

# РАСЧЕТ КУЗОВОВ ВАГОНОВ НА ОСНОВЕ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СХЕМ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В. В. КОБИЩАНОВ\*

Кафедра Механики Будапештского Технического Университета  
Институт транспортного машиностроения, г. Брянск

Поступила 3 декабря 1974. г.

Представлена: Проф. д-р П. Михельбергер

Проблема расчёта кузовов цельнометаллических вагонов является одной из сложнейших в строительной механике. Как правило современные несущие конструкции кузовов вагонов представляют собой подкреплённые тонкостенные системы в виде оболочек с большими прямоугольными вырезами.

В настоящее время, благодаря работам проф. Е. Н. Никольского, создана общая теория расчёта кузовов вагонов. Она базируется на общих методах теории упругости, разработанных Е. Н. Никольским — методе чередования основных систем и обобщенном методе сил [1], и позволяет с позиций теории упругости исследовать напряжённое и деформированное состояние кузова как оболочки.

Вместе с тем, при выполнении практических расчётов кузовов вагонов широкое применение находят стержневые расчётные схемы, основанные на гипотезе плоских сечений, а также схемы, представляющие собой комбинацию стержней и пластинок с заданными законами распределения напряжений [2, 3]. Такие схемы, обладая сравнительной простотой, позволяют с удовлетворительной точностью определять интегральные характеристики внутренних усилий в сечениях элементов кузова и в ряде случаев дают верную усреднённую картину напряжённого состояния по сечениям кузова.

По своей структуре эти схемы можно отнести к расчётным схемам метода конечных элементов, получившего развитие в работах Дж. Аргироза, и рассматривать как своеобразные специализированные схемы метода конечных элементов. Особенностью специализированных расчётных схем метода конечных элементов для кузовов вагонов является их принадлежность к определённому объекту расчёта, а также неодинаковость структуры для различных участков несущей конструкции (в зависимости от задачи расчёта).

Поясним изложенное на примере построения расчётной схемы для кузова крытого грузового вагона, в котором тонкая подкреплённая обшивка крыши, боковых стен и рамы образует замкнутую цилиндрическую оболочку. Оболочка ослаблена в средней части большими прямоугольными дверными вы-

\* Настоящая работа содержит результаты 6-месячных теоретических исследований, проведенных автором на Кафедре механики БТУ.

резами. Рама кузова состоит из средней (хребтовой) и продольных боковых балок, связанных между собой поперечными балками. Обшивка рамы имеет продольную гофрировку. Схема кузова показана на рис. 1 Будем считать, что конструкция симметрична относительно вертикальной продольной плоскости  $xoz$  и средней поперечной плоскости ( $z = L$ ).

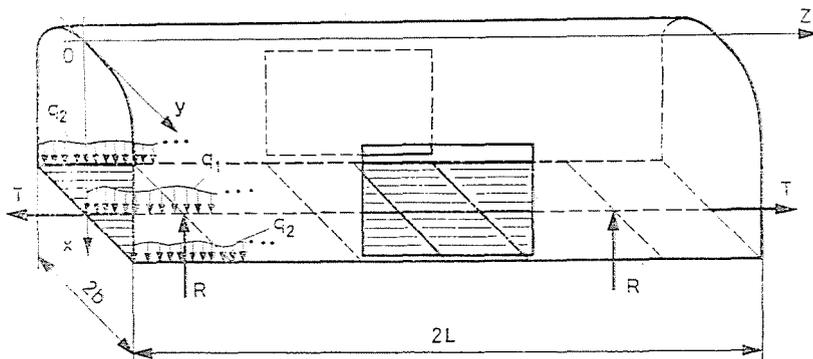


Рис. 1

Нагрузки, действующие на кузов, включают в себя вертикальные и продольные силы. Вертикальная нагрузка состоит из веса полезного груза и собственного веса конструкции, которые распределяются по хребтовой ( $q_1$ ) и боковым балкам ( $q_2$ ) рамы и уравниваются реакциями пятников ( $R$ ). Продольные силы  $T$  приложены по осям автосцепок.\*

Если внешние нагрузки симметричны относительно вертикальной продольной плоскости  $xoz$ , то для рассматриваемого кузова удобно принять пространственную расчётную схему рис. 2. В этой схеме боковая стена с полукрышей изображается в виде плоской стержневой системы, составленной из стержней  $A, B, C, D$ . Стержни  $A$  имитируют участки оболочки вне вырезов, стержень  $B$  — участок оболочки над вырезом, стержень  $C$  — нижний пояс выреза. Стержни  $D$  являются абсолютно жёсткими и введены в схему на основании принятой гипотезы плоских сечений, которой подчиняются деформации оболочки. Последнее означает, что при расчёте боковые стены и крыша рассматриваются как оболочка с недеформируемым контуром поперечного сечения.

Стержни  $A$  соединяются с элементами рамы с помощью абсолютно жёстких вертикальных стержней  $E$ . Между боковыми стенами и концами поперечных балок  $G$  рамы введено по три связи: вертикальная, продольная и угловая, отвечающая кручению поперечных балок.

\* Вопрос о выборе расчётных нагрузок для кузовов вагонов подробно рассмотрен в (2) стр. 252—259.

Гофрированная в продольном направлении обшивка рамы включается в расчётную схему в виде плоских панелей  $H$ , деформации которых складываются из деформаций чистого сдвига, чистого растяжения-сжатия в продольном направлении и чистого изгиба в плоскости панели. В соответствии с этим панели  $H$  соединяются с боковыми стенами (стержни  $A, C$ ) и хребтовой бал-

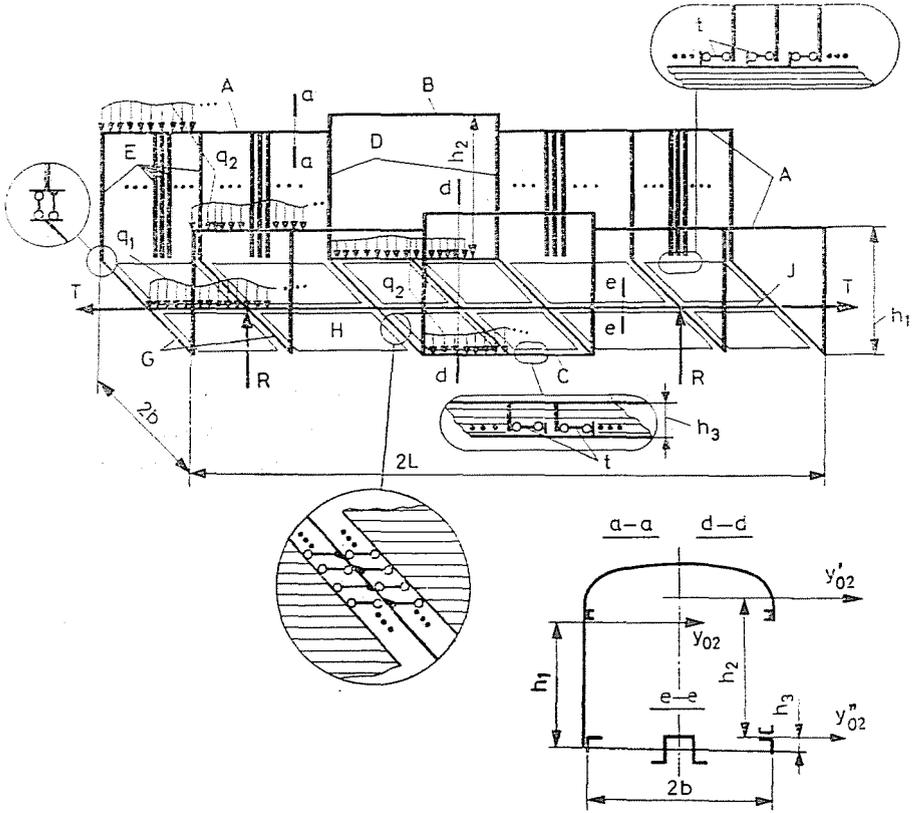


Рис. 2

кой  $J$  с помощью непрерывно распределённых касательных связей  $t$  по продольным кромкам. Между поперечными кромками панелей  $H$  и поперечными балками  $G$  введены непрерывно распределённые касательные, нормальные и угловые связи рис. 2.

Полагая для простоты внешнюю нагрузку симметричной также относительно средней поперечной плоскости кузова, ограничимся рассмотрением одной четвертой части расчётной схемы рис. 3. Со стороны отброшенной части введены связи, соответствующие изгибающим моментам и нормальным силам.

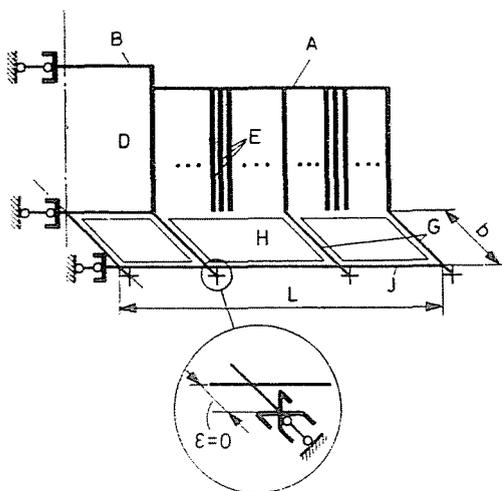


Рис. 3

Полученная система 20 раз статически неопределима. Раскрытие статической неопределимости удобно проводить с помощью метода сил. Одна из основных систем показана на рис. 4. Здесь же изображены неизвестные  $X_i$ , которые представляют собой:

- при  $i = 1, i = 2$  — нормальную силу и изгибающий момент в сечении полукрыши над вырезом (рис. 4, *a*);
- $3 \leq i \leq 5$  — горизонтальные поперечные силы по концам поперечных балок (рис. 4, *a*);
- $6 \leq i \leq 8$  — вертикальные изгибающие моменты в хребтовой балке (над поперечными балками, исключая концевые) (рис. 4, *a*);
- $9 \leq i \leq 11$  — моменты, скручивающие поперечные балки (рис. 4, *a*);
- $12 \leq i \leq 14$  — равнодействующие касательных усилий чистого сдвига по продольным сторонам панелей H (рис. 4, *b, c, d*);
- $15 \leq i \leq 17$  — нормальные усилия чистого растяжения — сжатия на поперечных сторонах панелей H (рис. 4, *e*);
- $18 \leq i \leq 20$  — нормальные усилия чистого изгиба на поперечных сторонах панелей H (рис. 4, *f*).

Расчёт системы целесообразно проводить с помощью матричного алгоритма метода сил в форме, предложенной проф. Е. Н. Никольским.\* Этот алгоритм удобен для реализации на ЭВМ и позволяет простым путём учесть переменность сечений поперечных балок рамы.

\* Указанный матричный алгоритм изложен в (2), стр. 260—298.

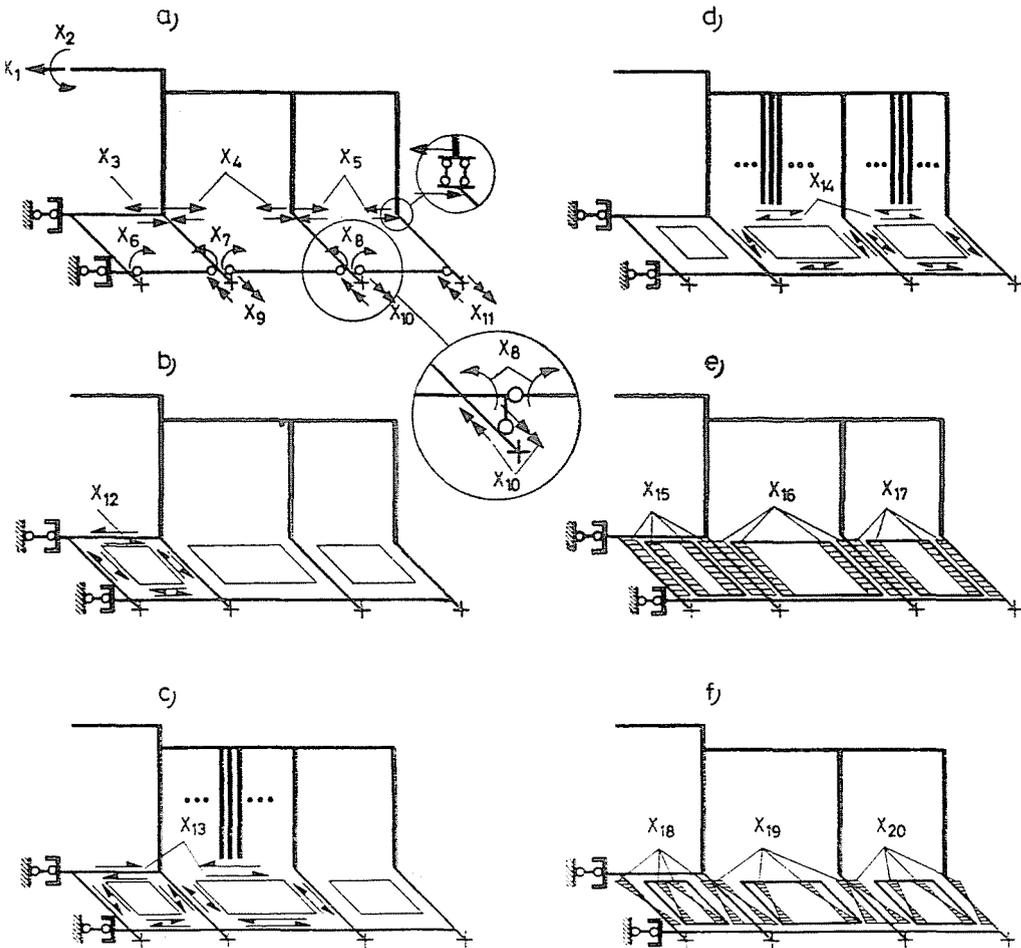


Рис. 4

Построение необходимых для расчёта эпюр внутренних сил в основной системе от  $X_i = I$  и от внешних нагрузок не представляет значительной сложности.\* Результат расчёта получается в виде матрицы ординат суммарных эпюр внутренних сил в сечениях элементов кузова по концам участков исходной расчётной схемы. На основании этих эпюр можно рассчитать напряжения в элементах кузова.

Рассмотренная расчётная схема с небольшими изменениями может быть использована для расчёта некоторых других кузовов грузовых вагонов. Например, если обшивка рамы гладкая, то есть не имеет продольных гофров, то панели  $H$  можно считать работающими только в условиях чистого сдвига.

\* Некоторые типовые эпюры внутренних сил приведены в (2), стр. 271, 276, 314.

В случае отсутствия обшивки на раме расчётная схема представляет чисто стержневую систему.

При расчёте кузовов пассажирских вагонов на нагрузки, симметричные относительно вертикальной продольной плоскости, методика построения расчётной схемы кузова в целом сохраняется. Исключение составляет выбор расчётной схемы оболочки боковой стены с полукрышей. Рассмотрим две возможные схемы.

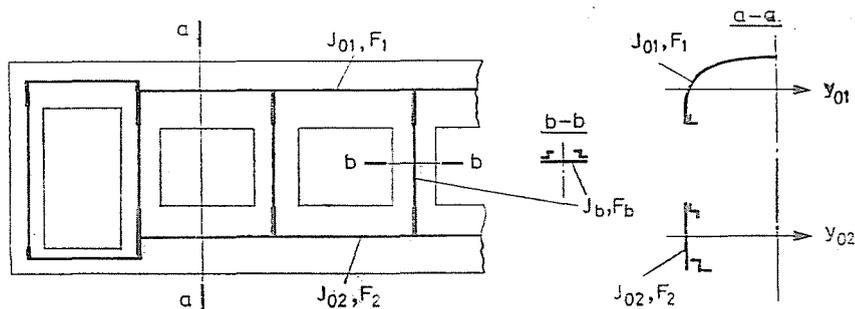


Рис. 5

В первой расчётной схеме [2, 3] надоконные и подоконные части изображаются в виде поясов (стержней), расположенных на уровнях тяжестей соответствующих поперечных сечений рис. 5. Простенки включены в расчётную схему в виде стоек с упругой частью несколько большей высоты выреза. В зоне соединения стоек с поясами вводятся абсолютно жёсткие на изгиб участки.

Основная система получается путём раскрытия статической неопределимости каждого контура, образованного поясами и стойками. Эта схема наиболее целесообразна в том случае, когда простенки узкие и имеют ширину в 2 и более раз меньше высоты выреза.

Для кузовов, межконные простенки которых достаточно широкие, может быть использована другая схема, более точно учитывающая работу простенков. Отличие этой схемы от первой заключается в том, что модель простенка изображается в виде сочетания поясов, стоек и прямоугольных панелей  $U$ , работающих в условиях чистого сдвига рис. 6.

Панели  $U$  соединены по контуру с поясами и стойками, непрерывно распределёнными касательными связями  $g$ . Такая модель простенка выбрана на основании результатов экспериментальных исследований кузовов. Основная система образуется путём раскрытия статической неопределимости контуров и удалением связей  $g$ .

Исследования показывают, что специализированные расчётные схемы метода конечных элементов позволяют с удовлетворительной точностью определять интегральные характеристики внутренних сил по сечениям элементов

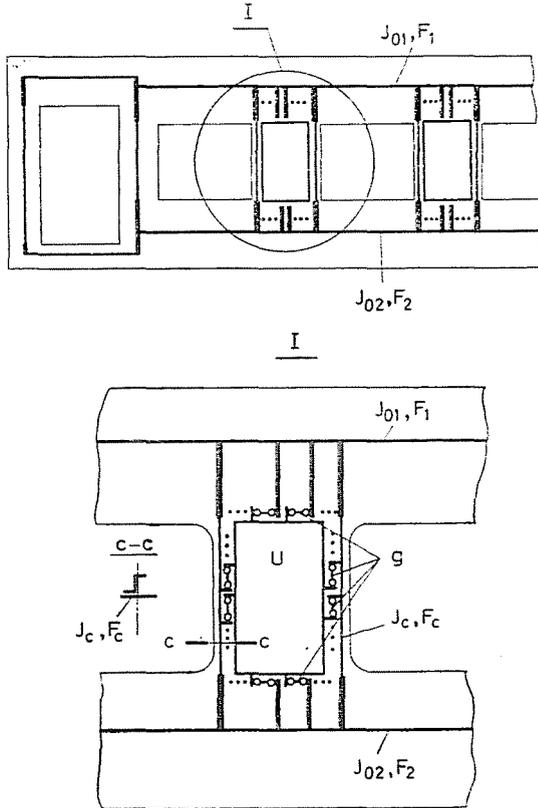


Рис. 6

кузова и обеспечивают приемлемую точность определения напряжений в сечениях, достаточно удалённых от участков резкого изменения формы (углы вырезов, узлы пересечения балок рамы, отверстия и т. д.) и мест концентрации внешних сил.

Напряжённое и деформированное состояние в указанных зонах кузова может быть исследовано на базе методов теории упругости и теории оболочек путём рассмотрения отдельных частей кузова (например, оболочки, отделённой от рамы). Усилия взаимодействия между этими частями могут быть взяты из расчёта кузова на основе рассмотренных схем.

### Резюме

Рассматриваются особенности построения специализированных расчётных схем метода конечных элементов для кузовов цельнометаллических грузовых и пассажирских вагонов, несущие конструкции которых представляют тонкостенные подкреплённые оболочки с вырезами.

### Литература

1. Никольский, Е. Н.: Оболочки с вырезами типа вагонных кузовов. Машгиз, Москва, 1963.
2. Вершинский, С. В., Никольский, Е. Н. и др.: Расчёт вагонов на прочность. 2-е изд., «Машиностроение», Москва, 1971.
3. Шадур, Л. А. (ред): Вагоны. Изд. 2-е, «Транспорт», Москва, 1973.

В. В. Кобищанов, канд. техн. наук, доцент Брянского института транспортного машиностроения. Брянск, СССР.