса через слой смешения.

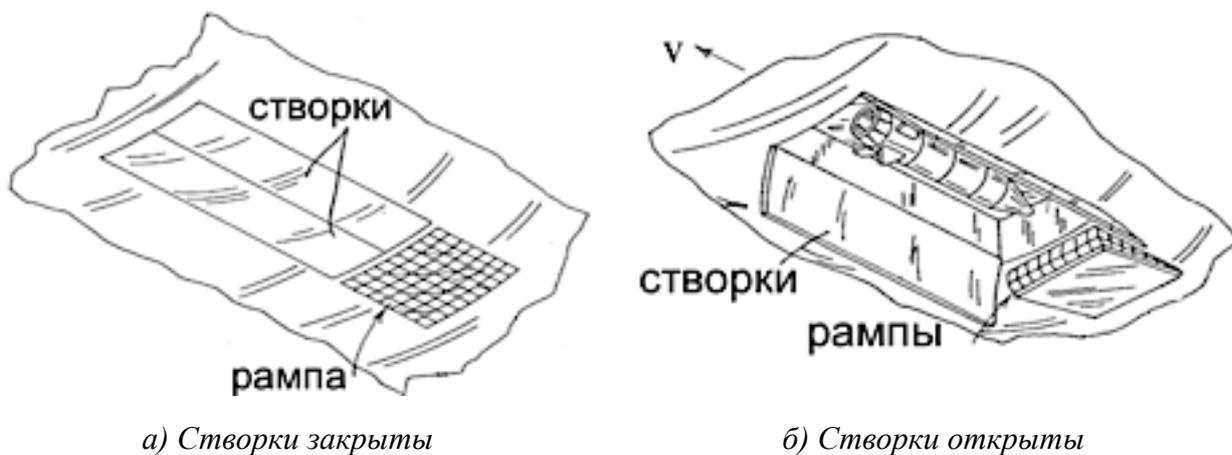


Рис.12. Управление слоем смешения у донной кромки отсека вооружений.

Аналогичного эффекта можно добиться, за счёт создания у донной кромки воздушной завесы с заданным для данной скорости полёта расходом воздуха [9]. Меняя расход, можно управлять углом схода слоя смешения с донной кромки. Такой метод имеет и дополнительное преимущество (рис.13). На графиках показано изменение продольного момента СРМВ по мере выхода боеприпаса из отсека в условия наличия (On) и отсутствия (Off) вдува. Видно, что вдув не только уменьшает балансировочный момент, но и делает его изменение более плавным. Данный метод весьма эффективен в области трансзвуковых скоростей потока, но по мере роста числа M , его эффективность снижается.

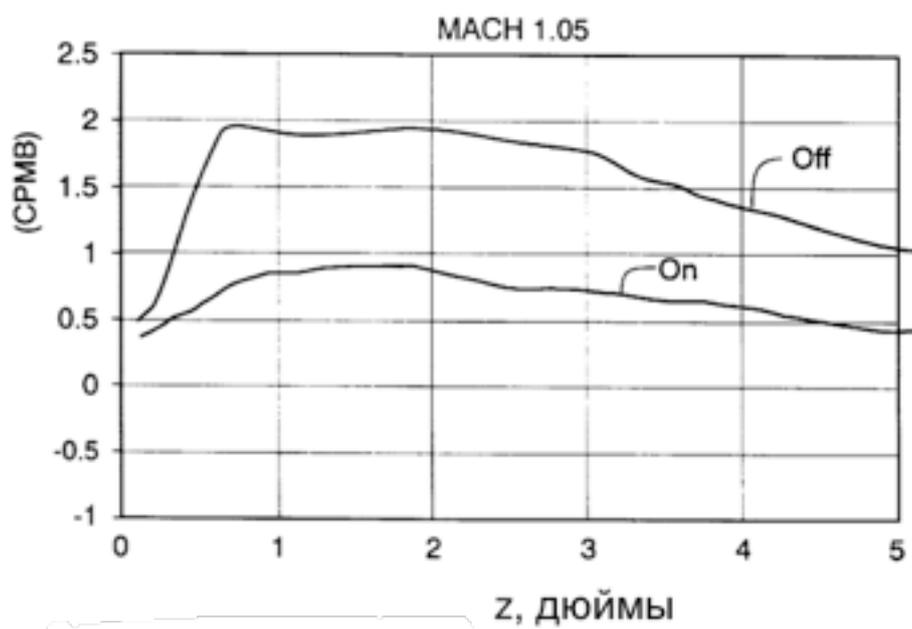
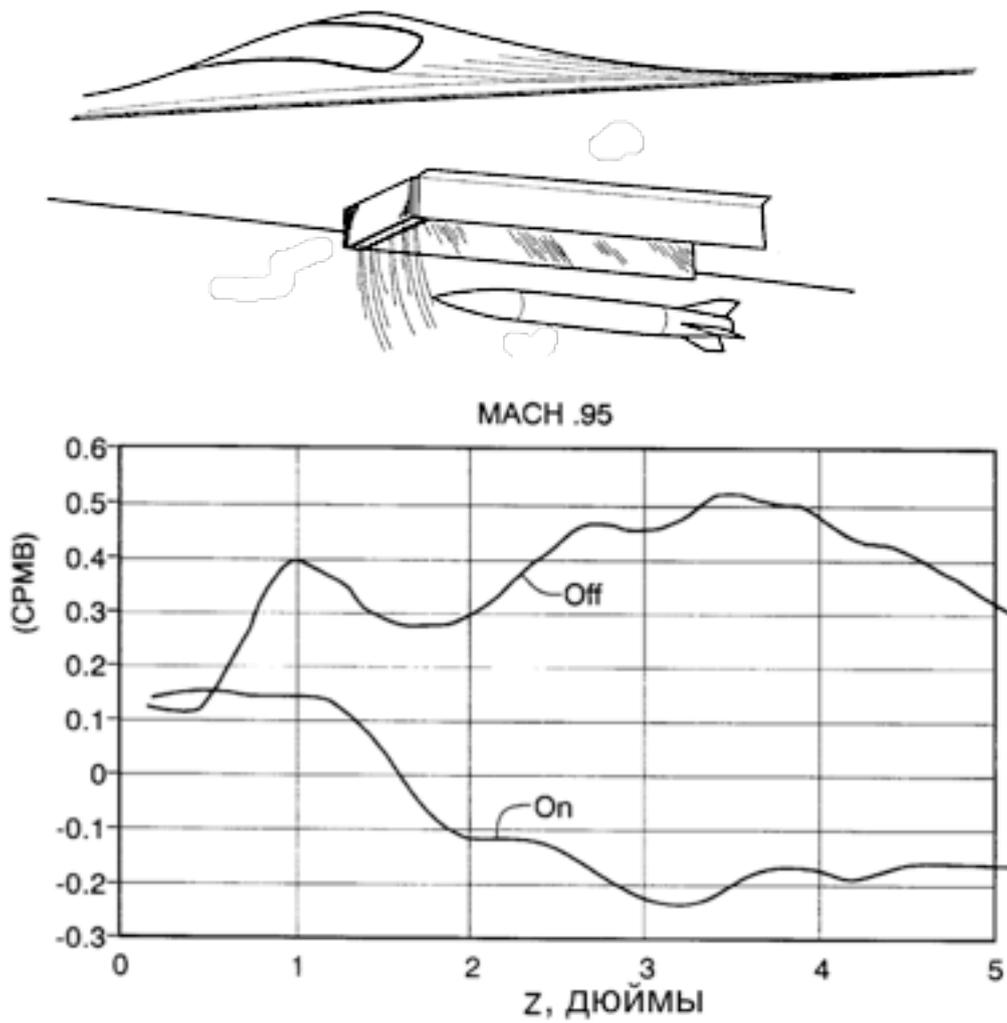


Рис.13. Управление течением в отсеке вооружения вдувом газа.

Перейдем теперь к рассмотрению примера удачной компоновки типового отсека вооружений, а также рациональных средств его механизации. На рис.14 показан типичный отсек вооружения, предназначенный для размещения на истребителе массой 25 т ракет «воздух-воздух» малой, средней, повышенной и большой дальности, а также бомб калибра 250 кг. Отсек размещается вблизи центра масс истребителя (рис.14а), он представляет собой три секции, каждая из которых имеет по две створки 1,2. Ракеты выдвигаются в поток при помощи трапеций 3. Отсеки имеют вертикальные стенки 4,5.

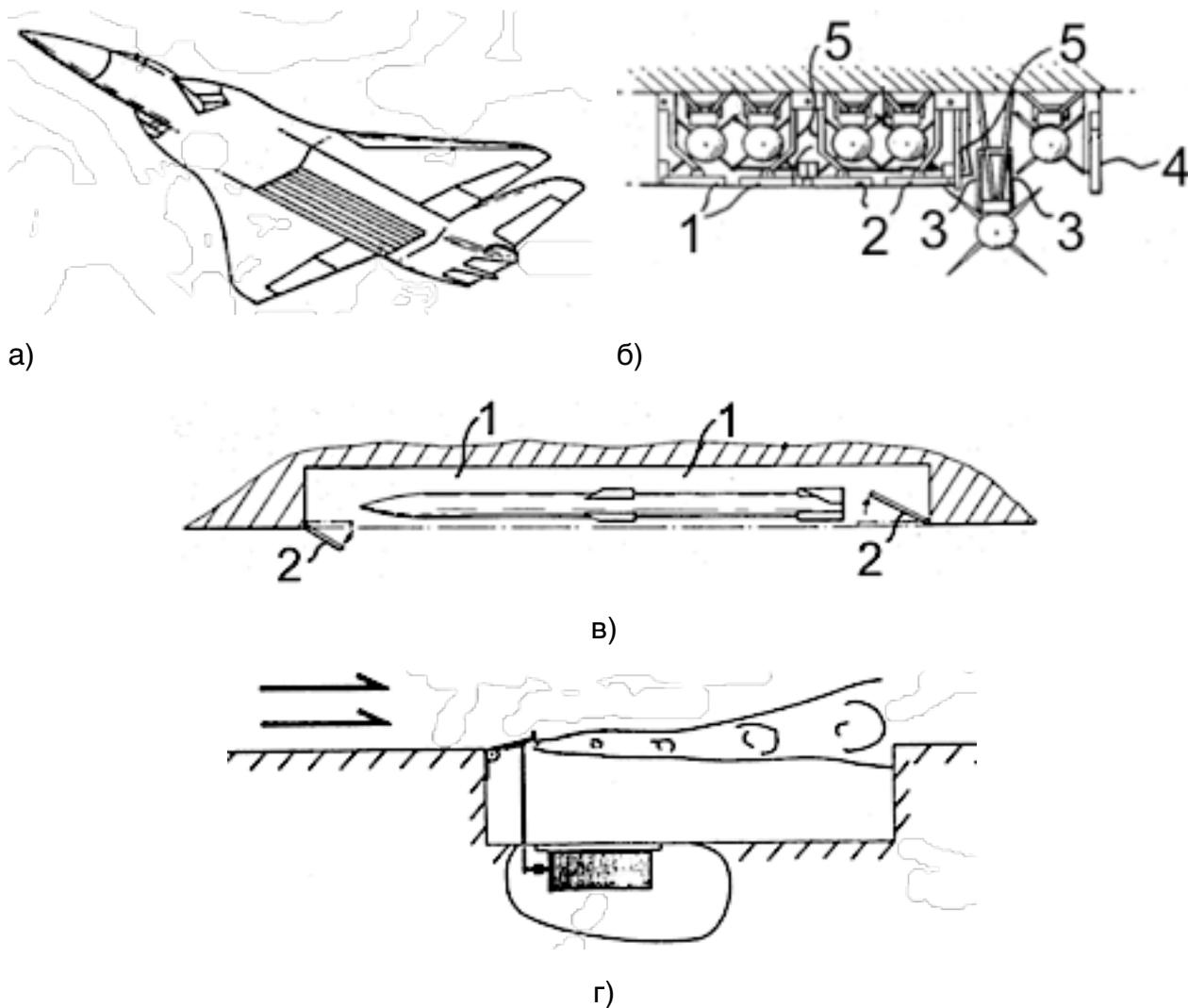
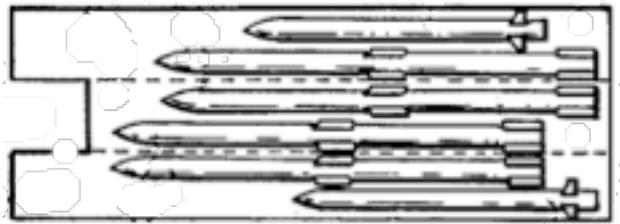
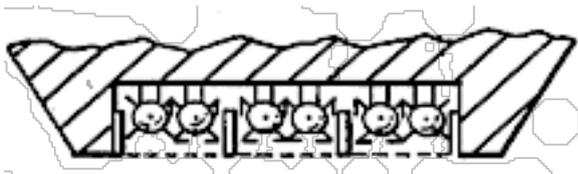


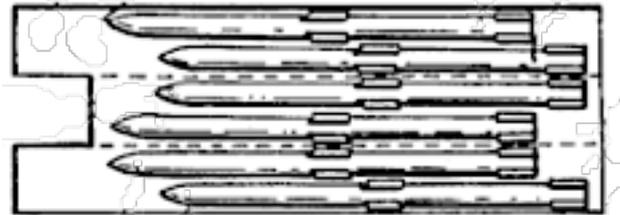
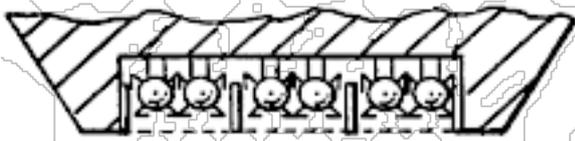
Рис.14. Рациональная компоновка отсека вооружений.

Оптимальное распределения давления в донной области отсека (1 на рис.14в) достигается с помощью створки 2 (рис.14в). Привод створки осуществляется с помощью программного устройства (рис.14г). Для исключения возможности возникновения бегущих ударных волн и уменьшения нагрузки на заднюю стенку, на ней также установлена подвижная створка (2 справа на рис.14в), которая отклоняется внутрь отсека.

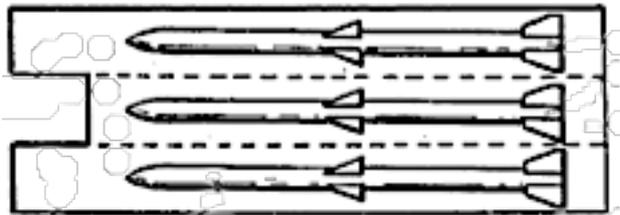
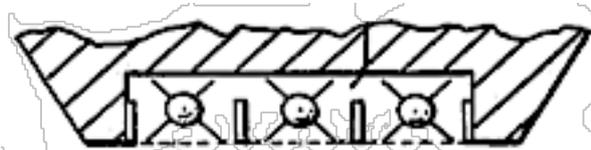
Разделение отсека вооружений на секции и оснащение каждой секции своей парой створок позволяют подвешивать вооружение как полностью внутри отсека, так и конформно (рис.15).



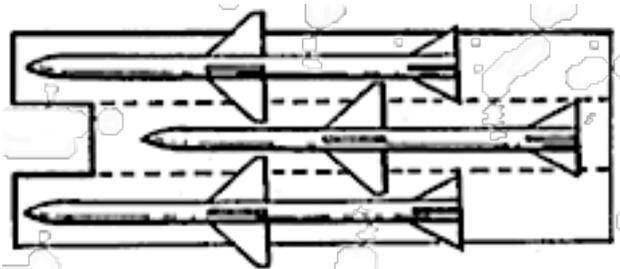
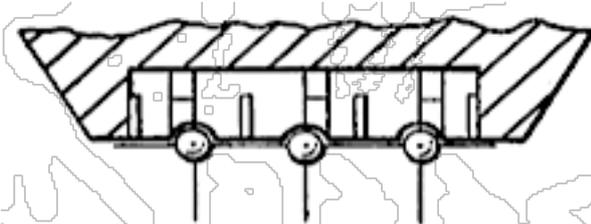
а) Миссия «воздух - воздух» с высокой вероятностью ближнего боя.



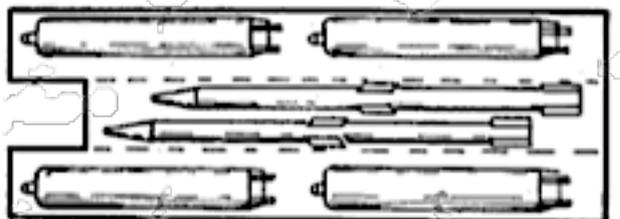
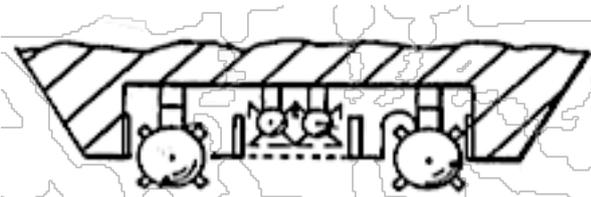
б) Миссия «воздух-воздух» с низкой вероятностью ближнего боя.



в) Миссия «перехват»



г) Миссия «дальний перехват»



е) Миссия «воздух-земля» по изоляции района боевых действий.

Рис.15. Варианты снаряжения типового отсека вооружений.

Организация больших отсеков вооружений ослабляет конструкцию планера, поэтому более рациональным на истребителе представляется использование узких индивидуальных отсеков (рис.16), расположенных по оси симметрии самолёта.

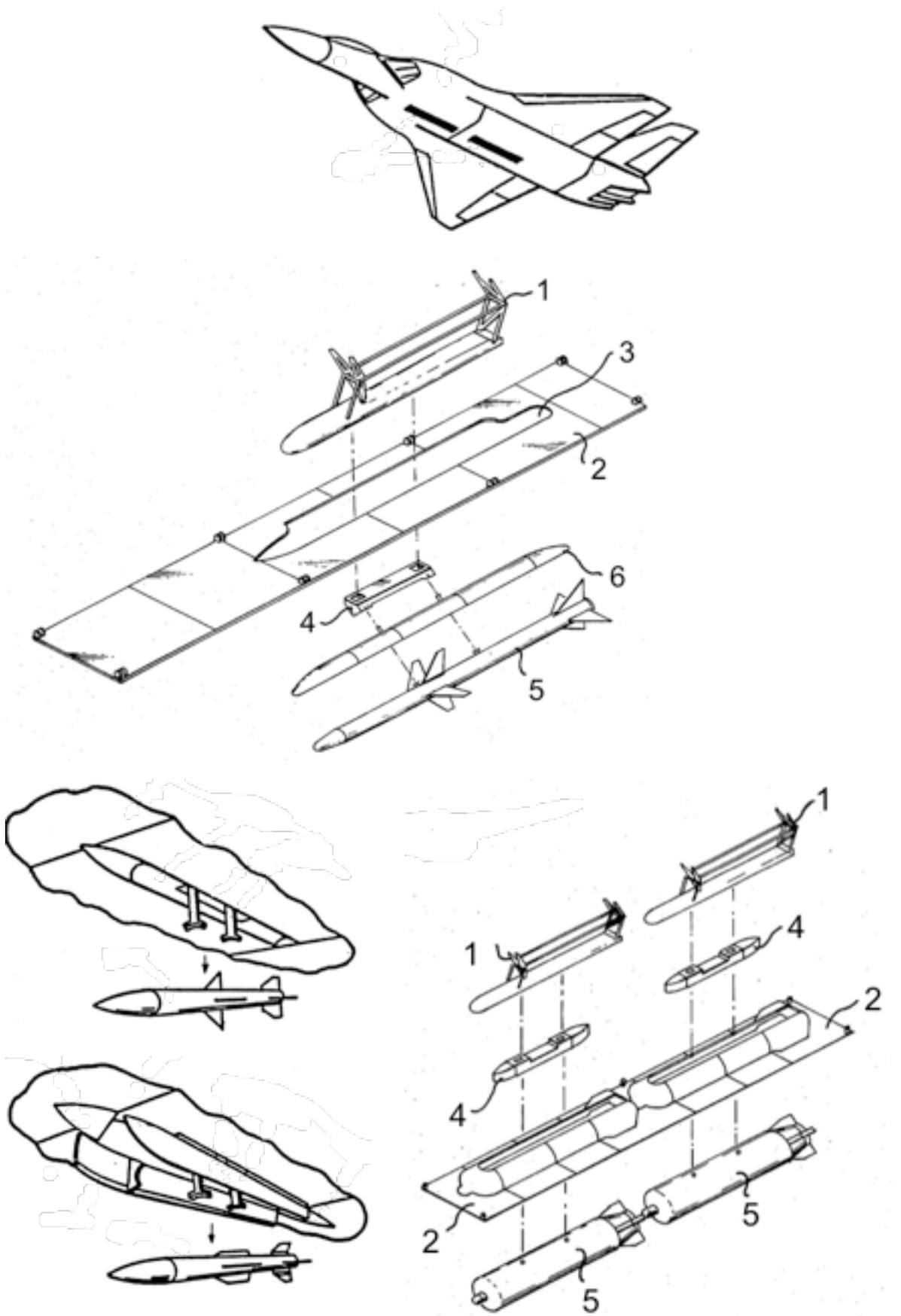


Рис.16. Индивидуальные отсеки и сменная механизация.

Удобным местом подвески ракет с точки зрения возможности их пуска на сверхзвуковой скорости являются воздухозаборники и нижняя поверхность наплыва крыла (рис.17).

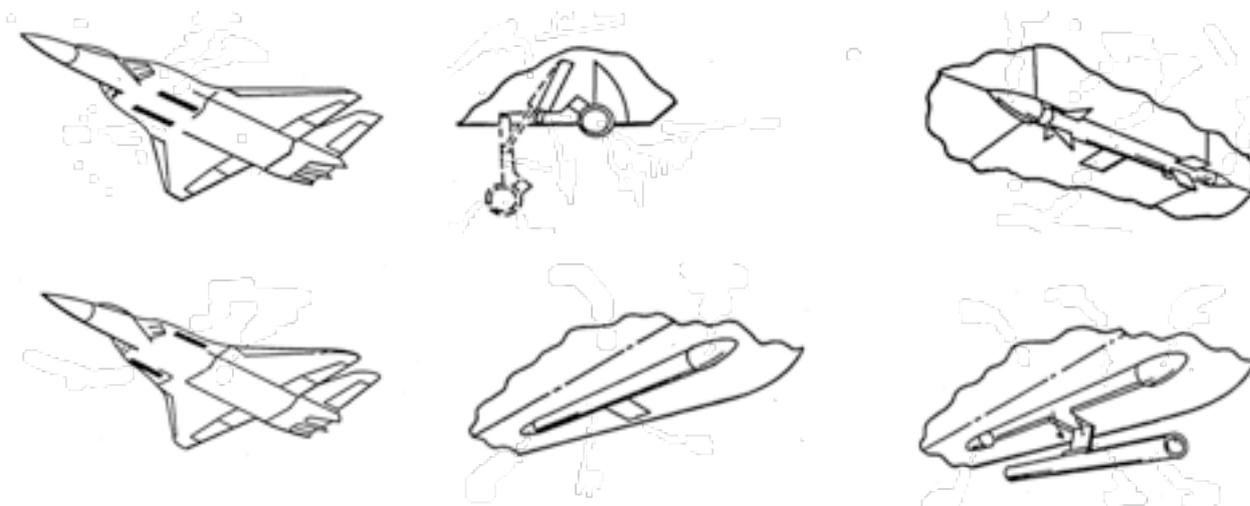


Рис.17. Механизация для подвески малогабаритных ракет «воздух-воздух» [10].

Очевидно, что в данном случае отсеки являются узко специализированными, предназначенными для подвески конкретных типов ракет. Более универсальное решение, использующее гибкую полимерную обшивку, показано на рис.18.

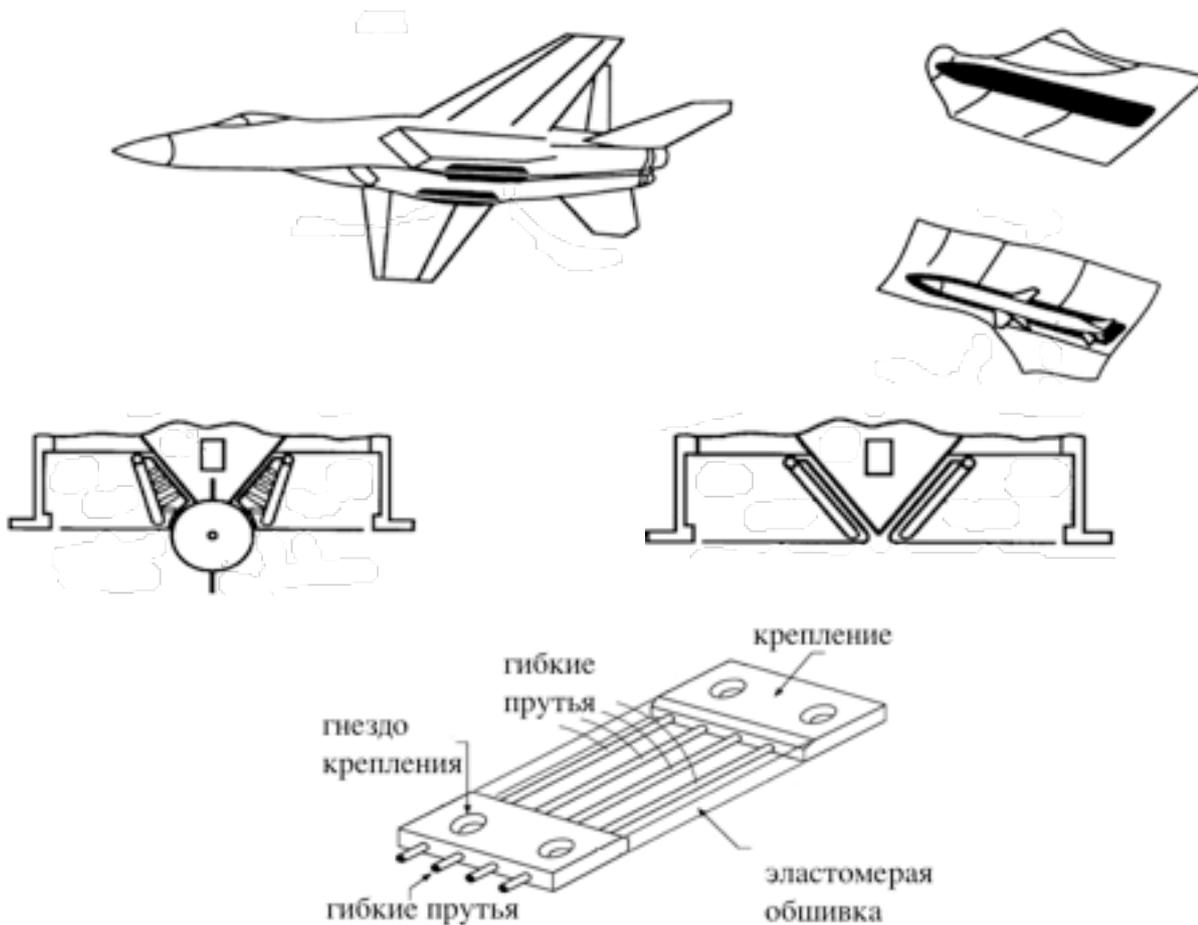


Рис.18. Гибкие створки отсека для полутепленной подвески боеприпасов [11].

Часто имеется потребность в подвеске крупных боеприпасов. Требования сверхзвуковой крейсерской скорости полёта и малозаметности диктуют, чтобы боеприпасы целиком размещались внутри отсека вооружений. Для этого нужна особая механизация створок [12], показанная на рис.19.

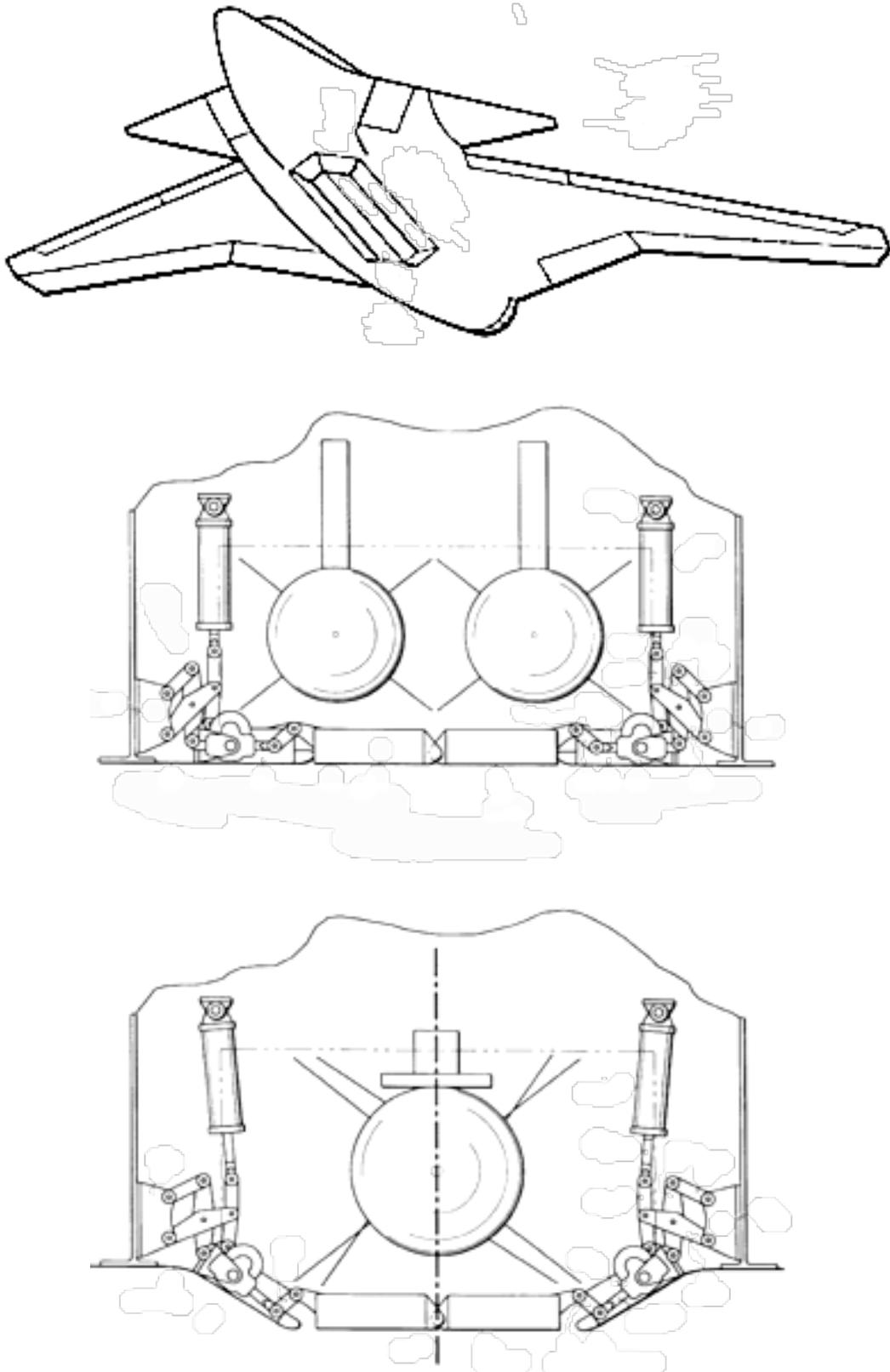


Рис.19. Створки отсека, обеспечивающие «гибкую» подвеску боеприпасов.

«Гибкая» конструкция створок может быть применена и в типовом трёхсекционном отсеке вооружений, показанном на рис.14.

Современная тенденция применения малозаметных истребителей-перехватчиков с большой высотой вызвала исследования по размещению полезной нагрузки и дополнительных топливных баков на «спине» самолёта (рис.20). Часть фюзеляжа за кабиной лётчика меньше всего видна наземным РЛС, а её влияние на аэродинамику минимально.

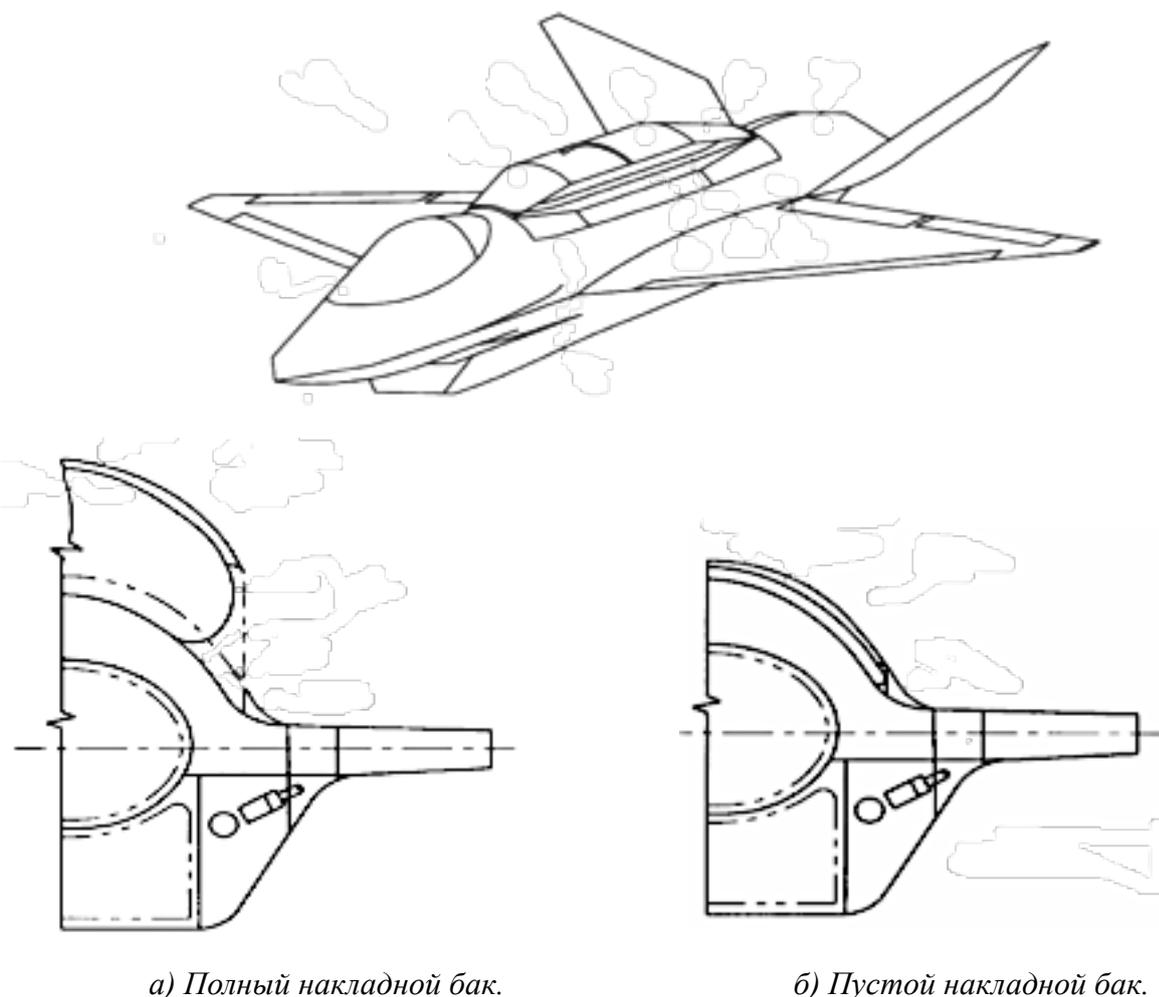


Рис.20. Размещение складного накладного бака на спине истребителя.

Здесь могут располагаться и отсеки с вооружением (рис.21). Пониженное давление на верхней поверхности фюзеляжа упрощает отделение боеприпаса, особенно привлекательным является размещение бомбовых кассет (рис.21в). Правда, это требует разработки новых алгоритмов их применения и новых аэродинамических форм.

Идеи трансформируемости конструкции вообще характерны для разработок самолётов новых поколений. Их высокая стоимость и широкий спектр тактических требований, вынуждают искать нестандартные решения. Так задача сверхдальнего перехвата на сверхзвуковой скорости привела к оригинальному решению со складывающимся внутренним топливным баком [13]. После выработки топлива, подвесной бак складывается (рис.22б) и за поворотными створками, к которым подвешено вооружение, появляется свободное место, куда и убираются боеприпасы. При небольшом калибре вооружения такое решение представляется рациональным, если радиус перехвата превышает 1000 км.

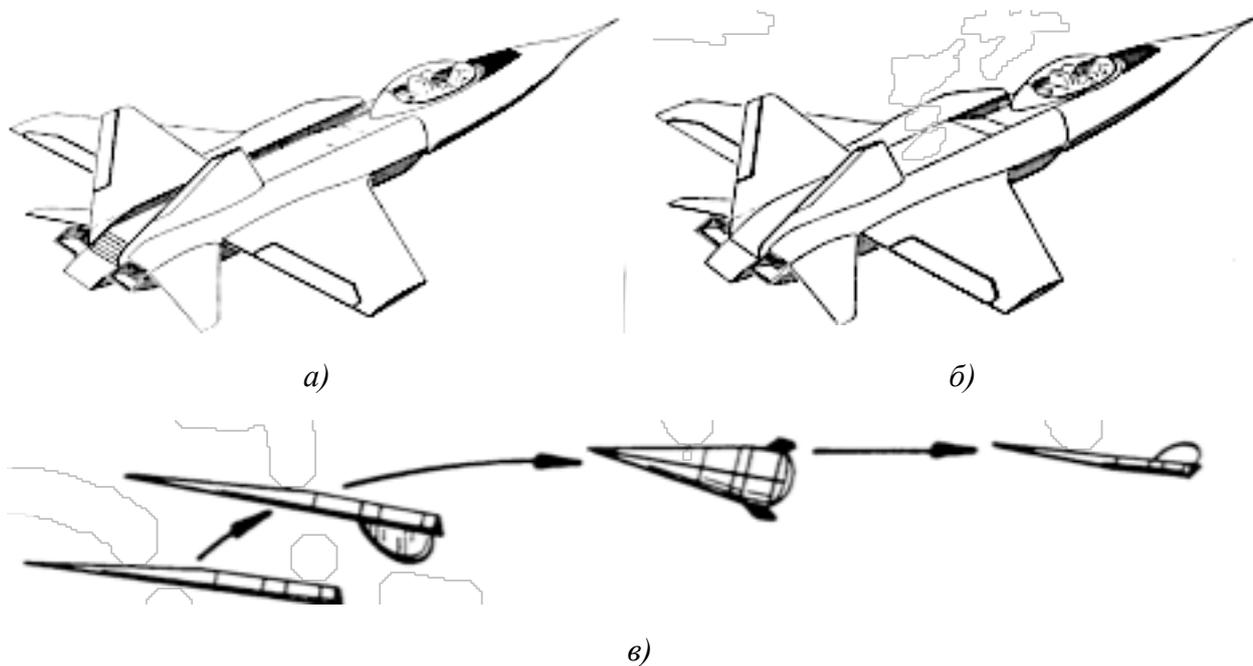
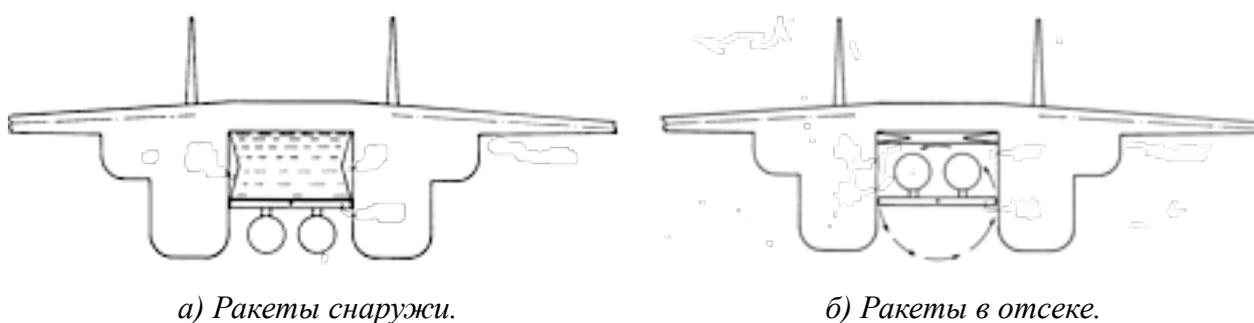


Рис. 21. Размещение накладного отсека вооружений на спине истребителя.



а) Ракеты снаружи.

б) Ракеты в отсеке.

Рис.22. Складывающийся топливный бак - отсек.

Складывание отсека производится путём отсоса газа из бака (рис.23).

Требование малой заметности, а также простоты применения вооружения на сверхзвуковой скорости, вызывает повышенное внимание к пуску боеприпасов не вперед, а назад (рис.24). Ракета или бомба сначала отстаёт от самолёта, а затем выходит на заданную траекторию. Отсутствие отверстий, смотрящих вперёд, а также взаимодействие боеприпаса с фронтом ударной волны на большом удалении от носителя, упрощают решение многих технических задач. Конечно, чтобы такой старт стал возможным, требуются боеприпасы с нетрадиционными аэродинамическими поверхностями и алгоритмами наведения.

Для внутреннего размещения ракет и бомб вообще нужны новые формы, в частности, складывающиеся рули и крылья (рис. 25,26).

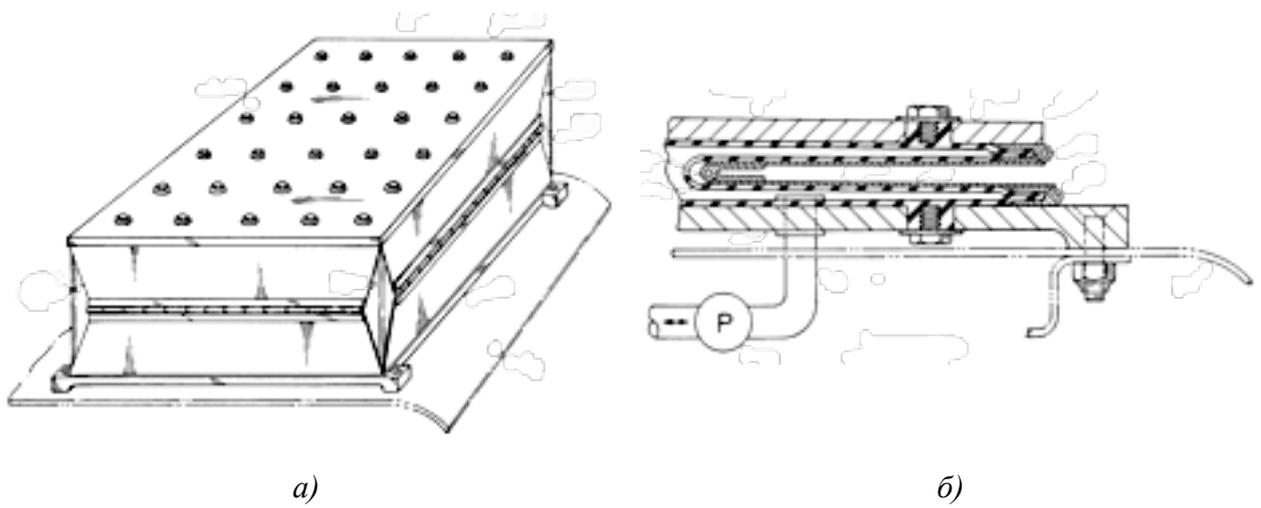
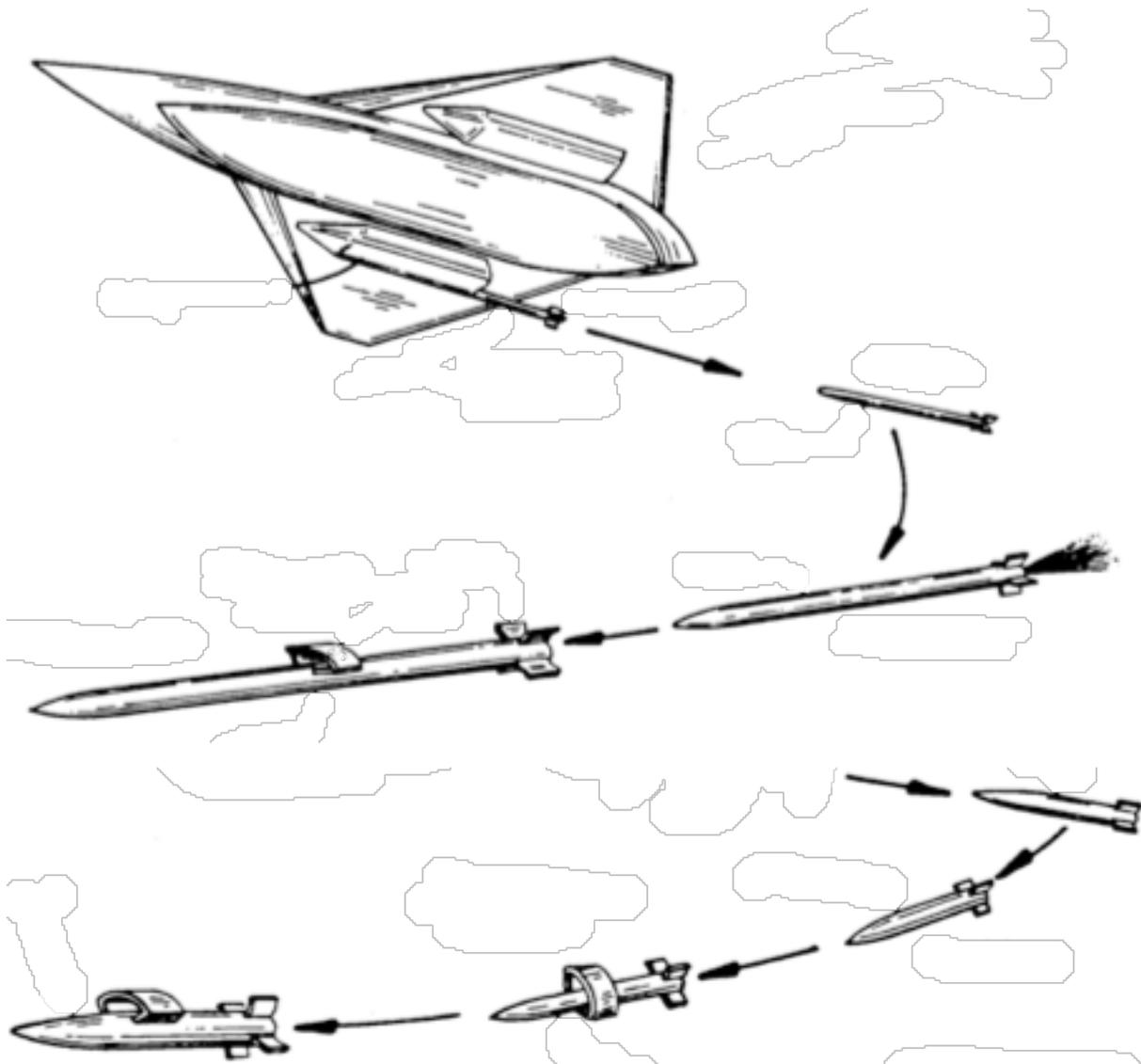


Рис. 23. Конструкция складывающегося топливного бака [13].



Решётчатые рули из-за повышенных шарнирных моментов и высокой заметности в радиолокационном диапазоне больше не пользуются популярностью.

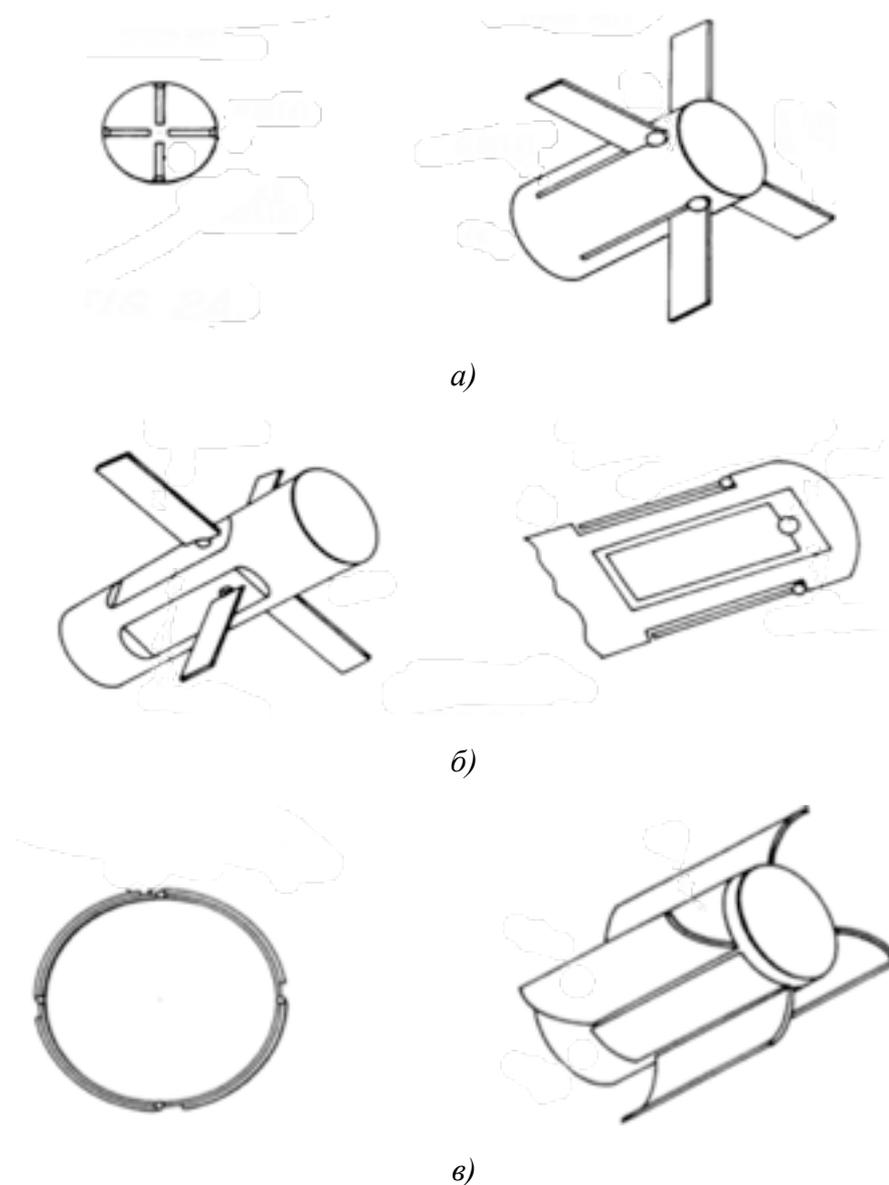


Рис.25. Складывающееся хвостовое оперение.

Конструкция, показанная на рис.25а, предусматривает уборку оперения внутрь корпуса, что возможно, например, при размещении рулей на агрегатном отсеке. На рис.25б изображены управляемые аэродинамические поверхности, которые укладываются в ниши на корпусе. Данное решение представляется более рациональным. Ниши могут иметь уложенную на днище гибкую обшивку, которая после раскрытия крыльев, принимает форму обечайки корпуса (рис.26).

Самой же простой конструкцией обладают неуправляемые сегментные стабилизаторы (рис.25в).

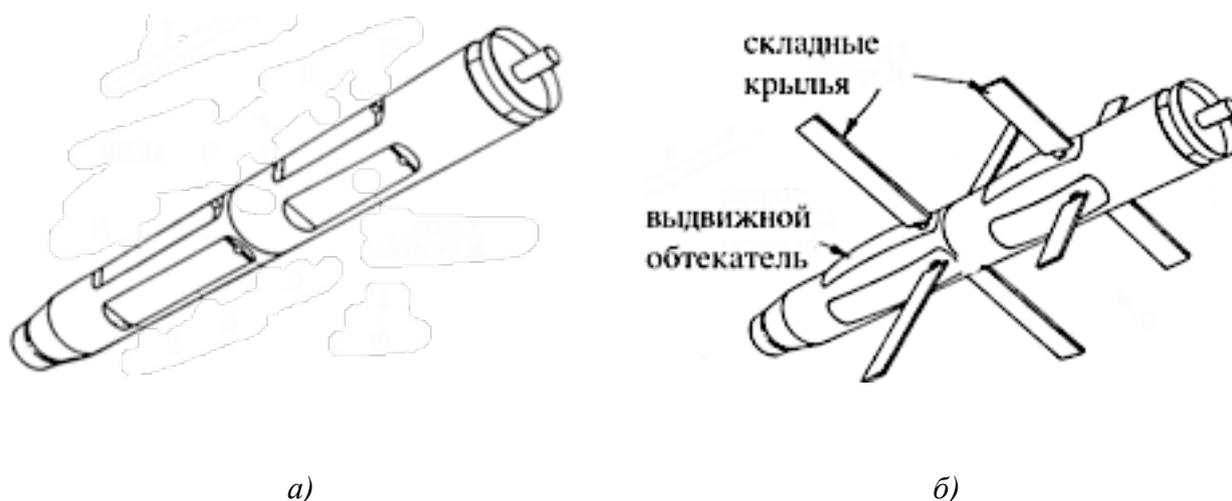


Рис.26. Раскрывающиеся аэродинамические поверхности, укладываемые в ниши с гибкой обшивкой, принимающей форму корпуса.

Выводы

Мы не рассмотрели некоторые интересные технические идеи, которые не получили дальнейшего развития. Это конформная подвеска ракет с некруглым сечением корпуса, магазинная укладка боеприпасов, заклеивание отсеков специальной клейкой лентой.

Использование разработанных методов изучения отрывных течений позволяет спроектировать отсеки вооружений, из которых можно запускать ракеты при любой скорости потока. Для этого нужно выдержать определенные соотношения геометрических размеров отсека и использовать механизацию донной кромки. Выводы могут показаться неочевидными, поэтому в приложении [14] кратко изложена полная теория течений с внезапным расширением.

Вместо заключения

Данной статьёй мы завершаем цикл публикаций, в котором рассмотрены все основные тенденции развития современных истребителей, кроме бортового оборудования и авионики (в этой области автор не является специалистом). Внимательно прочитав статьи, можно представить, каким мог бы быть перспективный комплекс 5-ого или 6-ого поколения. Форма носовой части фюзеляжа, крыло, наплывы, органы управления, балансировочная схема, воздухозаборники, двигатели, отсеки вооружений - их параметры должны находиться в довольно узких диапазонах, знание которых определяет успех создания столь сложного боевого комплекса, как истребитель.

Литература

1. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Механизмы нестационарных процессов в канале с внезапным расширением. Тезисы докладов XV Всесоюзного семинара по газовым струям, 25-27 сент. 1990 г./ ЛМИ, 1990. – с. 21.

2. Scott T. Bjorge, Air Force Institute of Technology † Mark F. Reeder, Air Force Institute of Technology * C. Subramanian, Florida Institute of Technology # Jim Crafton, Innovative Scientific Solutions Inc. FLOW AROUND AN OBJECT PROJECTED FROM A CAVITY INTO A SUPERSONIC FREESTREAM. AIAA 2004-1253. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit 5 - 8 January 2004, Reno, Nevada, 12 p.

3. Алексеев П.А., Альбазаров Б.Ш., Булат П.В., Горшков Г.Ф., Засухин О.Н., Савин А.В., Соколов. Е.И., Усков В. Н., Фаворский В.С. Физические и математические модели нестационарных и гистерезисных явлений в струйных течениях газа. Отчет по НИР, БГТУ им. Устинова, 1993, 180 с.
4. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Газодинамика и акустика сверхзвуковых струй, истекающих в канал с внезапным расширением. // Современные проблемы неравновесной газодинамики. БГТУ. 2002 г., с.136-158.
5. Method for stabilizing laminar separated boundary layers. Werner Lurz. Messerschmitt-Boelkow-Blohm. US Patent 4,664,345. May 12,1987.
6. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. О причине возникновения и механизме поддержания расходных колебаний при истечении сверхзвуковой струи в канал с внезапным расширением. // Тезисы докладов Международного симпозиума по отрывным течениям и струям (IUTAM), Новосибирск, июль 1990.
7. Булат П.В., Засухин О.Н., Усков В.Н. Полная классификация режимов течения с внезапным расширением с учетом нестационарных и переходных процессов. // Прикладные проблемы механики жидкости и газа: Материалы IX международной конференции ученых Украины, России, Белоруссии, 25-29 сент. 2000 г.- Севастополь: Изд-во СевГТУ, 2000. – С.96
8. Adaptive deployable ramp for suppression of aircraft weapons bay acoustic loads. Charles Wesley Burdsall. Northrop Grumman Corporations. US Patent 6,098,926. Aug.8,2000.
9. Method and apparatus for actively enhancing aircraft weapon separation. Michael J. Stanek, Rodney L.Clark. US Patent 6,206,326. Mar.27,2001.
10. Method of providing rapid conversion of an aircraft weapon carriage. Richard Hardy, Frank D.Neumann. The Boeing Company, US Patent 4,802,641, Feb.7,1989.
11. Conformable weapons platform. Robert Henry Wille. McDonnell Douglas. US Patent 5,988,567. Nov.23,1999.
12. Expandable aircraft section. Jams R.Ellis, Joseph B.Diller. Northrop Grumman Corporation. US Patent 5,803,405, Sep.8, 1998.
13. Aircraft collapsible fuel tank. Barhans J. Grumman Aerospace Corporation. 4,214,721. Jul.29, 1980.
14. П.В.Булат, О.Н.Засухин. Теория течений с внезапным расширением. ВОЕНМЕХ. 33 с.