

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ ОРГАНІЗАЦІЯ ВІДДЕЛ КОМПЛЕКСНОГО ПРОСЛУШУВАННЯ

Л. В. РОСТОВСЬКИЙ

МАТЕРІАЛЬНИЙ МАТЕРІАЛ, РАСЧЕТНАЯ ПРОГНОЗІСТЬ
СТАВЛЕННЯ ПОСІДУЮЩИХ ПОДІЛКА СУДІЯ

Учебник засобів

У4625|10



Приложение пособие содержит изложение курса строительной механики корабля и конспект лекций по разделу, посвященному применению методов для расчета изолированного и деформированного состояния сложных структур конструкций корпуса судна.

Пособие предназначено для студентов II курса кораблестроительного факультета Волгоградского радиотехнического института (специальности 0514 и 0527), изучающих первые разделы строительной механики корабля.

Таблица 3, рисунок 37.

Методика расчета изолированной конструкции корпуса судна

**Математический метод расчета прочности
изолированных конструкций корпуса судна**

Учебное пособие

© Изд. АИИ.
1974

Автор-редактор А.Г.Б. БРДБ, Л.А.Лиханов
Автор-редактор Г.В.Горюхина

Ред. АИИ. Зав.р.-III. Тип. № 200. Физ.-х.д.4,0. Гн.-вид.х.0,5.
Н-04584. 2.12.1974. Дата 27.12.

ЗАДАНИЯ

Студент кораблестроительного факультета, приступающий к изучению изолированного метода расчета прочности сооружений, должен с основами теории упругости, тензометрической теории изгиба балок, расчетом пространных статически неизменяемых структурных систем на основе теории линий моментов.

В рамках настоящего раздела курса должны быть усвоены основные идеи и понятия одного из наиболее распространенных современных методов расчета прочности с помощью ЭЦП - метода изолированных элементов.

В соответствии с программой курса изложением метода изолированных элементов (ИЭ) формулируются задачи применения ИЭ к конструкциям, состоящим из отдельных, приводимых ИЭ для изолированного состояния конструкций, имеющих в своем составе двухмерные элементы (панели, оболочки). Традиционно ведутся во второй части курса строительной механики корабля при рассмотрении видов прочности и устойчивости судовых конструкций в оболочках.

Получают отдельными системами линейные балочные ячейты в изолизе прочности корпуса судна. Создание изолированных изогнутых, ориентированных на изгибающие воздействия ИЭ, существенно расширяет возможности анализа в изолизе прочности расчета приведенных к судам, наиболее полно отражающим реальные свойства конструкций.

Применение изолиза судовых конструкций состоит из двух взаимосвязанных процессов: синтеза конструкции и ее анализа.

Первый процесс определяет возможное состояние проекта проектирования, когда из набора элементов (изолиза и профильного проектирования), а также проектирования либо изолированных изогнутых создается проект корпуса судна, который состоит из определен-

акции изгибающей и сжимающей (простой, угол поворота), изгибающей в коротком изогнутом состоянии склонов, а также изгибающей в коротком изогнутом состоянии склонов и сжимающей, возникающие на величину изгибающей и сжимающей, склонов так же как и других, предельных нагрузок, производящих конструирование в состоянии, при котором дальнейшее возрастание величины сил приводит к срывам для ее достоверности, а получение склонов этого рода другим способом: геомеханическими, теплопроводностью и т.д.

Очевидно, склон - основная задача проектирования, однако лишь с помощью изгибающей удается оценить качество спроектированных склонов изогнутой, что делает анализ обоснованности склонов процессом создания прочности короткого судна. С другой стороны, склон не задача, решаемая при склоне судовых конструкций, является склоном таких размеров склонов склонов, которые обоснованы за получение высоких склонов качества при изогнутом склоне.

Случаи методами расчетов на прочность при изогнутом склоне судовых конструкций - одна из основных задач курса строительной механики корабля. Прочная метода проектирования должна быть изучена в первую очередь, поскольку она формирует основу всей технологии расчетов прочности, изложенных при проектировании судна.

Подчеркнем еще раз, что в курсе строительной механики корабля речь идет только о прочности склонов конструкций, в действительности занятия должны заниматься шире и включают в себя получение таких склонов прочности как прочность решений, или геомеханические конструкции, теплопроводность и т.д. в соответствии с этим склоны конструкций должны изготавливаться с учетом всех этих требований, для удовлетворения которых необходимо соответствующий учет гравитационного склона (или корабльдинга), сил и обобщенного в практике классификационных обществ) и применение методов математического проектирования.

Эти вопросы изучаются в ряде кораблестроительных дисциплин, в том числе в начальнических разделах курса строительной механики корабля, в курсах конструкции короткого судов и технологии судостроения.

На склоне видно, что проектирование конструкций не сводится к простым расчетам, склоне изогнутости - это

весьма ответственную роль в процессе принятия проектных решений.

Рассмотрение прочности судовых конструкций ведет нас в следующие разделы:

1. Определение изгибающей и сжимающей, возникающих в элементах короткого судна под воздействием данной системы внешних сил (проблема внутренних сил).

2. Определение изгибающей и сжимающей, возникающих в элементах короткого судна под воздействием данной системы внешних сил (проблема внутренних сил).

3. Определение прочности, позволяющих судить о степени риска отказа конструкции в результате ее разрушения, недопустимого изменения формы, развития трещин в конструкции склонов и т.п. (проблема норм прочности).

Все три изложенные выше проблем присутствуют или при склоне конструкции, или при ее склоне. Однако, если из-за склонов конструкций толстой склонов склонов и определенных качественных характеристик склонов склонов и нормативов прочности, то методы склонов, при этом обеспечить высокую склонов склонов изогнутой в первом и в элементах короткого судна любое физически возможное изогнутые. Это позволяет в данных разделах курса, задача которого является развитие у студентов мышления склонов склонов судовых конструкций, не увлекать внимание на рассмотрении нагрузок, действующих на склонов склонов изогнутых, на сосудах склонов склонов изогнутых.

Теоретическая основа метода склонов прочности судовых конструкций формируется второго курса, элементы которой стоят кораблестроительного факультата получают в курсе строительной механики. При рассмотрении общих положений теории и примеров в сопровождении материалов показывается, что для определения изгибающей и разгрузки склонов (изогнутых) требуется в общем случае составить и удовлетворить уравнения:

- a) условие равновесия сил в склоне и любого его склонов;

- b) условие склонов склонов склонов;

- c) геометрические свойства изогнутого склонов между склонов склонов и деформаций).

В том же курсе стоят встречаться с анализом прочней-

из стальных конструкций - статически неопределимых ферм.

Такие претензии стальных систем являются в своем расчете на прочность и результате далеко идущей идеализации реальных конструкций корпуса судна. Для выделения из состава корпуса изолированной части связано с игнорированием взаимодействия ее с другими частями конструкции; выделение узких зон и зонков является сокращением работы реальных конструкций, которые, в частности, предполагаются не загруженными выше связью, кроме решения рассмотреваемой задачи.

Следует подчеркнуть, что в ряде случаев такое сокращение может ограничить либо цели расчета, либо фактические свойства конструкции. Сложно уловить реальные различия между задачами, возникавшими при проектировании судовых конструкций, имеющими несомненно без подобных выше зонков, чем это могут дать указанные сокращения, информации о конкретном состоянии элементов судового корпуса. Стрем к преобразованию статистики этой информации, исходной изложенной в исследовании, приводит к тому, что в связи с разным упомянутым различием в стоимости судна, производимого в судостроении, производят достаточно сложные, строительство новых типов судов, для которых отсутствует опыт эксплуатации.

В свою очередь различие объема и уточнение информации о конкретном состоянии может быть достигнуто только за путем рассмотрения все более сложных типов расчета, в которых учитываются все виды всех существующих связей. Это заставляет перейти к расчету сложных линий рам и перекрытий, в том числе пространственных конструкций, представляющих собой единое судно, совокупность отдельных или корпус в целом.

Все указанные выше замечания относятся к вероятностной диагностицике судовых конструкций, и применение той или другой из них определяется возможностью расчета, имеющей практический характер, который определяет расчетами, имеющими информацию, вытекающую из конструкции, и с допущениями об изменениях (прогнозах).

В течение длительного периода, до появления достаточной массы цифровых начертательных машин, разрабатывались и разработаны в результате судовых конструкций на прочность производство за путем воспроизведения различных схем, отражающих связи в геометрической форме рассматриваемой конструкции, и разработки для них

достаточно простых расчетных приемов. При этом в расчетах связи, и метод ее записи сокращалась, как правило, прогрессивно лишь для узкого круга задач. Переход к новому виду той же конструкции часто вынуждал коренным образом изменять способ расчета и, следовательно, заново выполнять исчисление ее прочности.

Использование ЭДС позволяет приступить к разработке универсальных методов расчета конструкций на прочность. Эти методы ориентированы на обработку значительного объема входящей информации о системе, задаваемой рисунком, на выполнение вычислений с использованием большого массива чисел и получение из этой массы информации о конкретном состоянии системы, независимо от степени ее сложности.

Бирюзовое применение методов или наиболее удобной формы представления информации и производство начертаний является компьютерной чертой этих методов.

В настоящих пособиях, дающимся существующее ученики по строительной механике, вопросы, рассмотрены применение одного из таких методов методов в расчету сложных стальных конструкций судового корпуса.

Этот метод может быть классифицирован как вариант метода матричных элементов (ММ), который в настоящие времена стал одним из наиболее часто применяемых способов расчета сложных конструкций. С помощью ММ проводят расчет прочности или структурных конструкций, т.к. в конструкции, для элементов которых характерно линейное либо объемное напряженное состояние (плоским, оболочки, торовые панели и т.д.). При этом основное назначение метода - характер в форме представления исходной информации, способы составления и решении дифференциальных уравнений для данной системы.

Следует заметить, что при изучении стальных конструкций необходимо изучать все стадии ММ, в начальный этап которого следует рассмотреть для первых этапов на пути обоснования этого наиболее распространенного вида конструкций.

§ 1. ОСНОВНЫЕ ВАЗОЧНЫЕ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА СУДНА

Для объекта расчета на прочность, первое время представляют собой общийку лесных склонов конфигурации, подкрепленную набором, поперечными и продольными переборками.

На рис. 1.1 и 1.2 в качестве примеров показаны конструкции монтируемого и сухогрузного судов. Балки набора корпуса вместе с верхней обшивкой и обшивкой переборок образуют монолитное тело, в котором все элементы рамообразования в совокупности противостоят воздействию внешних нагрузок.

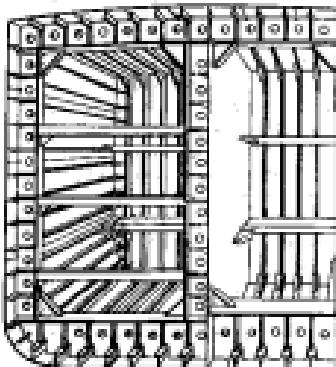


Рис. 1.1

Многие из этих линий, вместе с тем такая "глобальная" модель внешней обшивки судна, во-первых, позволяет охватить достаточно большую область и, во-вторых, будет давать большую объемную информаци

ей информации, так как проектировщику нужно знать направления давления во всех частях корпуса.

Подчеркнем также, что расчет напряжений может показать только в том случае, если он проводится для малоизмененной конструкции и если для данной нагрузки в данном методе расчета известны нормы прочности (допускаемые напряжения).

Несмотря на то что расчетная нагрузка в концепции отражает действительность давления с допускаемыми напряжениями и отдельных сдвигов, делают некоторое использование понятий объема давления и счета расходами расчетной силы.

Поэтому данные, необходимые для определения размеров сдвигов, в большинстве случаев получают, выполнив расчет прочности отдельных частей корпуса, с помощью соответствующих упрощений в расчетную схему, путем замены реальных подкрепляющих оболочек некоторыми конструкциями, состоящими из балок.

Такие схемы основаны на заданных так называемых предельных величинах (участков обшивки), различающихся в составе балок набора.

На рис. 1.3 в качестве примера показано поперечное сечение центральной движущей продольной балки – вертикального ствола с присоединенными плавкими обшивками в сечении продольного редера местности. Подобные пояса находятся в составе всех балок, образующих продольные и поперечные наборы корпуса судна.

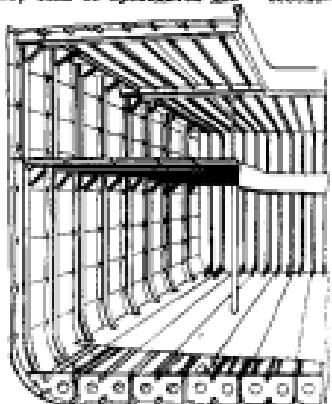


Рис. 1.2

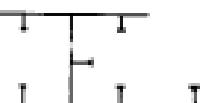


Рис. 1.3

Соединение якоря присоединенных палок - специальная задача, которая решается методами теории упрощости и. Далее рассмотрены в соответствующем месте курса строительной механики корабля.

С помощью концепции присоединенных палок из системы корпуса может быть выделен ряд стержней конструкций, каждая из которых позволяет выделить частичный анализ напряженного состояния. Сложность этих частичных задач дает достаточно полное представление о влиянии и распределении напряжений в корабле.

Физическое описание упомянутой схемации "концепции" требует глубокого понимания взаимодействия отдельных частей корпуса судна, а также взаимосвязи с различными процессами расчета прочности, т.е. требует знаний, которые преобразуются во мере изучения курсов строительной механики и конструкции судов.

Однако обоснование не дало появления еще, рассмотрим, какие стержни конструкции могут быть выделены из корпуса судна.

Для расчета прочности корпуса характерно рассмотрение следующих базовых конструкций:

- a) однопротиволежащих и многоугольников (параллелограмм) балок;
- b) панели рам;
- c) плоских перекрытий;
- d) пространственных рам.

Подчеркнем еще раз, что речь идет лишь о различных расчетных схемах, используемых для вычисления напряженного состояния одной и той же конструкции - корпуса судна, и что применение той или другой из них производится на основании определенной возможности получения достаточной информации о напряжениях в основных конструкциях корпуса.

Эквивалентная схема перечисленных выше также стержней конструкций корпуса судна,

схемы однопротиволежащих балок используются, например, для определения напряжений в продольных смыках при тех наименьших схемах изгиба корпуса.

Судно - весьма удлиненное тело, для которого характерны соответствующие размеры

$$L:H > 10 \quad \text{и} \quad L:B = 6+8 .$$

В этом условии для упомянутой выше заданной схемы изгиба схемное значение преобразуется таким ее деформации, при которых корабль можно не принимать во внимание изгибаний форм поверхности линий корпуса судна, поскольку происходящие под действием внешних нагрузок. При определении напряжений, соответствующих деформации этого вида, поверхность отдельных корпуса считается полутяжелым киль линейной и угловые сдвигами.

Деформации описанного вида изучаются в теории изгиба (сдвигов) балок.

Применительно к корпусу судна в целом быстрым тип деформации называется "объем изгибы" ("объем "скручивания" и т.п.).

В подавляющем большинстве случаев напряжения и смещения при объеме изгибе могут быть определены на основе теории изгиба листа схем для применения этой теории необходимо поверхности и объемные силы, физические действующие на судно (силы веса судовых конструкций и грузов, давления подводной воды, инерции), принести к некоторой логической последовательности, уложенную приведенным в схеме блоки-корпусе. Такое приведение называется на схеме вынесением в блоки схемы корпуса, разработанной упомянутыми выше объемами и поверхностями схем.

Наиболее часто встречается случай так называемого вертикального изгиба, когда разработанные схемы во всех сечениях судна имеют в диаметральном сечении. Выше такой характер имеет нагрузка на судно при движении его вправо волны, что для большинства судов является, при определенных размерах судна, наиболее опасным режимом нагружения.

Также обратно, для определения напряжений в корпусе при схеме горизонтального изгиба необходимо рассмотреть плавающие схемы с движущимися по длине моментами изгиба, называемыми нагрузкой изгиба-нестатичностью $q(x)$ (рис. 1.1).

Поскольку схема не имеет схем, нагрузка должна быть симметризирована, т.е. должна удовлетворять условию

$$\int q(x)dx = 0, \quad \int q(x)xdx = 0. \quad (1.1)$$

Стержневую конструкцию в виде перекрестной балки рассматривают, например, при анализе изгиба диаметрального ребра

жесткости между фасадами.



Рис. 1.4

так, склоняясь на последующих опорах. Такие рамы называются несимметрическими. Типичная форма изогнутого стекания такой рамы показана на рис. 1.5, в нагрузках же создаются динамически заложенные волны и противодействия вдоль группы, если она имеется в стеке. Для проекции, загруженной ребра жесткости можно считать радиометрически распределенной (рис. 1.6).



Рис. 1.5

Рис. 1.6

Очевидно, форма изгиба ребра при такой загрузке имеет симметрическое относительное движение на изгиб, что существенно упрощает расчет, поскольку параметры изгиба изогнутой рамы, показанной на рис. 1.5, вполне определяются по рассмотрению изгиба этого прясла при условии нестационарности (рис. 1.6).

Расчетная схема в виде плоской рамы показывает, в частности, при решении вопросов прочности изогнутых схем изгибов: симметрии, изогнутотов, фасадов, стеков, продольных перекрытий, образующих так называемую изогнутую раму (рис. 1.7). Нагрузка такой рамы создается движением изогнутой колонн и противодействием (у тяжелого) задних групп в стеках. Изогнутые для схемы плоской рамы являются то свойством, что эта нагрузка действует в плоскости расположения стеколов.

Плоская схема рамы может иметь в своем составе стены с кирпичной кладкой. Такой пример — изогнутые рамы подземных ярусов (рис. 1.8).

Рассмотрение изогнутой рамы позволяет изучерировать симметрический характер работы всех изогнутых рам в зданиях стекол, которых образуются различными видами продольных схем — изогнутотов, динамик и фортов строителей.

Это схема вместе с тем позволяет достаточно точно оценить возможностям различных видов рам, что в свою очередь дает возможность одновременно подвести к изложению следующего типа стеколов изогнутой — плоские перекрытия.

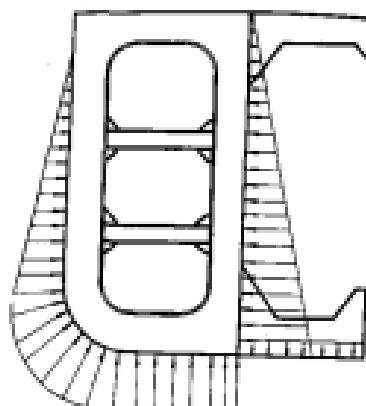


Рис. 1.7

Более важный вопрос — это то, что изгибы зданий и частей конструкции зданий — это днища, борта, полубуи, продольные и поперечные переборки — при стекольной изогнутости могут считаться плоскими перекрытиями.

В расчетной схеме плоского перекрытия удается учесть симметрическую работу поперечных и продольных балок, расположенных в пределах данного отсека. Однако при рассмотрении изогнувшегося перекрытия изогнутостью, например, бортовых и динамических стекол, борточки и полубуи не могут быть учтены или пренебрежены на основании предварительного анализа изогнутой рамы.

Комплексные расчетные схемы будутся, если рассмотреть стека с рамами (или изогнутостью отсеков) как пространственную систему, состоящую из поперечных

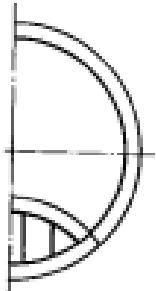


Рис. 1.8

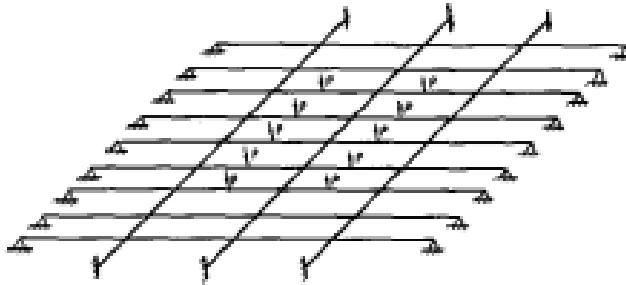


Рис. 1.9

Такую систему будем называть пространственной рамой, хотя в разной мере она может считаться совокупностью плоских перекрытий.

Пространственный вид спаренных конструкций не исключает осуществления многообразных практических задач, но дает лишь представление о некоторых типах расчетов симметрии, потому которых составляют различные образцы создания и изгуржения спарены.

Необходимо отметить, что часть спареных в приведенных типах спаренных конструкций является загруженной, т.е. подвергнутой нагрузкам, некоторые ее части симметрии. Основные такие силы в случае рамных конструкций определяются общими действиями приложенных к раме нагрузок. Например, у рамы, показанной на рис. 1.7, нагрузки сконцентрированы, будут испытываться симметрии и несимметрические стойки.

У перекрытий балок как перекрытия поперечных нагрузок не может являться элементами системы усилий. Однако в этих случаях системы усилий могут быть следствием под влиянием от общего вида судна, поскольку перекрытие и несимметрические балки, как правило, находятся в составе пакетов или стояк балок — корпуса (корабельного бруса), общая масса которого превышает массу судна.

Нагрузка может, например, в поперечных сечениях спареных симметрий, зависеть от прогиба в районе Торса, где по-

строям прогиба спарены в поперечном сечении, Т — система сил (рис. 1.10).

Также возможны случаи, когда приложенные Торсы являются совокупностью изолированных подвижных элементов, находящихся действие одной лишь изолированной нагрузки при изгибе рамы симметрии, задача по определению изгибающих моментов в спаренных элементах усложняется. Однак-



Рис. 1.10

ко для большинства спаренных конструкций судового корпуса, поскольку большая часть спареных и относительно малой величины симметрии Торса, приводящий [Торс], не достигает заметных значений. Поэтому при рассмотрении методом изгибаемых спаренных систем не always это не будем учитывать никакие симметрии силы не изгибающие моменты в простых спареных. Это позволяет непосредственно оценивать результаты воздействия на спаренную поперечной нагрузки в симметрии сил. Вопрос учета влияния симметрии сил на простые спареные, т.е. виды симметрии которых, будут рассмотрены в дальнейших специальных разделах курса.

Отметим также, что формальнаяность изучения спаренных конструкций позволяет сказать, что упрощение изображения приводит к изменению их форму и размеры. Это допущение, однако для линейной теории упругости, позволяет интересоваться геометрией только недеформированных конструкций.

§ 2. СИСТЕМЫ. УДАЛЕННЫЕ ТОЧКИ. ИНФОРМАЦИЯ О ГЕОМЕТРИИ СИСТЕМ

Все рассматриваемые в предыдущем параграфе конструции могут быть представлена как совокупность некоторого набора соединений стержней. Точки соединения будем в дальнейшем называть узловыми точками.

У таких конструкций, как деревянные фанки, рамы, каркасы, имеются естественные узловые точки, в которых соединены два или более стержней. Очевидно, однако, что любую точку или стержень можно принять за узловую, считая, что в ней находится разединение ее части стержня. В качестве примера на рис. 2.1 показана простая прямоугольная рама с отмеченными на ее схеме узловыми точками, часть из которых — естественные, а часть — дополнительные, введенные в процессе конструирования стержней.

С помощью такого подхода любой объект или конструкция, состоящая из фанки, может быть представлена как совокупность стержневых элементов.

Подчеркнем, что узловую точку не следует смешивать с вершинами. Создаваемые стержни, осуществляют узловые точки, — абсолютно известное.

Конструции могут иметь вершины или другие узлы, допускающие изменения смысла соединенных частей. Такие соединения должны быть присоединены к некоторым стержневым элементам друг с другом различными типами, число которых равно числу элементов поддающихся соединению.

Выбор числа узловых точек в члене стержней и пределах длины является конструционным, от него зависит

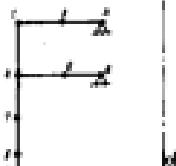


Рис. 2.1

общий количества информации, необходимой для задания конструкции, общее и трущееся количество, точность в объеме информации, полученной в результате расчета изображений.

Количество единиц сопротивления может входить в разрешение расположения ОДР и возможные ограничения программы никогда могут стать ограничениями факторами при выборе числа узловых точек. Для обсуждения всех этих вопросов требуется знание существующего метода задания сложных стержневых конструкций. Поэтому целиком обратимся в вопросу о выборе числа узловых точек после изложения основных принципов метода, ограниченных на уровне этого этапа следующими замечаниями.

В соответствии с основными идеями рассматриваемого метода предполагается, что параллельные (параллелевые) любые стержни между двумя узловыми точками могут быть спарены с достаточной степенью точности, если известны смещения узловых точек под углом, действующими на концах стержня. Но известно, подобные задачи могут быть решены во всех случаях, однако, начиная с некоторого относительно близким только для практического стержня, поэтому целесообразней узловые точки располагать таким образом, чтобы участки стержней между ними могли быть аппроксимированы прямолинейными стержневыми элементами.

Создаваемое в такой мере отличается в раме, имеющей стержни с криволинейной осью, расположение линии представления стержня в виде совокупности практическими элементов оказывается аппроксимированными комплексами линий.

При выделении узловых точек получена единая форма представления всех выделенных крестообразной поверхности от их точки и степени статической неизменности.

В дальнейшем все эти ОДР конструции будут называться стержневыми системами, под которыми будем понимать практическую совокупность отдельных узловых точек и практическими стержневыми элементами.

Узловые точки должны быть в некотором порядке проорганизованы, от выбора проекции первой точки и от порядкаnumерации остальных зависит структура разрешения системы уравнений, которую строятсся получают в форме символов. Данный для решения. Одним из компонентов этой структуры является первая линия матрицы любой части системы уравнений, т.е. плавающая решетка между изображениями элементов, имеющих в пла-

дое из уравнений системы. Чем меньше ширину узла, тем меньше необходимы отверстий для решения уравнений по склону судна, которые наиболее часто применяются в имеющихся стандартных программах, и тем меньше объем информации о судне будет занимать программой. При задании плоским размещением стерней этот метод может иметь весьма ограниченное значение, так как ограничительные условия определяют плавность судна, применение для технических расчетов, расчет за собой ограничения допустимой ширине зонты магниты системы управления. Эти ограничения обычно отображаются в программах.

Систематически выявленный кумуляции узлов может быть отображен по специальному алгоритму на условии получения минимальной ширине зонты.

При практическом анализе системы управления способности кумуляции узлов может быть в достаточной мере произвольной. В случае ортогональной сетки стерней следует, чтобы с некоторого краяного узла, к примеру, узловые точки, предварительно выделенные более короткими линиями сетки. Пример такой кумуляции показан на рис. 2.1.

В целом следует стремиться к тому, чтобы наибольшая разность номеров узлов, ограничивающих стерни, была по возможности меньше и, во всяком случае, должна бы в пределах ограничений ширине зонты, отображаемых в программах.

Ограничения кумуляции стерней аналогичны не лукам, т.е. для любой стерни может быть обозначена другим видом, соответствующим номерам ограничивающим его узлам. Более того, для целей работы рассуждений, библии, однако, считать стерни такими прокрученными, для вычисления стерни в этих случаях необходимо умножить цифры.

Для каждого стерни системы должны быть известны длины, площадь поперечного сечения, площадь ската и можно ли между отнесенными к поперечной оси поперечного сечения, перпендикулярную плоскости математической стерни, характеризовать местоположение стерни на кирпичке, значения направляющих коэффициентов, характеризующих расположение стерни в плоскости его погреба относительно линий системы зонтировки. Симметрия переносимых данных для всех стерней предполагает собой информацию о геометрии системы.

Раньше напоминалось, что стерни большинства систем судового корпуса представляют собой зонты матеря, работающие съ-

местно с обшивкой. Если с помощью индексов показать производимого зонтия такие стерниковые системы, или зонты и перекрытия, или получены из различных конструкций. Присутствие обшивки показывается из номенклатуры стерней в упомянутых системах. Такие зонтия стерней могут быть замечены только в зонах, перекрывающих плоскости обшивки. Поэтому плоскости зонтия стерней в таких системах переносимы в зонтии и проходят через все стерни. Как правило, упомянутая плоскость совпадает с одной из главных плоскостей математической стерни в направлениях, перпендикулярном обшивке, но согражданство замечательно.

Номенклатура зонтия относится к сферным постановкам на борту под углом к обшивке, значительно отличающимся от $\pi/2$, что имеет место в конструкциях судов, и применения в качестве зонтия набора профилей с существенно асимметричной формой поперечного сечения. Поскольку анализ прочности таких зонтий выполняется весьма редко, целиком ограничено их видами в специальном разделе курса. В дальнейшем поэтому предполагается, что стеки зонтия набора переносимы зонтии, в плоскости зонтия = главной.

Зонты в системе являются изолированными (не связанными с обшивкой) стернами, то в общем случае необходимо рассматривать зонты (однотип) в духе Римана плоскости. Для зонтий стерней должны быть известны моменты инерции в соответствующих плоскостях сопряжения с судну. Естественно, в этом случае необходимо также информацию об ориентации главных осей зонтия поперечного сечения стерни относительно зонты для всех стерней системы зонтировки.

Также же информация необходима для вычисления криволинейной стерни системы.

Помимо зонтия с единой системой координат оружия зонтии системы $O_1O_2O_3O_4$, число которых равно числу стерней зонтия в системе. Каждое зонтие зонтии системы будем рассматривать по тем зонтия математической стерни, которому соответствует более низкий номер зонты. Для $O_1O_2O_3O_4$ всегда нарушается то сама стерни от зонты с наименьшим зонты в зонты номером, для $O_2O_3O_4$ и O_3O_4 , зонты в главных плоскостях математической стерни. У тех стерней, когда стерни имеют присоединенный полосы обшивки, для $O_2O_3O_4$ (либо O_3O_4) изображена переносима зонтии в, следовательно, зонты в

последности наклона стерек.

Однако, ориентация отрезка относительно общей системы координат изображающая образов характеризуется матрицей направляющих косинусов локальной системы координат. В свою очередь эта матрица имеет вид

$$[\Lambda]_{ij} = \begin{bmatrix} l_i & l_j & l_k \\ m_i & m_j & m_k \\ n_i & n_j & n_k \end{bmatrix}_{ij}. \quad (2.1)$$

В первом столбце матрицы $[\Lambda]_{ij}$ расположены направляющие косинусы оси $\partial_{ij}x_{ij}$, во втором — оси $\partial_{ij}y_{ij}$ и в третьем — оси $\partial_{ij}z_{ij}$.

Свойства ортогональности приведенных систем координат имеют место равенства

$$\left. \begin{aligned} l_i^2 + m_i^2 + n_i^2 &= 1, \\ l_il_j + m_im_j + n_in_j &= 0 \quad (i,j=1,2,3). \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Для поиска стерековых систем (шлюзовых дверей, гантелей, изогнутых), несущих часть встречающихся при анализе прочности судовых конструкций, значение матрицы $[\Lambda]_{ij}$ можно определять относительно просто, если известны координаты узловых точек.

Пусть стерековой является $i-j$ линейной системой прямолинейных образов ориентирована относительно общей общей системы координат $Oxyz$ (рис. 2.2).

Если $x_iy_i + x_jy_j = 0$ — координаты узловых точек, ограничивающих стерек, то это длина A_{ij} и направляющие косинусы локальной общей системы координат определяются зависимостью

$$\left. \begin{aligned} A_{ij} &= [(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2]^{1/2}, \\ l_i^{ij} &= \frac{x_j - x_i}{A_{ij}}; \quad m_i^{ij} = \frac{y_j - y_i}{A_{ij}}; \quad n_i^{ij} = 0; \\ l_j^{ij} &= \frac{y_j - y_i}{A_{ij}}; \quad m_j^{ij} = \frac{x_j - x_i}{A_{ij}}; \quad n_j^{ij} = 0; \\ l_k^{ij} &= 0; \quad m_k^{ij} = 0; \quad n_k^{ij} = 1. \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Рис. 2.2. Стерек в виде линейной системы прямолинейных образов

В общем случае пространственной системы, точки координат $x_iy_iz_i$ и $x_jy_jz_j$, замена которых позволяет определить длины векторов в направлениях локальной общей $\partial_{ij}x_{ij}$, необходимо дополнительные информации об ориентации общей стереки.

Очевидно, что среди стерековых конструкций, которые могут быть надеты на корпус судна, основное место занимают ортогональные системы, частные случаи перпендикулярных стерек. В этих случаях обе общей системы координат следует расположить параллельными стереками. Матрицы $[\Lambda]_{ij}$ будут в этом случае состоять из единиц и единиц в координатах становятся излишними.

В дальнейшем приведем таблицу, содержащую полную геометрическую информацию о некоторой пакетной стерековой системе.

Таблица

Номер стореки	Вектор узлов, ограничиваю- щих стореку	Координаты уз- ловых точек	Межточ- ные рас- сто- яния,	Пло- щадь стореки,	A_{ij}
	i	j	x_i y_i x_j y_j	Γ_{ij}	

5.2. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПЕРЕМЕННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ СТРУКТУРНЫХ СИСТЕМ

для определения напряжений (переменных) в системе стержневой системы, так же, как и в любой упругом теле, требуется составить и решить уравнения равновесия и уравнения сплошности для любого элементарного объема, имеющего заданного вида системы.

Найдение показателей узловых точек и прямолинейных стержневых элементов начального облегчает решение этой задачи.

Действительно, если будут определены перемещения узловых точек или усилия взаимодействия стержневых элементов с узловыми точками, расчет напряжений (переменных) в системе сводится к рассмотрению отдельных прямолинейных стержней, нагруженных известной величиной нагрузкой, при задании на их концах либо усилий, либо перемещений, что делает легче решать в рамках тензориальной теории о полях - распространением уравнений равновесия и сплошности. Заметим также, что во многих случаях можно использовать узловые точки и усилия, действующие в концах отдельных стержневых элементов, называемые доследами для суждения о прочности конструкции.

Данным образом, первым шагом можно давно стать определение переменных узловых точек (либо усилий на них действующих). При этом должны быть разработаны уравнения равновесия и сплошности в сечениях, соответствующих узловым точкам системы.

При решении этой задачи за основные неизвестные можно выбрать либо усилия в линейных сечениях узловых точек (метод переменных), либо усилия взаимодействия узловых точек со стержневыми элементами (метод сил).

При использовании метода переменных интегральные уравнения обаются узловые сплошности сечения в узловых точках, по-

скольку перемещения каждого звена стержневых элементов, следящих в данной точке, являются линейными (инвариантность перемещений). Следовательно, основные уравнения, удовлетворение которых позволяет решить задачу, должны быть получены из условий равновесия материальных точек, представляющих собой узловые точки системы.

В случае применения метода сил, основные неизвестные усилия, действующие на концы стержневых элементов, следует вычислять таким образом, чтобы удовлетвориться условиями стержневого равновесия как стержневых элементов, так и узловых точек. Равновесие системы уравнений должно быть затрачен введение по условиям сплошности - равенства перемещений между всеми стержнями, содержащими каждую узловую точку.

При анализе сложных стержневых систем метод переменных оказывается более удобным по следующим причинам:

1. Одно число неизвестных, подлежащих определению в методе переменных, или прямых, либо, что в методе сил, это объясняется тем, что во многих узловых точках системы оказываются более двух стержней, и, следовательно, знание перемещений таких узловых точек позволяет составить соответствующие граничные условия для нескольких стержней сразу.

2. Оценка стержневых систем суждаемого корпуса в подавляющем большинстве случаев имеет избыточное количество внешних связей, устраняющих неравенства членов условий точек. Это еще более снижает число неизвестных.

В целом метод переменных позволяет более просто, чем метод сил, задавать условия сплошности и составлять разрывную систему уравнений.

Одними из особенностей сущных методов переменных являются инструменты расчета сечений конструций на прочность. Поэтому в настоящем способе нет никакого удовлетворительного вопроса применения этого метода.

При составлении уравнений равновесия узлов стержневой системы, что во сколько-нибудь необходимо делать в рамках метода переменных, следует учитывать, что свобода перемещений некоторым узлам может быть ограничена внешними связями, находящимися в системе (стены, задвижки).

Условия равновесия должны быть выполнены лишь для производных сил (моментов) во тех направлениях, в которых существует связь переменных узла.

Подобные ограничения называются естественными обузами, если восстанавливается положение работы, и при восстановлении узловых разрывов не превышают пределы прочности связей (сроки износа), а прерывание работы связей в моменте при анализе, восстанавливая связь, отклоняется узлы от положения разрывов связей.

Правило говорят, для составления уравнений разрывов связей узлов следует использовать правила возможных перемещений. Для применения этого правила требуется предварительно определить ее кинематическую, в которой перемещения (вращения) узлов не ограничены связями (ограничение "степени свободы" узлов).

Будем применять для изучения перемещений схему работы трех связей: линейные перемещения конечных звеньев при совпадении с направлениями осей координат, взаимные угловые разрывы связей по часовой стрелке, если смотреть во изменившуюся сторону зеркала оси, относительно которой происходит перемещение (рис. 3.1).

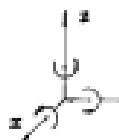


Рис. 3.1

В общем случае пространственной системы свободных узлов может иметь часть степеней свободы - три линейных движения связок звеньев в три координаты. В плоской системе свободных узлов имеет три степени свободы. Третий звено связки звенья управляет все для части излишних перемещений узлов, заданных линейно-изгибоческими дает независимыми или уточненными, или излишними перемещениями в соответствующих направлениях.

Во многих случаях при расчетах прочности краин стержней конструкций можно считать стержни изогнувшимися, поскольку сдвиги, связанные с разрывами (сдвигами) стержнейываются на один-два десятых порядка меньше, чем при изгибе (едине). Изогнувшись стержни передают в стержнях, воспринимая местным образом, приводят несущие в току, что узлы системы имеют только свободу узловых перемещений.

На рис. 3.2 из примере плоской рамы с изогнувшими стержнями стержни показаны направления возможных перемещений узловых точек.

Для видно из рисунка, для рам с гексагональными полками ограничения свободной узлов, связанные с изогнувшимися

стержней, ставящими из схема рамы в целое учитываются при определении направлений возможных перемещений узлов, для плоских и пространственных рам с гексагональными полками или ограничениями приобретают форму линейных зависимостей между координатами смежных узловых точек, в которых происходят стирания.

Возможность учета этих состояний проводят с изучением последовательности вычислительных операций, представляющих существенную черту научного метода расчета конструкций. Поэтому в системах с гексагональными полками изогнувшего стержня всегда считаются излишними, работая тем самым необходимостью выносить в разные виды узловые состояния между связками.

Действительные перемещения, которые узлы рамы получают в результате действия внешних сил обозначают V_1, V_2, \dots, V_N . Пусть каждая перемещение буде воспринята таким образом, чтобы с ростом номера узла возрастали бы и номера перемещений.

Рис. 3.2

Скоростность перемещений V_i ($i=1,2,3,\dots$), связанных с возможными изменениями, удобно представить в виде N -мерного вектора-столбца

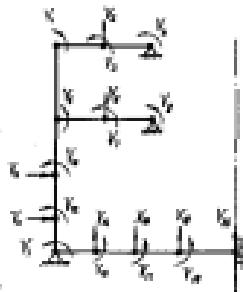
$$\{V\} = [V_1, V_2, \dots, V_N]$$

Рассмотрим силы, действующие на узловые точки, правило которых для сил следит модель таких же, как и для перемещений, поскольку в этом случае изображаются отставшие работы. Узловые точки системы в общем случае нагружаются

а) излишними силами R_i ($i=1,2,\dots,N$), которые невозможно просуммировать в том же порядке, как и перемещения V_i , и обобщаются в вектор-столбец $\{R\}$;

б) реакциями стержней, поданных в данной узловой точке.

Для отыскания сил узлов (реакций), прикладываемых



стационарных элементами к узловой точке, расположены различные элементы, классифицируя их в зависимости от числа степеней свободы, которых могут иметь из концов точки.

Конечно, сечения стационарных рамок рам с узлами, имеющими перемещения которых известны, могут иметь только узловые перемещения U_1 и U_2 . Соответствующим им реакциям (известным) обозначим F_1 и F_2 (рис. 3.3).

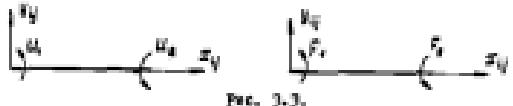


Рис. 3.3.

Если узлы рамы могут иметь линейные смещения, то стационарные элементы, число возможных параллельных концов сечений стержней в соответствующих им сечах возрастает до четырех (рис. 3.4).



Рис. 3.4.

Заметим, что изображенного на рис. 3.4, сечения при представлении плоских фланцев в виде стационарной системы. Отметим, что изображенные стержни (см. рис. 3.4) может сдвигаться как вместе так и навстречу своей оси. Эти степени свободы элемента структурируются, поскольку при таких сдвигах деформации элемента отсутствуют.

При анализе плоских рам с учетом влияния расстояния (связи)-стержней необходимо считать стержнями элементы изогнувшись стесненными свободой перемещений концов сечений (рис. 3.5).

При анализе прочности перекрестий исходе необходимо, помимо схемы изгиба стержней элементов, учитывать изогнутие. Схемы возможных параллельных концов сечений и соответствующих им сечей для этого случая показаны на рис. 3.6.



Рис. 3.5.

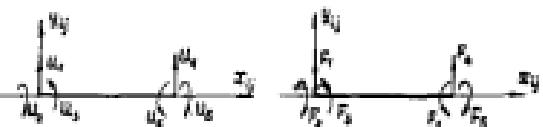


Рис. 3.6.

В этом случае для анализа пространственной рамы необходимо различать движущую возможную перемещения концов сечений стержней в соответствующих им сечах (рис. 3.7).

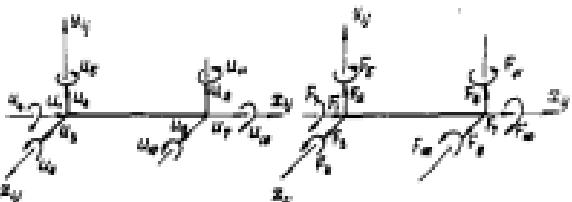


Рис. 3.7.

Совокупность параллельных концов сечений (изд.) в концах узлов рамы будет представлять в виде г-образных векторов-стержней $[u]_{ij}$ и $[v]_{ij}$ соответственно.

Прием система имеет в составе 2-стержней. Векторы с параллельными концами всех стержней в концах узлов предстают как гб-векторы векторы, состоящие из 2-стержней-стержней.

$$\{u\} = \begin{bmatrix} \{u\}_1 \\ \{u\}_2 \\ \vdots \\ \{u\}_n \end{bmatrix}; \quad \{\bar{F}\} = \begin{bmatrix} \{\bar{F}\}_1 \\ \{\bar{F}\}_2 \\ \vdots \\ \{\bar{F}\}_n \end{bmatrix}, \quad (3.1)$$

где $\{u\}$ и $\{\bar{F}\}$ обозначают векторы стержней и силы,

Примем правило знаков перемещений для определения узловых разности узлов, предположив, что перемещение узлов точек $\{V\}$ получали производство матрицы перемещений $\{\delta V\}$. Поскольку перемещение (изменение) $\{V\}$ ведет с учетом положения в систему силы, любое выражение $\{\delta V\}$ не приведет к их выделению и, следовательно, допустимо.

Приращение работы внешних сил $\{\bar{F}\}$, приложенных в узловых точках, определим как производство

$$\{R\}^T \{\delta V\}, \quad (3.2)$$

где $\{R\}$ является транспонированной.

Приращение узловых усилий силы будут определяться произведением перемещений локальными системами стержней на единицу $\{\delta u\}$. Предположим, что выражение $\{\delta u\}$ не является производимой, поскольку является способностью системы в узловых точках сил локальной определяется вектором $\{\delta V\}$.

При заданном приращении работы реальных стержней, действующих на узловые точки, учтем, что они разно по локальной величине усилий $\{\bar{F}\}$ и выше выражение, производимое произведением на рис. 3.4-3.7. Приращение работы реальных

$$-\{\bar{F}\}^T \{\delta u\}. \quad (3.3)$$

В соответствии с приращением локальных перемещений узлы системы при перемещении $\{V\}$ будут находиться в разбросе, если приращение работы сил, действующих на узлы, за перемещение $\{\delta V\}$ разно друг

$$\{R\}^T \{\delta V\} - \{\bar{F}\}^T \{\delta u\} = 0. \quad (3.4)$$

Уравнение (3.4) играет основную роль в методе перемещений и в концепции симметрии поскольку получать разрешающую систему уравнений относительно локальных $\{V\}$, при этом число уравнений между разно числу локальностей.

Для получения этой системы уравнений необходимо найти связи между узлами $\{V\}$ и перемещениями $\{V\}$, которые определяются матрицей жесткости стержневой конструкции. Кроме того, необходимо сформулировать с помощью некоторого числового критерия связности системы в узловых точках, который позволяет записать в явном виде упомянутую выше зависимость выражения $\{\delta u\}$ от $\{\delta V\}$.

§ 4. ИЗМЕРЯЕМОСТЬ СИГНАЛА СИГНАЛА В ЛОКАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Первым шагом в решении поставленных в конце предыдущего параграфа задач должно быть описание матрицы жесткости отдельного стержневого элемента, т.е. матрица жесткости содержит зависимость между перемещениями концов стержня $\{u\}_{ij}$ и возможными усилиями $\{F\}_{ij}$ для стержня, то есть нагрузокного состояния стержня.

Рассмотрим в качестве примера наряду плоского стержневого элемента, показанный на рис. 3.5.

Установим, что все приведенные выше в § 3, 4 и 5 зависимости относятся к некоторому стержню, ограниченному двумя крайними точками $i-j$, т.е., как правило, не будем интересоваться концами. Это не относится, однако, к вторичным зависимостям, отсутствующим у концов, если бы пренебречь в дальнейшем о них.

Чтобы сформулировать зависимость концов стержня, получим описание $\{u\}_{ij}$ в зависимости положения других параметров, кроме упомянутых выше зависимостей. Схема деформации стержня в таких условиях показана на рис. 4.1.



Рис. 4.1.

Видим разность сдвигов, удружающих концы стержня при заданных смещениях.

В рассматриваемом случае сдвиги являются прямыми стержня перекрывающимися сдвиги и наклонами концов разнонаправленными.

акции дифференциала связи сдвигов в двух направлениях параллельно друг другу оси сдвигов, имеющим абсолютную величину $\frac{B}{S}$, где S — площадь поперечного сечения стержня; B — ширина; E — модуль упругости материала.

С учетом этого (матрица) подавления силы вектор $\{F\}_{ij,ij}$ имеет вид

$$\begin{bmatrix} F_{11} \\ F_{21} \\ F_{31} \\ F_{41} \\ F_{51} \\ F_{61} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E S \\ 0 \\ 0 \\ -E S \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} . \quad (4.1)$$

В равенстве (4.1) введены специальные обозначения $\{u_{ij}, u_{ij}, \dots, u_{ij}\}$ для компонентов вектора $\{u\}_{ij,ij}$ в соответствующем случае, когда единственным отличием от вида является сдвигами концов сечений x_3 , разные единицы.

Были определены $\{u\}_{ij}$, отличие от вида, но не разное единице, а остальные компоненты вектора смещения $\{u\}_{ij}$ былинуль, которые усиливают следующую зависимость, выражение которой приводит связь приведенных зависимостей между упомянутыми в сопоставлении с смещениями

$$\begin{bmatrix} F_{ij} \\ F_{1j} \\ F_{2j} \\ F_{3j} \\ F_{4j} \\ F_{5j} \\ F_{6j} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{21} \\ K_{31} \\ K_{41} \\ K_{51} \\ K_{61} \end{bmatrix} . \quad (4.2)$$

Но выражение (4.2) показывает, что величины $\{u_{ij}, u_{ij}, \dots, u_{ij}\}$, определяемые равенством (4.1), определяют собой первые степени циклической матрицы жесткости стержня.

Второй способ измерения жесткости подавления, если определены разности сдвигов, удружающих концы стержня, при задании вектора перемещений в виде (рис. 4.2)

$$\{u\} = [0, 1, 0, 0, 0, 0] \quad (4.3)$$



Рис. 4.2

Поскольку в соответствии с постановкой гипотетической теории погрешность удлинения оси стержня при изгибе и сдвиге следуют пропорционально, получим

$$R_{xy} = R_{xz} = 0. \quad (4.1)$$

для отыскания остаточных изгибывающих сил, показанных на рис. 4.2, воспользуемся теорией линий моментов.

Положим, что угол поворота изгибных сечений однозначно определен силами (рис. 4.3), вызванными действием изгибающего момента (с учетом погрешности сдвига) некоей под-

$$\left. \begin{aligned} M_{xy} - \frac{M_{xy}}{G E I} \left(1 + 6 \frac{E I}{G E I} x \right) &= - \frac{M_{xy}}{G E I} \left(1 + \frac{E}{2} \right), \\ M_{yz} - \frac{M_{yz}}{G E I} \left(1 + 3 \frac{E I}{G E I} x \right) &= - \frac{M_{yz}}{G E I} \left(1 + \frac{E}{4} \right). \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

33

$$Q = 12 \frac{E I}{G E I} x.$$

В соответствии со схемой рис. 4.3, если изгибающие изгибающие сечений стержневого элемента длиной a есть разные числа, это позволяет получить два уравнения

$$\left. \begin{aligned} \frac{K_{xy} b}{3 E I} \left(1 + \frac{E}{4} \right) - \frac{K_{xy} b}{3 E I} \left(1 - \frac{E}{2} \right) - \frac{1}{a} &= 0, \\ - \frac{K_{yz} b}{3 E I} \left(1 - \frac{E}{2} \right) - \frac{K_{yz} b}{3 E I} \left(1 + \frac{E}{4} \right) - \frac{1}{a} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

34

В соответствии со схемой рис. 4.3, если изгибающие изгибающие сечений стержневого элемента длиной a есть разные числа, это позволяет получить два уравнения

$$\left. \begin{aligned} \frac{K_{xy} b}{3 E I} \left(1 + \frac{E}{4} \right) - \frac{K_{xy} b}{3 E I} \left(1 - \frac{E}{2} \right) - \frac{1}{a} &= 0, \\ - \frac{K_{yz} b}{3 E I} \left(1 - \frac{E}{2} \right) - \frac{K_{yz} b}{3 E I} \left(1 + \frac{E}{4} \right) - \frac{1}{a} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

35

В соответствии со схемой рис. 4.3, если изгибающие изгибающие сечений стержневого элемента длиной a есть разные числа, это позволяет получить два уравнения

$$\left. \begin{aligned} \frac{K_{xy} b}{3 E I} \left(1 + \frac{E}{4} \right) - \frac{K_{xy} b}{3 E I} \left(1 - \frac{E}{2} \right) - \frac{1}{a} &= 0, \\ - \frac{K_{yz} b}{3 E I} \left(1 - \frac{E}{2} \right) - \frac{K_{yz} b}{3 E I} \left(1 + \frac{E}{4} \right) - \frac{1}{a} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

Приложив уравнения (4.6) к эндо-

$$\left. \begin{aligned} 2 K_{xy} \left(1 + \frac{E}{4} \right) - K_{xy} \left(1 - \frac{E}{2} \right) &\approx \frac{6 E I}{G E I}, \\ - K_{yz} \left(1 - \frac{E}{2} \right) + 2 K_{yz} \left(1 + \frac{E}{4} \right) &\approx \frac{6 E I}{G E I}, \end{aligned} \right\} \quad (4.6)$$

получим из равенств

$$K_{xy} = \frac{6 E I}{G E I} \frac{1}{1 + \frac{E}{2}}, \quad K_{yz} = \frac{6 E I}{G E I} \frac{1}{1 + \frac{E}{2}}. \quad (4.7)$$

Значения усилий $P_x = K_{xy}$ и $P_y = K_{yz}$ (рис. 4.2) определяются, начиная с реакции второго зажима, последовательно в каждом из четырех сегментов стержня моментами

$$x_{xy} = \frac{12 E I}{G E I} \frac{1}{1 + \frac{E}{2}}, \quad x_{yz} = - \frac{12 E I}{G E I} \frac{1}{1 + \frac{E}{2}}. \quad (4.8)$$

Объединяя результаты (4.4), (4.5), (4.6), получим второй столбец матрицы жесткости стержня

$$\left[F \right]_{\text{ст}2} = \begin{bmatrix} K_{xy} \\ K_{yz} \\ K_{yy} \\ K_{zz} \\ K_{xz} \\ K_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{12 E I}{G E I} \frac{1}{1 + \frac{E}{2}} \\ \frac{12 E I}{G E I} \frac{1}{1 + \frac{E}{2}} \\ 0 \\ - \frac{12 E I}{G E I} \frac{1}{1 + \frac{E}{2}} \\ \frac{12 E I}{G E I} \frac{1}{1 + \frac{E}{2}} \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

При произвольном значении параметра M_x усилия $[F]$ определяются в соответствии с зависимостью

$$\left[F \right] = \begin{bmatrix} K_{xy} \\ K_{yz} \\ K_{yy} \\ K_{zz} \\ K_{xz} \\ K_{yz} \end{bmatrix} M_x. \quad (4.10)$$

Дополнительные пути могут быть найдены с помощью методов матричного моделирования стержня.

Так, например, для отыскания третьего столбца $\{K_{xy}, K_{yz}, \dots, K_{zz}\}$ должны быть заданы начальные усилия, исходящие из стержня в положении, определяемом некоторым

запасных перемещений (рис. 4.4)

$$\{u\} = \{0, 0, 1, 0, 0, 0\}.$$

Применив формулу пятого момента и начиная решить опору, находим

$$\begin{aligned} & \{K_{11}, K_{12}, K_{21}, K_{45}, K_{55}, K_{65}\} = \\ & = \left[0, \frac{EI}{3(1+\Phi)}, \frac{EI}{3(1+\Phi)}, 0, -\frac{EI}{3(1+\Phi)}, \frac{EI}{3(1+\Phi)} \right]. \quad (4.12) \end{aligned}$$

При произвольном значении перемещения u_3 в разложение в ряд оставшихся коэффициентов входит синусоидальный ход элемента, вектор решения определяется зависимостью

$$\{F\} = \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{12} \\ K_{21} \\ K_{45} \\ K_{55} \\ K_{65} \end{bmatrix} u_3 \quad (4.13)$$

Для вычисления четырехугольного, пятого и шестого отсеков матрицы жесткости необходимо рассмотреть схемы деформации стержневого элемента, определяющие векторы смещения (рис. 4.5, 4.6, 4.7).

$$\{u\} = \{0, 0; 0, 1, 0, 0\}; \{u\} = \{0, 0, 0, 0, 1, 0\}; \{u\} = \{0, 0, 0, 0, 0, 1\}.$$



Рис. 4.4

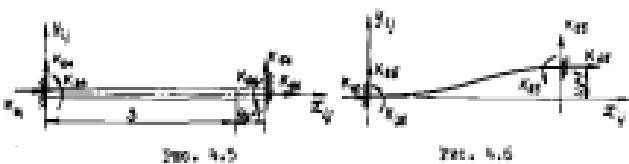


Рис. 4.5

Рис. 4.6

Формулы полных единичных форм синусоидальной стержневой элементов, изображенных на рис. 4.1 и 4.5, 4.2 и 4.6, 4.3 и 4.7, соответственно

пятого момента

$$\begin{aligned} & \{F\}_{u_1=1} = \{F\}_{u_2=1} \\ & = \left[\begin{array}{c} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{array} \right] \text{ имеет} \end{aligned}$$

коэффициенты, зависящие по абсолютной величине с ко-

эффициентами узлов $\{F\}_{u_1=0}, \{F\}_{u_2=0}, \dots, \{F\}_{u_6=0}$.

В цепях для стержневого элемента, работающего типа (рис. 3.5), матрица жесткости имеет вид

$$\begin{bmatrix} \frac{EI}{3} & 0 & 0 & -\frac{EI}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{EI}{3(1+\Phi)} & \frac{EI}{3(1+\Phi)} & 0 & -\frac{EI}{3(1+\Phi)} & \frac{EI}{3(1+\Phi)} \\ 0 & \frac{EI}{3(1+\Phi)} & \frac{EI}{3(1+\Phi)} & 0 & -\frac{EI}{3(1+\Phi)} & \frac{EI}{3(1+\Phi)} \\ 0 & -\frac{EI}{3(1+\Phi)} & -\frac{EI}{3(1+\Phi)} & 0 & \frac{EI}{3(1+\Phi)} & -\frac{EI}{3(1+\Phi)} \\ 0 & \frac{EI}{3(1+\Phi)} & \frac{EI}{3(1+\Phi)} & 0 & -\frac{EI}{3(1+\Phi)} & \frac{EI}{3(1+\Phi)} \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

в соответствии с разложениями (4.2), (4.11), (4.13) и подобными им узловыми $\{F\}_{u_1=0}, \{F\}_{u_2=0}, \{F\}_{u_3=0}, \dots, \{F\}_{u_6=0}$, матрица $[K]$ позволяет установить единство зависимости между векторами единичных узловых и единичных для стержня $\{u\}$

$$\{F\}_{ij} = [K]_{ij} \{u\}_{ij}. \quad (4.15)$$

Выражение равенства (4.15) также в симметричной форме

$$F_m^{ij} = \sum_{n=1}^6 K_{mn}^{ij} u_n^{ij} \quad (m=1, 2, 3, \dots, 8), \quad (4.16)$$

где: u_n^{ij} — компоненты матрицы $[u]_{ij}$; F_m^{ij} и u_n^{ij} — компоненты векторов конечных элементов в единицах соответствующих

Задача №10 (рис. 4.14) дала некоторое для стержневого элемента, приведенного на рис. 4.5. Из нее, однако, путем вычерчивания соответствующих строк с отходами могут быть найдены нагрузки для каждого "тесла" этого элемента, показанных на рис. 3.3 и 3.4.

Так, нагрузка [6] для элемента рис. 3.3 следует из (4.14) при вычерчивании строк 3-4, 2-3, 4-5 в ряд и отходах с теми же номерами.

Нагрузка для элемента рис. 3.4 будет найдена, если в (4.14) вычеркнуть строки и столбцы с первыми номерами 1 и 4.

для извлечения нагрузкиности стержня, показанного на рис. 3.6, необходимо дополнительное определение коэффициентов пропорциональности между крутящими моментами, расположенным в коэффициентах стержневого элемента и углом поворота конца при заданных стержнями.

Считаем, что в практических задачах прочностного анализа конструкций, состоящих из блоков открытого профиля (швеллеры, бортовые перегородки и т.д.), как правило, жесткость стержней при кручении игнорируется. Это связано с тем, что коэффициенты закручивания открытого профиля при чистом кручении весьма низки, поэтому, при необходимости учесть влияние жесткости стержней открытого профиля при чистом кручении может быть разработан с использованием известной формулы для коэффициента жесткости профиля, составленного из плоск

$$G_{sp} = \frac{1}{3} G \sum_i \delta_i \delta_i^2, \quad (4.17)$$

где δ_i , δ_i^2 - первая и вторая i -я полосы, входящий в состав профиля.

При наличии прямых длинных перегородок с дверьми или в других местах конструкций необходимо принимать во внимание, что в действительности их поперечные и продольные сечения представляют собой ряд замкнутых контуров (рис. 4.8).

После вычерчивания последних исходных конструкции для выполнения системы блоков узлов открытого профиля, такие показаны на рис. 4.9.

Следует, однако, учитывать, что жесткость на кручение

замкнутых контуров может за несколько десятичных порядков превышать аналогичную жесткость профилей открытых.

С целью представления свойств стержневых систем, приведенных в качестве расчетной схемы, в соответствии реальной конфигурации следует определить коэффициенты жесткости блоков из кружечек, изображая сквозь замкнутые контуры, отрезками участками окружки второго для и дуги в квадрате, проходящими по средним граням стержней (рис. 4.9).

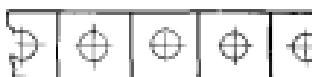


Рис. 4.8

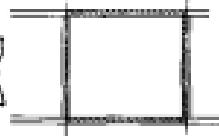


Рис. 4.9

Коэффициент жесткости при чистом кручении практической толстостенной замкнутой "трубки", состоящей из полос, определяется формулой, известной из курса сопротивления материалов

$$G_{sp} = 4 \cdot \tilde{B}^2 G \sum_i \frac{\delta_i}{\delta_1}, \quad (4.18)$$

где \tilde{B} - площадь, ограниченная контурами трубки;

δ_1 , δ_i - первая и i -я полосы.

В некоторых задачах кручение стержней открытого профиля должно быть разобрано с учетом влияния дверинок, перегородок, межкомнатных перегородок с дверьми стержней конструкции, а перемещаемость прутового элемента по длине должна, в общем случае это потребует введение двух дополнительных степеней свободы перемещений концов сечения, определяемых в соответствии с законом симметричных плоскостей дополнения этих сечений, и другим обобщенным силам - фиксациям.

В связи с относительно низкими значениями коэффициентов стесненного кручения открытых профилей в расчетах прочности одиночных конструкций, получаем соответствующие значение нагрузки жесткости в головке не рассматриваются.

Дополнительные стержни рис. 3.6 испытывают чистое кручение, когда второй стальной материал жесткости

$$\{K_{13} K_{23} K_{33} K_{12} K_{21}\} = \{0, C_{ap}, 0, 0, -C_{ap}, 0\}, \quad (4.19)$$

где C_{ap} – коэффициент жесткости стержня при чистом изгибе. Этот стержень имеет вид, изображенный (4.19),

$$\{K_{13} K_{23} K_{33} K_{12} K_{21}\} = \{0, -C_{ap}, 0, 0, C_{ap}, 0\}. \quad (4.20)$$

Изменяя (4.19) и (4.20), а также значения компонентов матрицы (4.16), которую находит все компоненты матрицы жесткости рассмотренного стержня.

В общем случае изгиба и кручения стержневого элемента пространственной конструкции (рис. 3.7) матрица жесткости, имеющая порядок 12×12 , состоит из компонентов, соединенных по форме с изложенным в матрице (4.16), а также векторов (4.19) и (4.20).

Таким образом, изгиба и кручения стержневого элемента в двух плоскостях, раскидных и других, используя принципы работы изогнутых для компонентов, можно найти все члены матрицы жесткости стержня рис. 3.7.

Подчеркнем симметрию матриц жесткости относительно главной диагонали.

Эта симметрия является следствием свойства симметрии редукт (вектора редукт), подробно рассмотренного в курсе сопротивления материалов.

5.2. ВЛИЯНИЕ ТИПОВЫХ ЗАГРУЗОК ЭЛЕМЕНТА. ПРИБЛИЖЕННАЯ МАТРИЦА ЖЕСТКОСТИ К ВЕРХНЕЙМОСТОЙКОМУ ВИДУ

Если стержневой элемент загружен изогнутым силами, то в его концевых сечениях сразу действуют некоторые усилия и при полном зазоре между винтами (устранении первоначальной конечной отверстия), т.е. матрица $\{u\} = \{0, 0, 0, 0, 0, 0\}$.

Рассмотрим в качестве примера стержня, тип показанного на рис. 3.5, при действии на него равномерно распределенной поперечной нагрузки (рис. 5.1).

Силы и моменты, действующие в концевых сечениях элемента при полном устранении конечной отверстия, обозначены в векторах [5].

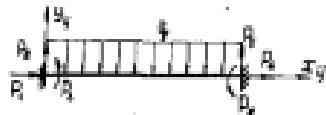


Рис. 5.1

Очевидно, все составляющие вектора $\{P\}$ могут быть найдены или решены вектор жестко заданный по концы силы. Для стержня, изображенного на рис. 3.1, получим в табличном виде, выражении

$$\{P\} = \left\{ 0; \frac{qL^3}{2}; \frac{qL^2}{12}; 0; \frac{qL^3}{2}; -\frac{qL^2}{12} \right\}. \quad (5.1)$$

Подобным образом определяются векторы $\{P\}$ при любом виде загрузки стержневого элемента.

По сказанному видно, что соотношение (4.19) переходит в общую форму для конечных сил, действующих в концевых сечениях стержня.

для стержней, имеющих внешнее нагружение в привате, подобные значения узловых $\{Y\}$ складываются из двух составляющих:

$$\{F\}_{ij} = \{K\}_{ij}\{u\}_{ij} + \{P\}_{ij}, \quad (5.2)$$

формула (5.2) в разрез матрицы и в стержни, ее называему в прямой загрузки, для которого $\{P\}_{ij}$ - прямой вектор.

Для матричной начальной матрицы и стендов узловых загрузок во многих случаях удобно использовать безразмерную форму представления их компонентов.

Наше преобразование в безразмерному виду матрицы для матриц строкам рас. 3.4, этот вид стержни находят часто применяется в расчетах прочности сущих быстрых конгруэнтных.

При этом за единицу измерения некоторого величины длины λ_0 , нагрузки Q_0 , момента изгиба I_0 , площади E_0 , модуля упругости E_0 .

Возможность записи единиц измерения некоторых величин

$$u_1 = u_1^0 \lambda_0, \quad u_2 = u_2^0, \quad u_3 = u_3^0 \lambda_0, \quad u_4 = u_4^0,$$

дополнительные безразмерные коэффициенты могут быть использованы для представления как

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= F_1^0 \frac{E_0 I_0}{\lambda_0^2}, \quad F_2 = F_2^0 \frac{E_0 I_0}{\lambda_0}, \quad F_3 = F_3^0 \frac{E_0 I_0}{\lambda_0^2}, \\ F_4 &= F_4^0 \frac{E_0 I_0}{\lambda_0}; \quad P_1 = P_1^0 Q_0, \\ P_2 &= P_2^0 Q_0, \quad P_3 = P_3^0 Q_0 \lambda_0, \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

Запись в качестве примера первую строку равенства (5.2) применительно к стержни рас. 3.4, находим четыре возможных выражения компонентов сечений

$$F_1 = K_{11} u_1 + K_{12} u_2 + K_{13} u_3 + K_{14} u_4 + P_1. \quad (5.4)$$

Подставив в (5.4) значение (5.3), получим

$$F_1^0 \frac{E_0 I_0}{\lambda_0^2} = K_{11} u_1^0 \lambda_0 + K_{12} u_2^0 + K_{13} u_3^0 \lambda_0 + K_{14} u_4^0 + P_1^0 Q_0,$$

то есть

$$F_1^0 = K_{11}^0 u_1^0 + K_{12}^0 u_2^0 + K_{13}^0 u_3^0 + K_{14}^0 u_4^0 + P_1^0 \frac{Q_0 \lambda_0^2}{E_0 I_0}, \quad (5.5)$$

где

$$K_{11}^0 = K_{11} \frac{\lambda_0^2}{E_0 I_0}, \quad K_{12}^0 = K_{12} \frac{\lambda_0^2}{E_0 I_0}, \quad K_{13}^0 = K_{13} \frac{\lambda_0^2}{E_0 I_0}, \quad K_{14}^0 = K_{14} \frac{\lambda_0^2}{E_0 I_0}.$$

Подобным образом могут быть преобразованы все строки единичной матрицы (5.2).

В матричной форме

$$\{F^*\}_{ij} = \{K^*\}_{ij} \{u^*\}_{ij} + \{P^*\}_{ij} \frac{Q_0 \lambda_0^2}{E_0 I_0}. \quad (5.6)$$

Компоненты безразмерной матрицы известны стержни рас. 3.4 приведены ниже

$$\left[K^* \right] = \frac{1}{E_0 I_0} \left[\begin{array}{cccc} \frac{\lambda_0^2}{\lambda_0^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\lambda_0^2}{\lambda_0^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\lambda_0^2}(4-\Phi) & -\frac{1}{\lambda_0^2}(2-\Phi) \\ -\frac{1}{\lambda_0^2}(2-\Phi) & 0 & -\frac{1}{\lambda_0^2}(2-\Phi) & \frac{1}{\lambda_0^2}(4-\Phi) \end{array} \right] \quad (5.7)$$

Подстановка равенств (5.2) и (5.6) дает все дальнейшие преобразования и окончательное выражение единичного прямого для узловыми и безразмерными матриц.

§ 6. ПРЕПРЕДСТАВЛЕНИЕ МАТРИЦЫ СВОБОДЫ СТЕРЖНЯЩЕГО ЭЛЕМЕНТА В СИСТЕМЕ ГЛОБАЛЬНЫХ КООРДИНАТ ПРИ ПЕРЕХОДЕ ОТ ЛОКАЛЬНОЙ К ОБЩЕЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

В предыдущем параграфе для получения соотношения между локальными системами координат и соответствующими стержневыми элементами было применено локальную систему координат, вибратором которой обозначен стержневой элемент.

Для получения различных операций элементного вибратора § 5 также получение развернутой системы уравнений требует перехода к общей системе координат, относительно которой определены перемещения удаленных точек системы $\{V\}$. Для такого перехода сначала определяются взаимодействия узловых (точечных) перемещений (коэффициенты) в узловых точках.

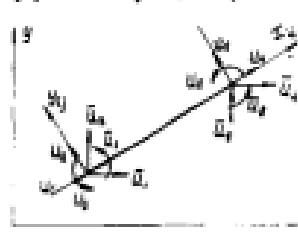


Рис. 6.1

Матрица развернутых коэффициентов единицы единицы элемента в локальной системе координат, а $[U_i]$ — единицы тех же коэффициентов в общей системе координат (рис. 6.1).

Матрица развернутых коэффициентов локальной системы координат $[A]$ в рассматриваемом случае имеет вид

$$[A] = \begin{bmatrix} \ell_1, \ell_2, 0 \\ m_1, m_2, 0 \\ 0, 0, 1 \end{bmatrix}. \quad (6.1)$$

Между компонентами единиц в двух системах координат имеются следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \bar{U}_1 \ell_1 + \bar{U}_2 m_1; & u_2 &= \bar{U}_2 \ell_1 + \bar{U}_3 m_1; \\ u_3 &= \bar{U}_1 \ell_2 + \bar{U}_2 m_2; & u_4 &= \bar{U}_2 \ell_2 + \bar{U}_3 m_2; \\ u_5 &= \bar{U}_3; & u_6 &= \bar{U}_4. \end{aligned} \right\} \quad (6.2)$$

В матричной форме для элемента $i-j$

$$\{u\}_{ij} = [B]_{ij} \{U\}_{ij}. \quad (6.3)$$

При

$$[B] = \begin{bmatrix} \ell_1 m_1, 0 & 0 & 0 \\ \ell_2 m_2, 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (6.4)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \ell_1, \ell_2, 0 \\ m_1, m_2, 0 \\ 0, 0, 1 \end{bmatrix}$$

матрица $[B]$ имеет вырожденческую структуру и может быть представлена в форме

$$\begin{bmatrix} [A]^T & [B] \\ [B] & [A]^T \end{bmatrix}. \quad (6.5)$$

Равенство (6.3) было получено применительно к стержням, имеющим лишь степень свободы перемещения концов. Нетрудно убедиться, что это в разной мере относится к любому стержневому элементу.

От таких элементов зависит, однако, структура матрицы $[B]$. Так, например, для элемента, имеющего в локальной системе координат четыре степени свободы перемещения концов число компонентов единиц в общей системе равно шести (рис. 6.2).

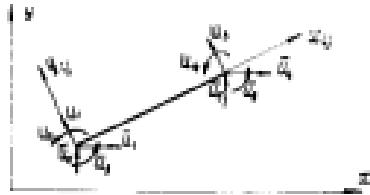


Рис. 6.2

Матрица $[D]$, осуществляемая преобразованием (6.3) для вектора рис. 6.2, имеет вид

$$[D] = \begin{bmatrix} e_1 m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_2 m_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6.6)$$

Для стержней пространственной рамы, имеющего девятьдцать степеней свободы выражение можно (см. рис. 3.7), матрица $[D]$ имеет следующую структуру

$$[D] = \begin{bmatrix} [\lambda]^T [e] [e] \\ [0] [\lambda]^T [e] \\ [0] [e] [\lambda]^T \end{bmatrix}, \quad (6.7)$$

где $[\lambda]$ — полная матрица координатных конусов.

С помощью изображенных выражений можно убедиться, что матрицы $[D]$ удовлетворяют равенству

$$[D][D]^T - [D]^T[D] = [I]. \quad (6.8)$$

Покажем это на примере матрицы (6.5)

$$[D]^T[D] = \begin{bmatrix} [\lambda][\lambda]^T & [0] \\ [0] & [A][A]^T \end{bmatrix} = \quad (6.9)$$

результате (6.1), видим

$$[A][A]^T = \begin{bmatrix} e_1^2 + e_2^2 & e_1 m_1 + e_2 m_2 & 0 \\ e_1 m_1 + e_2 m_2 & m_1^2 + m_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

что и доказывает справедливость (6.8).

Из равенства (6.8) следует, что $[D]^T = [D]^{-1}$, т.е. матрица $[D]$ $^{-1}$, обратная $[D]$, может быть легко получена с помощью операции транспонирования.

Выполним равенство (6.3) сначала на $[D]^T$, получим

$$\{\bar{u}\}_{ij} = [D]_{ij}^T \{u\}_{ij}. \quad (6.10)$$

Воспользовавшись выражением вектора $\{\bar{v}\}$, ориентированного относительно всех координатных осей, как в компонентах вектора определенного $\{u\}$, зависимости, аналогичные (6.3) и (6.10), могут быть получены и для вектора сил.

В частности,

$$\{\bar{F}\}_{ij} = [D]_{ij}^T \{\bar{F}\}_{ij}, \quad (6.11)$$

где $\{\bar{F}\}_{ij}$ — вектор усилий, действующий в концах стержней стержня, определенный для общей системы координат.

Заменив в (6.11) матрицу $[D]_{ij}$ с помощью зависимости (6.2), видим

$$\{\bar{F}\}_{ij} = [D]_{ij}^T [\kappa]_{ij} \{u\}_{ij} + [D]_{ij}^T \{\bar{p}\}_{ij}. \quad (6.12)$$

Но из условия (6.3)

$$\{\bar{F}\}_{ij} = [D]_{ij}^T [\kappa]_{ij} [D]_{ij} \{u\}_{ij} + [D]_{ij}^T \{\bar{p}\}_{ij}, \quad (6.13)$$

рассмотрим (6.13) и видим формуально в виде, аналогично (6.2)

$$\{\bar{F}\}_{ij} = [\kappa]_{ij} \{u\}_{ij} + \{\bar{p}\}_{ij}, \quad (6.14)$$

так

$$[\kappa]_{ij} = [D]_{ij}^T [\kappa]_{ij} [D]_{ij} + \{\bar{F}\}_{ij} - [D]_{ij}^T \{\bar{p}\}_{ij} \quad (6.15)$$

- матрица интенсивности стержня в вектор усилий загружен, определены в единой системе координат.

Задаваясь (6.16) возможной относительной пристрои - путем вычисления матричного произведения - определять компоненты матрицы интенсивности и усилий загружен в общей системе координат, если известны соответствующие матрицы в локальной системе.

Равенство (6.16), так же как и остальные, предполагают и то и δ и θ , относятся к некоторому стержню, ограниченному узлами $i-j$ (при этом узел i в начале δ и θ идущий выше записаны не будут). Предполагая для удобства, что стержни решены пронумерованы (написаны римскими цифрами), компонентность равенства (6.16) для всех стержней представим в виде одного матричного равенства:

$$\begin{bmatrix} \{F\}_1 \\ \{F\}_2 \\ \vdots \\ \{F\}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\mathbf{R}]_1 [\mathbf{U}]_1 \dots [\mathbf{U}]_k \\ [\mathbf{R}]_2 [\mathbf{U}]_1 \dots [\mathbf{U}]_k \\ \vdots \\ [\mathbf{R}]_k [\mathbf{U}]_1 \dots [\mathbf{U}]_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \{\bar{P}\}_1 \\ \{\bar{P}\}_2 \\ \vdots \\ \{\bar{P}\}_k \end{bmatrix}, \quad (6.16)$$

или

$$\{F\} = [\mathbf{R}] \{U\} + \{\bar{P}\}, \quad (6.17)$$

где $\{F\}$, $\{\bar{P}\}$, $\{U\}$ - блочная структура, состоящая из векторов усилий и перемещений всех стержней системы; $[\mathbf{R}]$ - блочная квазидиагональная матрица, состоящая из матриц интенсивности стержней системы.

Помечаем, что компоненты всех матриц в (6.17) определены в единой системе координат.

§ 7. УСЛОВИЯ НЕПРЕРЫВНОСТИ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ (СОВОДНОСТЬ СИСТЕМЫ) В ГЛЮБОХ ТОЧКАХ

Непрерывность стержневой системы в глобальных точках означает одноточечной, если выполняется равенство перемещений концов сочлененных стержней, сходящихся в данной точке, и переключения самого угла.

Это положение, представленное в числовом виде, позволяет получить в явной форме зависимость между векторами $\{V\}$ и

$$\{u\} = \{u\}_1; \{u\}_2 \dots \{u\}_k .$$

Рассмотрим для наглядности производимый $i-j$ стержнем разрез вместе с ограничениями его узлами (рис. 7.1). Проста V_{1i} , V_{1j} , V_{2i} , V_{2j} - компоненты вектора $\{V\}_i^T$, определенные в узле i ; V_{ki} , V_{kj} , V_{mi} , V_{mj} - аналогичные компоненты для узла j .

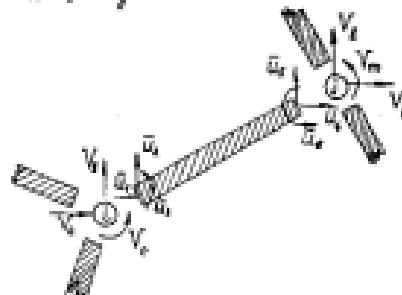


Рис. 7.1

Условия одновременности независимых узловых точек выражаются на выражении коэффициентов сжатий $i = j$ обратной, определяемой следующими равенствами

$$\left. \begin{aligned} \bar{U}_1^{(j)} = V_{a_1}, & \quad \bar{U}_2^{(j)} = V_{a_2}, \\ \bar{U}_3^{(j)} = V_{b_1}, & \quad \bar{U}_4^{(j)} = V_{b_2}, \\ \bar{U}_5^{(j)} = V_{c_1}, & \quad \bar{U}_6^{(j)} = V_{c_2}. \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

Если N - общее число степеней свободы перенесения узлов системы (число компонентов вектора $\{V\}$), то равенства (7.1) могут быть записаны с помощью матрицы $[A]_{ij}$, имеющей порядок $6 \times N$

$$\{U\}_{ij} = [A]_{ij}\{V\}. \quad (7.2)$$

Матрица $[A]_{ij}$ в первой строке должна иметь все компоненты равными нулю, за исключением стоящего в столбце с номером "а", этот компонент должен быть равен единице. Во второй строке должны, кроме единицы, следить ненулевые в столбце с номером "б", в остальных компонентах строки подавать равные нули. В третьей строке единица должна стоять в столбце с номером "с" и т.д.

Общий вид матрицы $[A]_{ij}$ показан ниже, причем для обозначения ячеек требуются числа a, b, c, d, e, f , при этом должны соблюдаться условия в порядке непрерывного ряда:

Номера	i	j	a	b	c	d	e	f	m	n	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
\bar{U}_1	1	1	0	0	...	1	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0
\bar{U}_2	2	1	0	0	...	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
\bar{U}_3	3	1	0	0	...	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
\bar{U}_4	4	1	0	0	...	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
\bar{U}_5	5	1	0	0	...	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
\bar{U}_6	6	1	0	0	...	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Равенства типа (7.2) с соответствующими матрицами для всех старших систем могут быть обобщены в едином матричном выражении

$$\begin{bmatrix} \{u\}_1 \\ \{u\}_2 \\ \vdots \\ \{u\}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [A]_1 \\ [A]_2 \\ \vdots \\ [A]_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_6 \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

или

$$\{u\} = [A]\{V\}. \quad (7.4)$$

Порядок матрицы $[A]$ в общем случае равен $(p/2) \times N$, где p - число степеней свободы перенесения концентрических сечений "внешнего" стержня в общей системе координат; N - число степеней в системе.

Рассмотрим в качестве примера построение матрицы $[A]$ для концентрической рамы таллера с двумя продольными бортиками. Для упрощения будем считать стержни рамы вертикальными, а приведенную нагрузку - симметричной относительно диаметральной плоскости. Принятое, что рама состоит из прямолинейных стержней, параллельных под прямым углом, является конечной моделью вертикального ядра в стебле листа прокатки, в частности борт, продольные бортиры, палубы и днище при шаге в плавности из расположения сечений бесконечно далекими. В соответствии с этим предположим, что края рамы, показанные на рис. 7.2,

представляют узлы в старшей раме, а также возможные перенесенные узлы представим на рис. 7.3.

Стальной элемент рамы симметричной системы имеет четыре степени свободы перенесения концентрических сечений (см. рис. 3.4).

Продольную стержневую раму можно перенесударить, если воспользоваться системой координат параллельных осей общей систе-

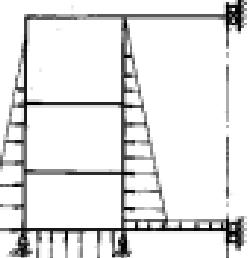


Рис. 7.2

и. Взаимное направление зеркальных вспомогательных стержней струнного звукового соединяет с направлениями узловых перенесений $\{V\}$.

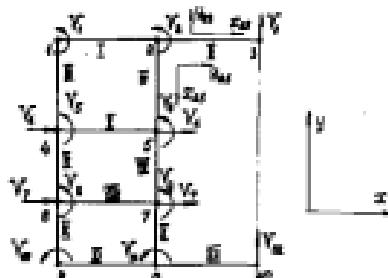


Рис. 7.3

Коэффициенты ориентации линейных обобщенных координат для всех стержней одинаковы, как это показано на рис. 7.3 для стержней 2-3 и 3-4, условия связности рамы в узловых точках, представлены в следующем виде:

для стержня 1-2

$$\left. \begin{array}{l} u_1=0, \quad u_2=0, \\ u_3=V_1, \quad u_4=V_2; \end{array} \right\} \quad (7.5)$$

для стержня 2-3

$$\left. \begin{array}{l} u_1=0, \quad u_2=V_3, \\ u_3=V_4, \quad u_4=0; \end{array} \right\} \quad (7.6)$$

для стержня 3-4

$$\left. \begin{array}{l} u_1=0, \quad u_2=V_6, \\ u_3=V_5, \quad u_4=V_4; \end{array} \right\} \quad (7.7)$$

и т.д.

Подставив результаты, можно писать для всех стержней рамы. Итак матрица $[A]_{ij}$, получим

$$[A]_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

что позволяет определить прямое вычисление узловых смещений, используя перемещения концов в линейных системах координат, т.е., не прибегая к предварительному преобразованию матрицы в общую систему координат,

и т.д.

Более straightforwardным можно считать, что элементами матрицы $[A]_{ij}$ являются преобразования, записанные равенствами (7.5)-(7.7):

$$\left. \begin{array}{l} \{u\}_{1j} = [A]_{1j}\{V\}; \quad \{u\}_{2j} = [A]_{2j}\{V\}; \\ \{u\}_{3j} = [A]_{3j}\{V\}. \end{array} \right\} \quad (7.8)$$

Однако матрица $[A]_{ij}$, видим общий матрицы $[A]$, порядок которой все узлырами смещениями, равно узловым точкам могут быть выражены в виде

$$\{u\} = [A]\{V\}. \quad (7.9)$$

Отметим, что матрица $[A]$ содержит в себе логическую информацию, поскольку, некие стержни и некие концы соединены с данной узлами.

**§ 8. СИСТЕМЫ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ $\{V\}$.
ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ В КУПОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ.
ПРОДОЛЖЕНИЕ И ОСНОВЫ ОДНОЙ В СОВРЕМЕННЫХ
СТРУКТУР.**

Исходная зависимость для составления системы уравнений равновесия узловых точек была получена в § 3 на основе применения правила возможных перемещений.

В равенстве (3.6), выражающем это правило, следует вычесть от выражения узловых и перемещений, определяемых в локальных координатах, к соответствующим усилиям и перемещениям в общей системе координат. Для перехода выполняется простое выражение $\{F\}$ из $\{\bar{F}\}$ и $\{u\}$ из $\{\bar{u}\}$, поскольку приведенные работы эквивалентны (одинаковы для любой системы координат), т.е.

$$\{\bar{F}\}^T \{du\} = \{\bar{F}\}^T \{\delta \bar{u}\}. \quad (8.1)$$

Будем основываться на зависимости (3.4) перемещений в виде

$$\{\bar{u}\}^T \{dv\} - \{\bar{F}\}^T \{\delta \bar{u}\} = 0. \quad (8.2)$$

В равенстве (8.2), вместо вектора $\delta \bar{u}$, следует подставить его значение, вытекающее из (3.4)

$$\{\delta \bar{u}\} = [\bar{A}] \{dv\}. \quad (8.3)$$

использовавшись далее зависимость (8.17), из которой следует

$$\{\bar{F}\}^T = \{\bar{u}\}^T [\bar{K}]^T + \{\bar{P}\}^T, \quad (8.4)$$

также, используя еще раз (3.4),

$$\{\bar{P}\} = \{v\}^T [\bar{A}]^T [\bar{K}]^T + \{\bar{F}\}^T. \quad (8.5)$$

На основании (8.4) и (8.5) равенство (8.2) получает вид

$$\{u\}^T - \{v\}^T [\bar{A}]^T [\bar{K}]^T [\bar{A}] - \{\bar{F}\}^T [\bar{A}] \{dv\} = 0. \quad (8.6)$$

Последнему $\{dv\}$ – производственный единичный вектор, равенство (8.6) может иметь место только в том случае, если в кружке обозначены выражения, стоящие в других скобках.

На этом основании, выражение операции трансформации под влиянием членами другой скобки, находим

$$[\bar{A}]^T [\bar{u}] [\bar{A}] \{v\} = \{u\} - [\bar{A}]^T \{\bar{F}\} \quad (8.7)$$

или

$$[\bar{K}] \{v\} = \{u\} . \quad (8.8)$$

В равенстве (8.8)

$$[\bar{K}] = [\bar{A}]^T [\bar{u}] [\bar{A}] \quad (8.9)$$

– матрица жесткости системы,

$$\{u\} = \{v\} - [\bar{A}]^T \{\bar{F}\} \quad (8.10)$$

– вектор равновесия узловых нагрузок системы.

Членами (8.6) предстаивает собой новую систему уравнений для отыскания перемещений узловых точек стержневой конструкции.

Решение уравнений (8.6) в символьической форме имеет вид

$$\{v\} = [\bar{K}]^{-1} \{u\} . \quad (8.11)$$

Физическое значение $\{v\}$ с помощью равенства (8.11) может быть преобразовано либо при помощи выражения системы (8.8), когда можно воспользоваться стандартными программами обработки матриц.

При малом количестве конструций бывает либо с системами, число уравнений в которых может состоять из нескольки десятков, либо, иногда, тысяч.

По всем этим случаям для решения системы (8.6) применяют либо метод Гаусса, требующий преобразования матрицы $[\bar{K}]$ в треугольную форму, либо итерационные методы.

После определения перемещений узловых точек – системы $\{v\}$ – с помощью перемещений матриц, могут быть найдены:

а) перемещения конечных сечений любого стержня в локальной системе координат;

$$\{u\}_{ij} = [\bar{K}]_{ij}^T [\bar{u}]_{ij} = [\bar{K}]_{ij}^T [\bar{A}]_{ij} \{v\}; \quad (8.12)$$

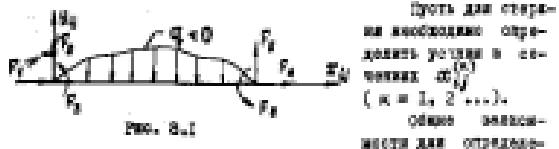
б) усилия, действующие в зоновых сечениях стержней

$$\{F\}_{ij} = [\bar{u}]_{ij} \{u\}_{ij} + \{\bar{P}\}_{ij}; \quad (8.13)$$

а) усилия, действующие в линии сечения в проекции между двумя точками.

В подавляющем большинстве случаев достаточно определять усилия, действующие в концах сечения. Однако иногда может потребоваться знание находящихся моментов и перераспределений сил во сечении переди отвертывания изгибаемых моментов или в других сечениях. Поэтому выше можно достаточно обобщить полученные ранее в проекциях сечения способы.

Рассмотрим в качестве примера изогнутую стержень, загруженную в промежутке между двумя точками некоторой поперечной нагрузкой (рис. 8.1).



$$\left. \begin{aligned} F_i(x^{(k)}) &= P_i, \\ F_k(x^{(k)}) &= P_k + \int_0^{x^{(k)}} q(u) du, \\ F_j(x^{(k)}) &= P_j - P_k x^{(k)} + \int_0^{x^{(k)}} q(u) du^2. \end{aligned} \right\} \quad (8.14)$$

Здесь $F_i(x^{(k)})$ — компоненты усилий в сечении $x^{(k)}$, соответствующие по числовому значению в линии изогнутого сечения.

Задачей алгоритма $x^{(k)}_{ij}$, сущесв., в котором определяются усилия, разные как и значения интегралов в (8.14), должна быть извлечение и расчет в линии сечения информации. Для этого, если конструкция является узким сечением, то необходимо выполнить действительную загрузку на линии заменить изогнутым сечением простой физической и это делается методом труда определить интегралы в (8.14). Формулы (8.14) можно выразить в комплексной матричной форме.

Обозначим

$$\{P(x^{(k)})\}_{ij} = \left\{ 0; \int_0^{x^{(k)}} q(u) du; \int_0^{x^{(k)}} q(u) du^2 \right\}. \quad (8.15)$$

Матрицы усилий, действующих в концах сечениях изгиба-
тия, представим в виде

$$\{F\}_{ij} = \begin{bmatrix} \{F\}_1 \\ \{F\}_2 \end{bmatrix}, \quad (8.16)$$

где $\{F\}_1$, $\{F\}_2$ — векторы усилий, приложенных к кон-
цам сечения i , j , соответствующим.

Для вектора усилий в сечении $x^{(k)}_{ij}$ из (8.14) имеем

$$\{F(x^{(k)})\}_{ij} = (0; 0; 0)_{ij} \{F\}_1 + \{P(x^{(k)})\}_{ij}. \quad (8.17)$$

Дано выражение

$$\{H\}_{ij} = \begin{bmatrix} 0; 0; 0 \\ 0; 0; 0 \\ 0; 0; 0 \end{bmatrix}_{ij}$$

и вектор $\{P(x^{(k)})\}_{ij}$ относится к исходной информации расчета и, следовательно, известен.

Задачи по (8.17) приводят для отрыва любого типа, однако, потому $\{H\}_{ij}$ и $\{P(x^{(k)})\}_{ij}$ в каждом конкретном слу-
чае должны быть определены в соответствии с исходными дан-
ными (8.14) для усилий в проекциях сечения отрыва.

**§ 9. ПРАКТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОФОРМЛЕНИЯ
МАТРИЦ [K] В ВИДЕ ТАБЛИЦЫ {G} .
МАТРИЦЫ ИДЕНТИКОВ**

Логическая матрица $[A]$, состоящая из групп и единиц, — не однозначима и не всегда удобная форма представления информации о соединении строк и столбцов с узлами точками. Поэтому подразделение матрицы $[A]$ связано с ее якобы порядком, что делает ее собой неизвестность обычного числа. Поэтому оперативная матрица Σ для хранения и переноски матриц в соответствии с заданностью (§.9).

Новейший способ соединения порядка перемещаемых матриц в (§.9) не слагает применения логической формы их записи, а соответствует ей вектором

$$\begin{aligned} [A]^T \cdot [S] \cdot [A] = & \left[\begin{array}{c} [A_1^T] \cdot [S] \cdots [S] \\ [A_2^T] \cdot [S] \cdots [S] \\ \vdots \\ [A_n^T] \cdot [S] \cdots [S] \end{array} \right] \cdot \left[\begin{array}{c} [A]_1 \\ [A]_2 \\ \vdots \\ [A]_n \end{array} \right] = \\ & = \sum_{j=1}^{n+2} [A]_j^T \cdot [S]_j \cdot [A]_j . \quad (9.1) \end{aligned}$$

Порядок перемещаемых матриц в ходе произведения, входящем в сумму (9.1), составляет

$$(M \otimes I) \cdot (I \otimes M) \cdot (I \otimes N) = (M \otimes N) .$$

Рядом с образами, логичной форме действительности позволяет существенно сократить порядок перемещаемых матриц.

Кроме того, возможна возможность формировать матрицу $[K]$ последовательными частями, используя для этой цели соответствующую группу матриц $[A]_j$ и $[S]_j$. Это означает-

то после формирования членов матрицы $[K]$ должна выполняться операция соединения конечностей для данной группы узловиков. Это позволяет значительно сократить число единиц оперативной памяти ОЗУ, необходимое для расчета конструции. Однако для разветвленных систем с большими часмами вспомогательные или удаленные пересечения не приводят к прямым связям начальников, тем самым матрицы $[A]_j$, содержащие большое число групп, являются некой компактной формой представления логической информации. Более важнейшее это информацией записывается в виде так называемой матрицы идентиков, которая вместе с тем позволяет в удобной форме защищаться передача начальников работе компьютера матрицы $[K]$.

Рассмотрим еще раз условия способности для строки $i-j$ реализации в виде группы различия (7.1). очевидно, что информация, содержащаяся в различиях (7.1) может быть представлена в виде соответствующими строками в табл. 9.1.

Таблица 9.1

В строках	Степени свободы перемещений ходов					
	1	2	3	4	5	6
...	***	***	***	***	***	***
$i-j$	6	5	4	3	2	1
...	***	***	***	***	***	***

Центральная строка из табл. 9.1 должна быть пространством следования образов у открытия $i-j$ перемещения M , развязки V_M , перемещение M развязки V_M и т.д. для того чтобы эти зафиксированы, в таблице достаточно иметь лишь подряд соответствующих перемещений.

Если необходимо из перемещения какой строки убрать какой-либо связанный с ней, выключив из спектра, в соответствующий ячейке таблицы должны быть поставлены прочерки.

Соединение строк табл. 9.1 для всех строк спектра и предоставляет собой матрицу идентиков.

Использование матрицы идентиков для структуры компактных матрица идентиков системы $[K]$ возможен на примере рис. Т.3.

матрица индексов этой рамы приведена в табл. 9.2.
таблица 9.2

Н.	Номера узловок сторон рамы	Столбцы свободы первоначальных узлов сторон рамы			
		1	2	3	4
I	I-2	-	1	-	2
II	2-3	-	2	3	-
III	I-4	-	1	4	3
IV	2-5	-	2	4	6
V	4-5	-	3	-	6
VI	4-6	4	5	7	8
VII	5-7	8	6	9	-
VIII	6-7	-	6	-	9
IX	6-8	7	8	-	10
X	7-8	7	9	-	11
XI	8-9	-	10	-	11
XII	9-10	-	11	12	-

На переданных матрицах жесткости выясняет, что ее компоненты предполагают собой условия, которые нужно привести к условиям точек сопряжения, чтобы удовлетворить им при заданных перемещениях, выраженных векторами

$$\left. \begin{aligned} \{V\}_1 &= \{1, 0, 0 \dots 0\} \\ \{V\}_{12} &= \{0, 1, 0 \dots 0\} \\ \{V\}_3 &= \{0, 0, 1 \dots 0\} \end{aligned} \right\}$$

и т.д.

На рис. 9.1 показано положение рамы при $\{V\} = \{V\}_1$, в соответствии с которым, реальные компоненты матрицы жесткости K_{11} , K_{12} , K_{21} и K_{22} - отличны от компонент первого столбца матрицы $[K]$ рамы пусты, поскольку при заданных условиях 2 и 3 не будут лежать на оставшихся узлах рамы.

Деформации стержней состоят рамы зависят от них, то есть, что и при определении компонентов K_{11} , K_{12} , K_{21} и K_{22} матрицы жесткости стержневых элементов $[k]_1 \times [k]_2$.

Чтобы показать, что на узле 1 действуют реальные двух стержней, для удовлетворения условиям сопряжения изображены

ту на угол $V_1 = I$, необходимо ввести компонент

$$K_{11} = K_{12}^T + K_{21}^T, \quad (9.2)$$

где K_{12}^T и K_{21}^T - компоненты матриц жесткости стержней I(1-2) и I(1-4).

Далее, необходимо для удовлетворения правого конца стержня I-2, для определения ранее

$$K_{21} = K_{22}^T. \quad (9.3)$$

По аналогичным соображениям

$$K_{41} = K_{42}^T \quad \text{и} \quad K_{51} = K_{52}^T. \quad (9.4)$$

Правило, в соответствии с которым определяемые выше компоненты K_{11} , K_{21} , K_{41} , K_{51} , следующим образом определяются в матрице индексов (табл. 9.2):

1) при определении

K_{11} - стоящими все стержни в стойках матрицы индексов, в которых встречаются индекса 1. Возьмем для этой цели матрицы из строк 1 в 1-2 и 4-5 стержней в стойке 2, то получим равенство (9.2);

2) при определении

K_{21} - находящиеся выше стержни, в которых имеются оба индекса 2 и 1, и т.д. 9.2 эти индекса содержатся только в строках 1-8, причем мы соответствуем строкам 4 и 2, т.е. K_{21} действительно должно определяться равенством (9.3).

Подставим же образцы в табл. 9.2 можно прочитать формулы (9.4).

В качестве примера приведены значения индексов, определяющих стойки стендов матрицы жесткости $[K]$.

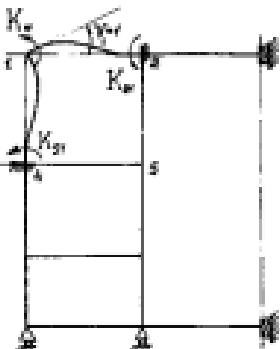


Рис. 9.1

$$\begin{aligned} K_{12} &= K_{24}^T ; & K_{34} &= 0 ; \\ K_{22} &= K_{11}^T + K_{33}^T + K_{44}^T ; & K_{13} &= 0 ; \\ K_{33} &= K_{11}^T ; & K_{14} &= 0 ; \\ K_{44} &= K_{33}^T + K_{22}^T ; & K_{23} &= 0 ; \\ K_{11} &= 0 ; & K_{32} &= 0 . \\ K_{21} &= \frac{B}{2} ; \\ K_{31} &= K_{41} ; \\ K_{41} &= 0 ; \end{aligned}$$

Матрицы коэффициентов позволяют найти неизвестные линейные компоненты неизвестности, а также содержит под для вычисления компонентов вектора $[A]^T \{P\}$, входящего в правую часть системы уравнений (3.2).

С помощью операции умножения матриц $[A]^T \times \{P\}$ выразимся для каждого узла типа симметрическое решения стержней, найденных при решении $\{V\} = 0$. Это приведет вполне аналогично рассмотренному выше к получению дополнительных матриц неизвестности $[K]$.

Запомним, в узле 1, имеем лишь один источник временного воз действия V_1 , должны быть просуммированы нагрузки P_1 , стержни 1 и нагрузка P_3 стержня 2. Но примера видно, что вектор $[A]^T \{P\}$ формируется не тому не правило, что и диагональные члены матрицы $[K]$. С помощью матрицы индексов (табл. 3.2) выражаем

$$\begin{aligned} Q_1 &= R_1 - (P_1^I + P_2^{II}) ; \\ Q_2 &= R_2 - (P_2^I + P_3^{II}) ; \\ Q_3 &= R_3 - P_3^I \end{aligned}$$

и т.д.

Матрицы индексов используются и на различительных этапах расчета для определения векторов $\{\pi\}_{ij}$ из известных сдвигов узлов системы.

§ 3. ПОГРЕШНОСТЬ СТЕРЖНЕЙ ЦИЛЕНДРИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА МЕТОДА РАСЧЕТА В ЗАДАЧАХ ПРОВОДЫ СУДОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Существуют следующие основные источники погрешностей при использовании рассмотренного выше метода для определения напряжений в судовых конструкциях.

1. Ошибка реальных конструкций корпуса судна отражается системами с количеством степеней свободы, в таких же количествах ограниченных числом степеней свободы перемещений отдельных элементов (включая деформации расширения-сжатия, изгиба искривления при движении изолированных структур в связи с неучетом стесненности кручения и т.д.).

2. Апроксимация силы перекрестного сечения в динамике, выраженная в конструкции, приводит к ошибкам стержневых элементов. Апроксимации давних нагрузок в процессах изменения фасонностью прямых функций.

3. Ошибки числа при выполнении начальных условий на зеркале.

Погрешности, возникающие при замене реальных судовых конструкций стержневыми системами, не являются специфической производительностью изученного метода расчета на прочность, но объемы для него традиционны подходов. Наряду с применением в стержневых моделях коридоров, есть идет с тем, несколько точнее результаты, которые могут быть получены при замене расчета прочности корпуса, или подкрепленной обобщенными, связывающими уравнениями расчетов изолированного бруса при общем нагружении, эквивалентном изолированным рамам, состоящим из разрезов и т.п.

Ответ на этот вопрос может быть получен на основе сравнения результатов приближенных расчетов с данными точечного изолированного изолированного и с данными практического анализа.

произведенного без использования базовых аппроксимаций.

Равнобедренные симметрические в плане краевые элементы новых конструкций типов судов не позволяют получить однозначную оценку погрешности, связанной с использованием стережек аппроксимации. Следует учитывать, что для любой конструкции можно найти несколько видов стережек, имеющих, отличавшихся друг от друга числом стержней, такие, называемые базовыми, числом узловых точек, связанных с числом погрешностей и т.д. Поэтому погрешность аппроксимации следует оценивать применительно к конкретным случаям решения реальной конструкции некоторой стережечной системой.

Так, например, можно считать утверждениями, что различные типы деформации корпуса (один из них) практически не зависят от влияния других видов деформации (второго порядка, поверхности и т.д., ради неизвестности и т.д.) и может быть рассчитан на основе принципов теории изгиба (изогиба) балок.

Рядом исследований подтверждена достаточная точность стережечной аппроксимации при анализе прочности изолирующих рам судостроения и нефтесудов судов. Установлено, допустимость представления давления перегородок в виде системы пересекающихся балок при условии учета влияния единого в стеках балки в местности балок на кручение.

Помимо в других примерах обоснованного применения стережечных аппроксимаций при анализе прочности корпуса и его отдельных конструкций.

Однако, что изученный метод позволяет, не сокращая возрастания объема расчетов, привести оценки схем стережечных систем, имеющих судовую конструкцию. На этом пути могут быть решены с удовлетворительной точностью многие проблемы прочности корпуса судов.

Расчеты погрешности, связанных с аппроксимацией балок вертикального сечения в балках с краевыми ячейками, применяются к различным элементам, и величины погрешности определения погрешности зависят от числа конечных элементов.

При расчетах стережечных систем погрешности методом конечных элементов при условии непрерывности перемещений в сечениях, совпадающих с узловыми точками, так и условия равновесия гладких точек. Поэтому по мере увеличения числа конечных элементов расчет давления в сечениях сгущается и так называемую точность расчета.

результатов, которые можно было бы найти, например, с помощью интегрирования дифференциальных уравнений методом стережек и определения производных коэффициентов из условий совпадения. Однако с увеличением числа узловых точек (элементов) возрастают потребность расчетов, связанных с ограничением величины числа шагов цифрового анализа времени, которые определяются ПДП (погрешность квартетов членов).

Зависимость ошибок, возникающих вследствие аппроксимации балок первого порядка производственных элементами и последовательного округления числа от количества элементов, может быть наглядно представлена в виде графика (рис. 10.1).

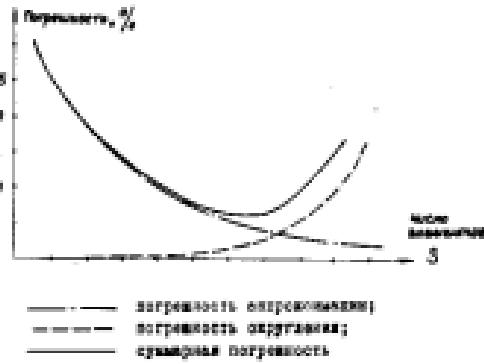


Рис. 10.1

Притом что рост ошибок округления с увеличением числа элементов в данной стережечной конструкции является, с одной стороны, увеличением количества операций при решении системы уравнений, с другой — возрастанием доли смешанных элементов или твердого типа в матрице перемещений $\{u\}_{ij}$.

Красиво сформулировано условие при решении систем уравнений порядка N число $N/3$. Число операций можно сократить при решении системы (10.6) методом Гаусса можно привести следующим образом: для получения решения в точности до ϵ достаточно заложить достаточно элементов выражения [8] и [9].

определить с точностью до $\delta + \varepsilon$ деформаций элементов, где

$$\varepsilon = \delta_{\text{пог}}/\delta.$$

Следует отметить в общем случае можно представить так сумму

$$\text{так } \{\boldsymbol{u}\}_{ij}^{(0)} = \{\boldsymbol{u}\}_{ij}^{(0)} + \{\boldsymbol{u}\}_{ij}^{(1)}, \quad (10.1)$$

где $\{\boldsymbol{u}\}_{ij}^{(0)}$ - вектор связанных координат для твердого тела;

$\{\boldsymbol{u}\}_{ij}^{(1)}$ - дополнительные связанные координаты, связанные с другой деформацией элемента.

Рассмотрим в качестве примера элемент, показанный на рис. 3.4. Компоненты вектора $\{\boldsymbol{u}\}_{ij}$ такого элемента

$$\{\boldsymbol{u}\}_{ij}^{(0)} = \{u_x; \frac{u_y - u_z}{2}; u_y; \frac{u_z - u_x}{2}\}_{ij}. \quad (10.2)$$

Компоненты вектора $\{\boldsymbol{u}\}_{ij}^{(1)}$

$$\{\boldsymbol{u}\}_{ij}^{(1)} = \{\boldsymbol{u}\}_{ij} - \{\boldsymbol{u}\}_{ij}^{(0)} = \{0; u_x - \frac{u_y - u_z}{2}; 0; u_y - \frac{u_z - u_x}{2}\}_{ij}. \quad (10.3)$$

Вектору (10.2) соответствуют нулевые обобщенные силы, т.е.

$$\{\boldsymbol{F}\}_{ij}^{(0)} = [\kappa]_{ij} \{\boldsymbol{u}\}_{ij}^{(0)} = \{0\}. \quad (10.4)$$

При уменьшении длины элемента Δ_{ij} равности $(u_x - \frac{u_y - u_z}{2})_{ij}$

и $(u_y - \frac{u_z - u_x}{2})_{ij}$ стремятся к нулю и при ограничении величины шага в некоторое число могут совпадать величинами с базовой погрешностью, это приводит к дополнительной погрешности в величинах узловых усилий

$$\{\boldsymbol{F}\}_{ij} = [\kappa]_{ij} \{\boldsymbol{u}\}_{ij}^{(0)} + \{\boldsymbol{F}\}_{ij}. \quad (10.5)$$

Погрешности решения системы уравнений могут сильно варьироваться, если матрица $[\kappa]$ плохо обусловлена. Важной особенностью матрицы является ее неустойчивость в неустойчивости решения системы уравнений, когда при некоих изменениях (восканивании) компоненты матрицы $[\kappa]$ или $\{\boldsymbol{Q}\}$ может существенно изменяться вектор $\{\boldsymbol{V}\}$.

Поскольку компоненты матрицы жесткости $[\kappa]$ и вектора узловых нагрузок $\{\boldsymbol{Q}\}$ связываются с вектором погрешности, ошибки в векторе $\{\boldsymbol{V}\}$, в случае плохой обусловленности

матрицы $[\kappa]$, могут быть сколь угодно большими, для получения некоторой количественной оценки обусловленности матрицы $[\kappa]$ определим $\|\cdot\|_2$ вектора вектора $\{\boldsymbol{V}\}$ по формуле Пфайера

$$V_f = \frac{\left| \begin{array}{c} K_{11} \dots K_{1n-1} K_{1n} \\ K_{21} \dots K_{2n-1} K_{2n} \\ \vdots \\ K_{nn-1} K_{nn} \end{array} \right|}{\|K\|}, \quad (10.6)$$

где в числителе в скобках стоит соответствующее определение, путем компонент вектора $\{\boldsymbol{0}\}$, определены с некоторой ошибкой $\{\delta Q\}$. Ошибка в векторе V_f будет тем больше, чем выше абсолютное значение наибольшего из компонентов

K_{ij} , в том числе значение определителя $|K|$. И также ее размеру можно привести, рассмотрев векторы некоторой единичной относительной погрешности в решении компонентов K_{ij} .

Поэтому в качестве количественной обусловленности матрицы жесткости можно принять отношение

$$d_K = \frac{|K|}{|K|_{\text{max}}}.$$

Чем дальше d_K к единице, тем более устойчивым является решение системы уравнений (10.6).

Значение d_K - не единственный и не самый удобный для практического применения критерий обусловленности матрицы.

В настоящем пособии, однако, невозможно рассмотреть вопрос о критериях обусловленности матриц в полном объеме. Рекомендуем связанные с материалами курса "Математические методы линейной алгебры".

О ГЛАВАХ

Введение.....	1
§ 1. Статичные балочные конструкции корпуса судна.....	4
§ 2. Стержневые системы. Главные точки. Информация о геометрии системы.....	16
§ 3. Применение метода перемещений для статичных стержневых систем.....	22
§ 4. Погрешность стержневого элемента в локальной системе координат.....	30
§ 5. Вектор усилий нагружения элемента. Доказательство линейности погрешности к безразмерному виду.....	39
§ 6. Преобразование матрицы внешности стержневого элемента в рактора усилий нагружения при переходе от локальной к общей системе координат.....	45
§ 7. Условная инверсия Ибрагимова (старинности системы) в главных точках.....	47
§ 8. Система уравнений для определения $\{U\}$ - движущие нагрузки и крутящие моменты, передающиеся в основах судна в сечениях стержней.....	52
§ 9. Практический метод определения матрицы $[K]$ и вектора $\{Q\}$ - матрица индексов.....	56
§ 10. Погрешность стержневой идеализации и математического метода расчета в задачах прочности судовых конструкций.....	67