

## РАЗВИТИЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ПОДХОДА К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ СИЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ САМОЛЕТА

Краткое изложение сути рассматриваемого вопроса дано в работе /1/. Альтернативность подхода заключена в двух обстоятельствах: необходимости построения встречных методов анализа проблемы устойчивости с целью получения двусторонних (снизу и сверху) оценок критических параметров действующих нагрузок и возможности представления конструктивно-силовой схемы в виде композиции отдельных фрагментов, взаимодействующих по общим границам непосредственно или посредством промежуточных упругих звеньев (связей, опор и т. п.).

1. Разработка встречных методов применительно к задачам устойчивости наталкивается на трудности теоретического характера, обусловленные, во-первых, отсутствием экстремального вариационного принципа типа принципа виртуальной дополнительной работы применительно к задачам устойчивости и, во-вторых, наличием несамосопряженных возмущений в подчиненном операторе задачи. Если удастся показать малость норм возмущений, то нижние оценки с достаточной для целей практики точностью могут быть получены итерационным методом постоянных Шварца. Однако более привлекательными являются методы, носящие всеобщий характер. Это - формулировка краевой задачи в терминах функций напряжений и получение встречного вариационного принципа (типа Кастильяно). Последнее более предпочтительнее.

Пример краевой задачи встречного метода приведен в работе /1/. Он носит достаточно частный характер, так как исходное поле напряжений предполагалось однородным, а свободный от опор край не должен быть нагруженным в исходном состоянии. Если исходное состояние неоднородно, то метод неприменим, поскольку дифференциальные операторы с переменными коэффициентами не коммутируют. Что же касается вариационного принципа Кастильяно, то он, как известно, неприменим к геометрически нелинейным задачам, поскольку соотношения "деформации - перемещения" и "вариации деформаций - вариации перемещений" в геометрически нелинейных теориях не обладают свойством взаимного подобия. Обращение к общему вариационному

принципу Ху - Васидзу не решает проблемы, так как этот принцип не является экстремальным.

Попытки построения вариационного принципа типа Кастильяно с привлечением несимметричного тензора напряжений Пиоли не увенчались успехом, поскольку на завершающем этапе не удается исключить из рассмотрения тензор-градиент перемещений. Это во-первых. И во-вторых, если мысленно представить возможность такого преобразования, то проблема все равно сохраняется, поскольку при вычислении ковариантных производных нужно прибегнуть к символам Кристоффеля, которые должны быть определены для деформированного состояния, а составляющие вектора "возмущенных" нагрузок необходимо относить к базису, связанному с системой координат, претерпевающей деформации вместе с упругим телом. Трудности сохраняются, хотя и в завуалированном виде.

Таким образом, проблема построения встречного вариационного принципа применительно к задачам устойчивости остается пока открытой, а задача получения нижних оценок должна решаться в каждом конкретном случае отдельно. Иными словами: существует фундаментальная теоретическая проблема.

2. В самолетостроении до сих пор принято задачу исследования общего напряженно-деформированного состояния (НДС) отделять от задачи упругой устойчивости, что при детальном анализе проблемы вряд ли может выдержать критику. Дело здесь заключается не столько в том, что для полного решения проблемы необходимо изначально опираться на геометрически нелинейные теории (хотя в этом случае задача может оказаться вообще "неподъемной"), а в том, чтобы согласовать точность определения исходного НДС с той минимальной точностью, которую необходимо обеспечить для корректной постановки задачи устойчивости.

Не разумно, по видимому, утверждать, что исходное НДС на может быть безмоментным хотя бы потому, что продольно-поперечный силовой набор, например, имеет всегда эксцентриситеты, на самом деле исходное НДС преимущественно безмоментное (необходимость оценки влияния моментности исходного НДС не должно выпадать из поля зрения), но совершенно справедливо ставить под сомнение постулирование однородности исходного поля.

Точно так же трудно согласиться с заменой реальных условий упругого взаимодействия подконструкций или элементов на стандартные (свободного опирания, заделки и т.д.). Здесь совершенно нео-

необходимо вскрыть не только качественную сторону отмеченных условий, но и обоснованно определить то количество, которое определяет меру взаимодействия, что сводится к решению задачи определения податливостей границ, искусственно введенных при декомпозиции конструкции. Частично эта задача может быть решена при определении исходного НДС. Для определения же изгибной податливости граничного контура необходимы постановка, качественное исследование и решение промежуточных краевых задач, что явилось одним из направлений проводимых исследований. Особое внимание здесь обращалось на исследование гладкости решений вплоть до границы и получение условий согласования граничных данных, обеспечивающих требуемую гладкость решения. Решение промежуточных краевых задач позволяет корректно ставить задачи устойчивости для фрагментов конструкции.

3. Реализация развиваемого подхода требует разработки адекватных математических моделей для определения исходного НДС (эта задача имеет самостоятельное значение, являясь основой для проведения расчетов на прочность). Поиск здесь проводился в различных направлениях. За отправную точку было принято то обстоятельство, что при определении НДС необходимо иметь в распоряжении набор математических моделей различной строгости, каждая из которых имеет свою область применения и потому способна с потребной точностью отразить особенности конструктивно-силовой схемы и действующих нагрузок и, кроме того, давала возможность асимптотического выхода на границах агрегатов на модель следующего уровня; зона действия модели при этом не устанавливается априори, а определяется одновременно с решением задачи.

Применительно к силовой схеме крыла установлено, что для определения исходного общего НДС можно ограничиться четырьмя асимптотически срачиваемыми моделями: концевая часть крыла представляема тонкостенным стержнем, средняя часть — слабokonической безмоментной оболочкой, подкрепленной дискретной системой нервюр конечной жесткости, корневая зона — скошенной конической оболочкой или системой таких оболочек, подфюзеляжная часть — цилиндрической оболочкой. Для определения же локального НДС, обусловленного сосредоточенными воздействиями, привлекаются методы теории упругости, позволяющие учесть на аналитическом уровне наличие дискретных связей и различного рода нерегулярностей. Анализ оболочечных моделей осуществляется двумя методами: дискретно-континуальным методом В.З. Власова и методом конечных элементов, который на данном этапе рас-

считается как критериальный. Метод В.Э.Власова распространен нами на анизотропные материалы и системы, состоящие из скошенных оболочек.

4. Чтобы иметь возможность оценить точность математических моделей, опирающихся на геометрически линейные теории, необходима разработка геометрически нелинейных критериальных теорий. Это во-первых. Во-вторых, декомпозиция силовой схемы предполагает определение нагрузок на границах фрагментов, что в ряде случаев может быть осуществлено лишь с привлечением геометрически нелинейных теорий (это имеет место, например, при определении нагрузок на поперечный набор). Термин "критериальная теория" употребляется в том смысле, что замкнутая система уравнений этой теории получается из общих нелинейных соотношений механики деформируемого твердого тела и потому допускает вывод менее общих нелинейных теорий, точность которых может быть оценена конструктивно путем вычисления невязок в соотношениях общей теории.

Такая критериальная теория нами построена применительно к модели прямого бруса. Из нее в частности следуют уравнения эйлеровой эластики, теории квадратичного приближения, а так же линейной теории. В стадии разработки находятся критериальные теории пластин и оболочек.

5. При постановке и решении непосредственно задач устойчивости элементов и агрегатов возникают две проблемы.

Первая из них связана с наличием эффекта слежения. В математическом плане дело здесь сводится к тому, что подчиненный оператор задачи становится несамосопряженным. Возникает проблема динамического рассмотрения. Но можно указать класс задач, к которым применим статический подход и при действии следящих сил. Проблема заключается в разработке соответствующего критерия.

Вторая проблема состоит в выборе и обосновании численного метода анализа задачи на собственные значения (если она имеет место). Вопрос этот не простой поскольку формы потери устойчивости весьма разнообразны и сложны. Применение дискретных методов может привести к необоснованному увеличению порядка матриц. Поэтому представляется важным разработка регулярных процедур выбора главных составляющих решения. Это еще одно направление исследований.

## ВЫВОДЫ

1. Сформулирована фундаментальная проблема : разработка встречного экстремального вариационного принципа применительно к задачам устойчивости, позволяющего получать нижние границы критических нагрузок.
2. Развита метод постоянных Шварца для обобщенной задачи на собственные значения, подчиненный оператор которой является несамосопряженным.
3. Продолжено исследование промежуточных краевых задач и получены условия согласования граничных данных, обеспечивающие требуемую гладкость решения вплоть до границ.
4. Разработаны математические модели для определения исходного общего и локального НДС крыла.
5. Развита дискретно-континуальный метод В.З.Власова на системы, состоящие из дискретно подкрепленных скошенных конических оболочек с учетом анизотропии свойств материала.
6. Показана необходимость в разработке геометрически нелинейных критериальных теорий, с помощью которых можно конструктивно оценить точность других теорий, как нелинейных, так и линейных.
7. Продолжены исследования, целью которых является получение критерия, позволяющего установить необходимость динамического рассмотрения задач устойчивости при наличии эффекта слежения.
8. Выполнены исследования по разработке регулярной процедуры выбора главных составляющих решения в задачах устойчивости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Халилов С.А. Проблема исследования устойчивости несущей конструкции большогогрузных самолетов. //Авиационно-космическая техника и технология//. Труды ХАИ, Харьков, 1993, с.358...369.