

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ СХЕМ ФЕРМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СИСТЕМЕ MSC NASTRAN

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве методических указаний к лабораторным работам

Составители:
А.В. Болдырев,
М.В. Павельчук

САМАРА
Издательство Самарского университета
2016

УДК 629.7.023(075)+004.9(075)
ББК 68.53я7+32.97я7

Составители: *А.В. Болдырев, М.В. Павельчук*

Рецензент канд. техн. наук, доц. М. Е. П р о д а н о в

Автоматизированное проектирование силовых схем ферменных конструкций в системе MSC NASTRAN: метод. указания к лаб. работе / сост.: *А.В. Болдырев, М.В. Павельчук*. – Самара: Изд-во Самарского ун-та, 2016. – 24 с.

Рассмотрены цели, задачи и содержание лабораторных работ по дисциплине «Конечно-элементное моделирование авиационных конструкций» для студентов специальности 24.05.07 Самолёто- и вертолётостроение и направления 24.03.04 Авиастроение. Изложены этапы проектирования рациональной силовой схемы конструкции на основе разработки последовательности конечно-элементных моделей различного уровня.

Разработаны на кафедре конструкции и проектирования летательных аппаратов.

УДК 629.7.023(075)+004.9(075)
ББК 68.53я7+32.97я7

Учебное издание

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИЛОВЫХ СХЕМ ФЕРМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В СИСТЕМЕ MSC NASTRAN

Методические указания

Составители: *Болдырев Андрей Вячеславович,
Павельчук Максим Владимирович*

Редактор И.И. Спиридонова. Доверстка И.И. Спиридонова

Подписано в печать 29.04.2016. Формат 60 х 84 1/16.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 1,5.

Тираж 100 экз. Заказ . Арт. – 45/2016.

федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования «Самарский национальный
исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

Изд-во Самарского университета
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

© Самарский университет, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель и задачи лабораторных работ	4
2. Варианты заданий	4
3. Теоретические основы автоматизированного проектирования силовых схем плоских ферменных конструкций	7
4. Порядок выполнения работы	10
5. Общие указания к выполнению лабораторных работ	11
5.1. Пример проектирования	11
5.2. Определение теоретически оптимальной конструкции	12
5.3. Разработка силовой схемы фермы	16
5.4. Модификация силовой схемы фермы	20
6. Содержание отчёта по лабораторным работам	23
Список литературы	24

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Цель работ – познакомить студентов с методикой автоматизированного проектирования силовых схем авиационных конструкций и выработать практические навыки разработки ферм в среде MSC NASTRAN.

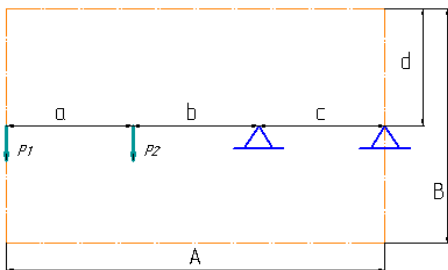
Задачи лабораторных работ

1. Знакомство с методикой силового анализа конструкций [1] для задач с плоской проектной областью.
2. Освоение навыков разработки геометрических и конечно-элементных моделей разного уровня.
3. Поиск рациональной силовой схемы фермы для заданных граничных условий по методике проектирования [2].

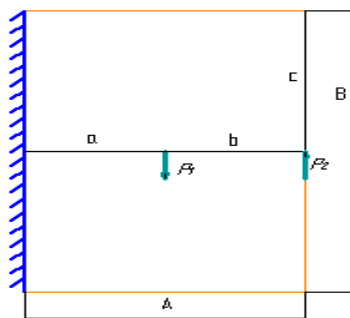
2. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Задана плоская геометрическая область, внутри которой может размещаться проектируемая конструкция. Известны размеры области, нагрузки, прикладываемые к конструкции и закрепления, представленные на рис. 1. Считается, что силы с различными индексами действуют одновременно. Используется материал со следующими характеристиками: модуль упругости – 70000 МПа , коэффициент Пуассона – $0,3$, допускаемое напряжение – 300 МПа , плотность – 2700 кг/м^3 .

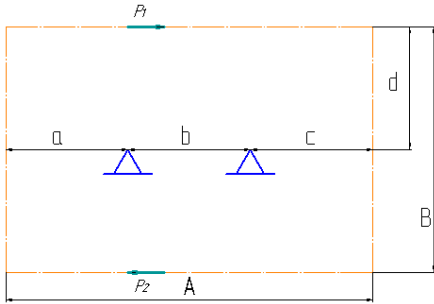
Требуется найти рациональную силовую схему ферменной конструкции для заданных граничных условий.



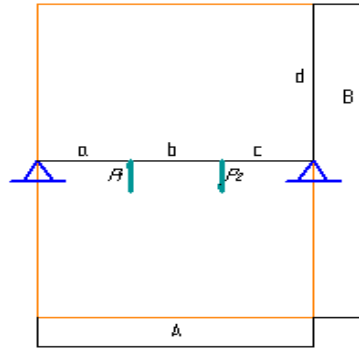
Вариант 1



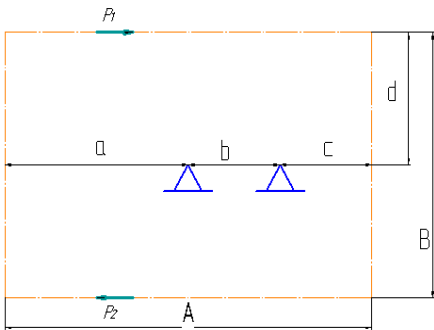
Вариант 2



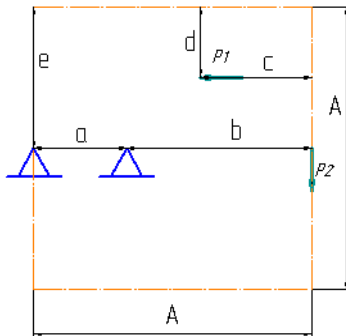
Вариант 3



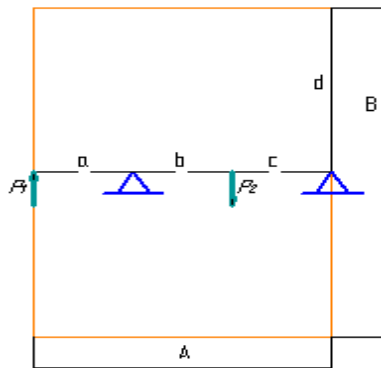
Вариант 4



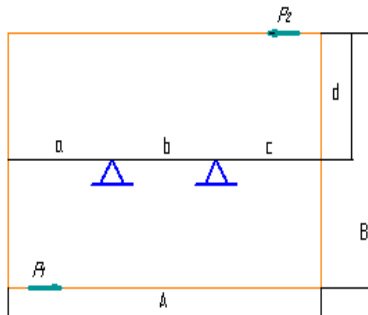
Вариант 5



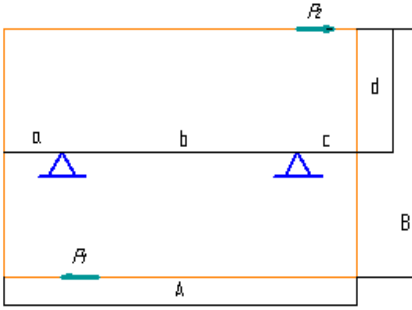
Вариант 6



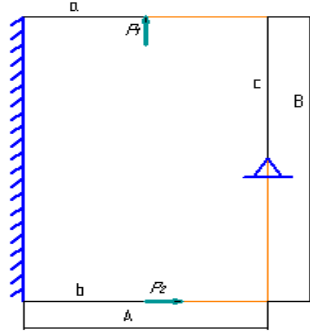
Вариант 7



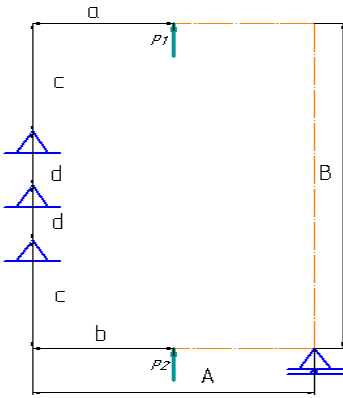
Вариант 8



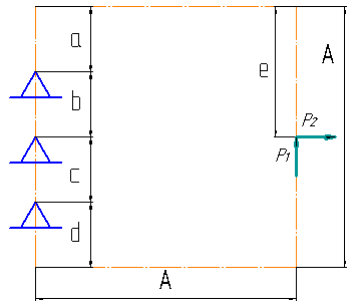
Вариант 9



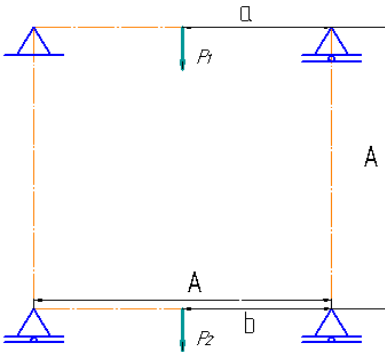
Вариант 10



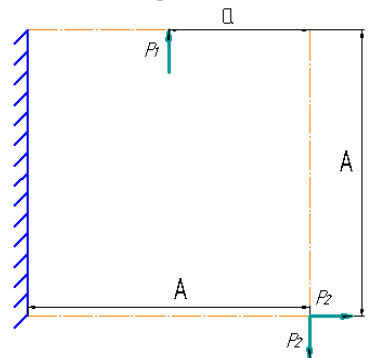
Вариант 11



Вариант 12



Вариант 13



Вариант 14

Рис. 1. Варианты заданий

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИЛОВЫХ СХЕМ ПЛОСКИХ ФЕРМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Силовая схема конструкции (ССК) определяет тип силовых элементов, их количество, способы соединения между собой и расположение в пространстве. В работе [1] заложены теоретические основы автоматизированного проектирования силовых схем летательных аппаратов, в том числе ферменных конструкций.

Для решения поставленной задачи используется следующий план отыскания рациональной ССК.

1) В проектную геометрическую область вписывается континуальная упругая среда (заполнитель), содержащая внутри себя все возможные силовые схемы конструкции. Такая модель конструкции называется *континуальная модель*. В качестве заполнителя для плоских конструкций используется мембранная изотропная пластина переменной толщины.

2) Выполняется оптимизация распределения материала в континуальной модели и отыскивается теоретически оптимальная конструкция (ТОК), принимаемая за «идеал».

Итерационный пересчёт толщин δ в элементах пластины выполняется по формуле поиска *полнонапряжённой конструкции* [1]:

$$\delta_{r+1,i} = \delta_{ri} \cdot \frac{\sigma_{ri}^{\text{экв}}}{[\sigma]},$$

где r – номер итерации оптимизации, i – номер элемента, $\sigma^{\text{экв}}$ – эквивалентное напряжение по принятой теории прочности, $[\sigma]$ – допускаемое напряжение.

3) Анализируется силовая работа ТОК и с учётом конструктивных и технологических требований выбираются параметры рациональной ССК. Для этого применяется методика анализа передачи усилий в конструкциях на основе потоков главных усилий (ПГУ) [1]. В каждом мембранном элементе определяют главные напряжения и, умножая их на средние толщины элемента, получают потоки главных усилий. Изображают ПГУ с направлениями стрелок как у главных напряжений, а длину

стрелок назначают пропорционально величинам потоков усилий. На данном этапе проектирования конструкции в зонах ТОК с одноосными потоками усилий располагаются стержневые элементы, в соответствии с направлениями векторов ПГУ. В зонах с двухосным распределением ПГУ рекомендуется использовать перекрёстную систему стержней.

4) Разрабатывается конечно-элементная модель (КЭМ), реализующая рациональную структуру фермы. Оценивается весовая эффективность ССК с использованием силового фактора G , который характеризует одновременно величину и протяжённость действия внутренних усилий в конструкции [4].

Силовой фактор определяется:

- для фермы, состоящей из n элементов:

$$G = \sum_{i=1}^n |N_i| \cdot l_i,$$

где N_i – усилие в i -м стержне, l_i – длина стержня;

- для мембранных конструкций:

$$G = \sum_{i=1}^n R_i \cdot S_i,$$

где R – эквивалентный поток усилий, S – площадь в плане элемента.

Приведём некоторые свойства G , полезные для весовой оценки ферменных конструкций.

- На величину G существенное влияние оказывает выбор параметров ССК.

- Для *статически неопределимых* конструкций G слабо зависит от распределения жёсткостей.

- Для *статически определимых* ферм G вообще не зависит от соотношения жёсткостей силовых элементов.

- G позволяет вычислить теоретически необходимый объём материала V_T для полнонапряжённой конструкции с определённой силовой схемой:

$$V_T = \frac{G}{[\sigma]}.$$

Так, для полнонапряжённой фермы:

$$V_T = \sum_{i=1}^n \frac{|N_i|}{[\sigma]} \cdot l_i = \sum_{i=1}^n F_i \cdot l_i,$$

где F_i – площадь поперечного сечения стержня.

Отметим, что переход от ТОК к реальной конструкции осуществляется на третьем этапе плана отыскания рациональной ССК с использованием эвристических приёмов и, следовательно, существует риск принятия неверных технических решений. Для смягчения этого недостатка в статье [2] предложена методика проектирования ССК на основе поэтапного замещения материала заполнителя в континуальной модели конструктивными элементами, реализующими принятые технические решения. Целенаправленное внедрение в континуальную модель конструктивных элементов и оценка весовой эффективности их силовой работы позволяют своевременно выявить и скорректировать возможные неудачные технические решения. На рис. 2 представлена методика проектирования ССК.



Рис. 2. Блок-схема методики проектирования ССК

После выполнения всех этапов плана отыскания рациональной ССК в блоке 3 методики [2] создаётся КЭМ, реализующая выбранную ССК. Оценивается весовая эффективность конструкции и проверяется выполнение функциональных требований, предъявляемых к ней. Затем к КЭМ, созданной в блоке 3, присоединяется заполнитель (блок 5) и управление процессом передаётся в блок 2. Анализ основных путей передачи сил и распределения материала в заполнителе после оптимизации позволяет разработать рациональные варианты усовершенствования ССК за счёт изменения расположения имеющихся силовых элементов

фермы или добавления дополнительных стержней. Процесс проектирования продолжается, пока очередные изменения в силовой схеме приводят к снижению массы фермы и не исчерпано заданное число итераций (блок 4).

4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Для решения поставленной задачи по методике [2] выполняется цикл лабораторных работ с использованием системы NASTRAN [3] и специальных программ. На рис. 3 представлена последовательность применения специальных программ на этапах отыскания рациональной силовой схемы фермы.

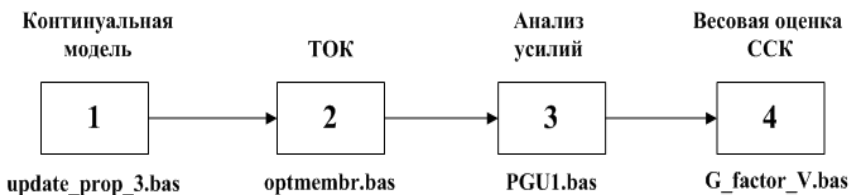


Рис. 3. Блок-схема применения специальных программ

Сначала, на этапе 1, строится континуальная модель из мембранных элементов, имеющих одно свойство (пластина постоянной толщины). Далее запускается программа **Update_prop_3.bas**, которая автоматически задаёт всем элементам уникальные свойства для последующей оптимизации распределения материала – получения пластины переменной толщины.

На этапе 2 выполняется расчёт напряженно-деформированного состояния пластины в NASTRAN. По найденным напряжениям в элементах пластины определяется распределение толщин мембранных элементов по формуле поиска полнонапряжённой конструкции с использованием программы **Optmembr.bas**. Итерационное повторение процедуры «расчёт – оптимизация конструкции» позволяют отыскать ТОК.

На основе анализа распределения материала в ТОК и картины ПГУ (этап 3) разрабатывается силовая схема фермы. Для этого используется

программа **PGU1.bas**, которая вычисляет векторы потоков главных усилий и записывает их в файл выходных данных системы NASTRAN с номерами результатов 7426 и 7427.

На этапе 4 проводится весовая оценка разработанной силовой схемы ферменной конструкции. Для этого используется программа **G_factor_V.bas**, которая рассчитывает силовой фактор для ТОК и для модели, реализующей выбранную ССК. Если полученные значения *силового фактора* отличаются более чем на 2%, то выполняется модификация ССК. Для этого в проектную область с фермой снова вписывается заполнитель (блок 5 на рис. 2). В результате получается комбинированная КЭМ, составленная из стержневых элементов фермы и мембранных элементов континуальной модели. Для присвоения всем мембранным элементам уникальных свойств запускается программа **Update_prop_3.bas**.

Далее выполняется оптимизация распределения материала в заполнителе с использованием программы **Optmembr.bas**. Интерпретация ПГУ в заполнителе «подскажет» технические решения, позволяющие улучшить ферменную конструкцию.

Затем строится модель модифицированной фермы. Задаются уникальные свойства стержневым элементам с использованием **Update_prop_3.bas**. Выполняется итерационная процедура «расчёт – оптимизация конструкции». С использованием **G_factor_V.bas** осуществляется весовая оценка модифицированной ССК.

5. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

5.1. Пример проектирования

На первой лабораторной работе преподаватель знакомит студентов с интерфейсом системы NASTRAN [3]. Демонстрируется решение примера, представленного на рис. 4, при следующих значениях: $A=1000$ мм, $C=100$ мм, $P=100$ кН.

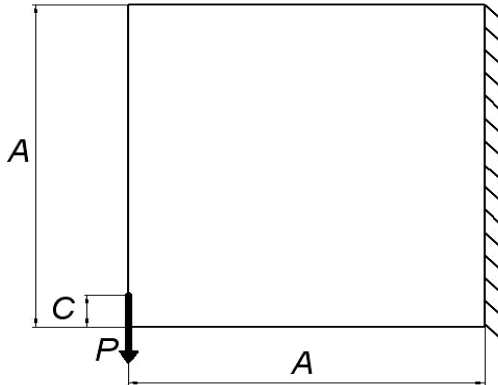


Рис. 4. Пример задания на проектирование

Для описания последовательности действий в системе NASTRAN на примере решения этой задачи в дальнейшем изложении используются следующие условные обозначения:

- названия команд выделяются *полужирным* шрифтом;
- обозначение последовательности действий при выполнении команд приводится с использованием стрелки «→», например: *File→Open*;
- занесение данных в текстовое поле диалогового окна обозначается знаком =, например, *ID=1*.

5.2. Определение теоретически оптимальной конструкции

На второй лабораторной работе студентами для своих вариантов заданий в среде NASTRAN разрабатывается *геометрическая* модель конструкции, создаётся *континуальная* конечно-элементная модель (КЭМ-1), составленная из мембранных элементов. Оптимизация распределения материала в этой модели с использованием программы *Optmembr.bas* позволяет определить ТОК.

Порядок выполнения.

1. Открытие нового файла: *File→New*.
2. Создание геометрической модели:
 - 2.1. Создать прямоугольник: *Geometry → Curve-Line → Rectangle* → нажать кнопку *Method*, установить *Locate* → ввод координат первого

угла $(0, 0, 0) \rightarrow OK$. В следующем диалоговом окне ввести координаты диагонально противоположного угла прямоугольника в мм $(1000, 1000, 0) \rightarrow OK \rightarrow Cancel$.

Установить изображение по центру, нажав клавиши **Ctrl+A**.

2.2. Построить граничную поверхность: **Geometry** \rightarrow **Boundary Surface** \rightarrow **From Curves** \rightarrow в окне выбрать линии, создающие замкнутые границы контура $\rightarrow OK \rightarrow Cancel$.

2.3. Подготовить геометрическую модель к разбиению: **Mesh** \rightarrow **Mesh Control** \rightarrow **Size along Curve** \rightarrow в окне *размер сетки вдоль кривых* указать число элементов на каждой стороне (рис. 5).

Рекомендуется по возможности создавать конечные элементы квадратной или прямоугольной формы.

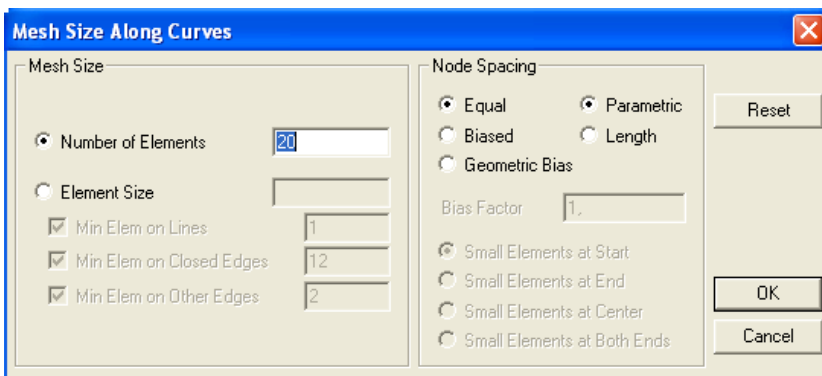


Рис. 5. Задание параметров для генерации КЭМ-1

3. Создание материала и свойств элементов:

3.1. Создать характеристики материала: **Model** \rightarrow **Material** \rightarrow в окне определение изотропного материала задать название: **Title=D16**, модуль Юнга в МПа: **E=70000**, коэффициент Пуассона: **nu=0.3**, допустимое напряжение в МПа: **Limit stress (Tension)=300**, плотность в кг/мм³: **Mass Density=2.7E-6** $\rightarrow OK \rightarrow Cancel$.

3.2. Создать свойства элементов №1: **Model** \rightarrow **Property** \rightarrow задать заголовок **Title=membrane** \rightarrow выбрать материал <D16> в поле **material** \rightarrow нажать кнопку **Elem/Property Type** и установить тип элемента **membrane** $\rightarrow OK \rightarrow$ задать толщину в мм **thickness = 1** $\rightarrow OK \rightarrow Cancel$.

4. Создание сетки конечных элементов с использованием автоматического генератора сеток: *Mesh* → *Geometry* → *Surface* → выбрать поверхность → **OK** → в новом окне выбрать свойство №1 → **OK**.

5. Генерация уникальных свойств элементов: *File* → *Program* → *Run Script* → запустить программу *Update_prop_3.bas* → выбрать все элементы *Select All* → **OK**.

6. Создание закреплений в узлах:

6.1. Идентифицировать активный набор закреплений: *Model* → *Constraint* → *Set* → задать наименование набора закреплений *Title* → **OK**.

6.2. Создать закрепления: *Model* → *Constraint* → *Nodal* → включить опцию *Method* → *on Curve* → выбрать узлы по ссылке на кривые для создания типа закрепления заделка → в секции *DOF* (*степени свободы*): включить опции *TX*, *TY*, т.е. закрепить конструкцию по перемещениям *X* и *Y* → **Cancel**. Для создания закрепления в конкретном узле в опции *Method* выбрать *ID*.

7. Задание нагрузок:

7.1. Идентифицировать набор нагрузок: *Model* → *Load* → *Set* → задать наименование набора нагрузок *Title* → **OK**.

7.2. Создать нагрузки: *Model* → *Load* → *Nodal* → нажать на кнопку *Method* → установить *ID* → выбрать узлы, в которых приложены нагрузки → в новом окне выбрать в списке слева *Force* (*сила*) → задать значение силы в *H* → **OK** → **Cancel**.

Для каждого случая нагружения фермы создаётся отдельный набор нагрузок.

8. Расчёт конструкции: *File* → *Analyze* → нажать кнопку *Manually Create Analysis Model* → при наличии одного случая нагружения фермы заполнить поля таблицы *Constraint* и *Loads* → **OK**. При нескольких случаях нагружения воспользоваться кнопкой *Loads* → *Select All* → **OK**.

Для просмотра результатов расчёта на панели команд нажать кнопку *Post Process* → *Post Data {}* → в списке *Output Set* выбрать последний сет → во вкладке *Output Vectors*: поле *Deformation=1. Total translation* (*полные перемещения узлов*) → поле *Contour=7433. Plate Bot VonMises Stress* (*эквивалентные по Мизесу напряжения*) → **OK**.

9. Оптимизация: *File* → *Program* → *Run Script* → запустить программу *Optmembr.bas* → нажать кнопку *Method* → выбрать *Type* → вы-

брать *мембранный min* элементов → **OK** → ввести *Output Set* → **OK** → получили новое распределение толщин в пластине.

Для просмотра результатов оптимизации нажать кнопку *Post Process* → *Post Data {}* → выбрать *Output Set* → *Contour=100001.thickness*. Для установки чёткого изображения (настройки резких границ) необходимо выполнить: *View* → *Select (F5)* → снять галочку *Render* → **OK**.

10. Последовательно повторить п. 8 и 9. Выполнить не менее 5 циклов.

По результатам очередной, *i*-ой итерации процесса оптимизации в папке C:\Users создаётся файл *opt < i >*. В этом файле содержатся отношения действующих эквивалентных напряжений к допускаемому напряжению для каждого элемента и максимальное значение по всей модели (*Maximum stress ratio*). Очевидно, что для полнонапряжённого проекта эта величина должна быть равна 1. Процесс оптимизации можно прекратить, когда коэффициент максимальных напряжений попадёт в диапазон от 0,95 до 1,05. Отметим, что папка C:\Users является общей для всех решаемых задач в системе NASTRAN, поэтому пользователям периодически рекомендуется сохранять эту информацию.

11. Сохранить КЭМ-1 в базе данных NASTRAN: *File* → *Save as* → *model_1*.

12. Запустить программу *PGUI.bas*. В окне выбора элементов указать группу элементов (можно нажать кнопку *Select All*), выбрать номер набора результатов, для которого далее будут построены ПГУ.

13. Включить отображение ПГУ в графическом окне: *View* → *Select (F5)* → во вкладке *Contour Style* выбрать *Vector*, нажать кнопку *Deformed and Contour Data* → *Contour Vectors* → в окне *Contour Vector Options* (рис. 6) во вкладке *Output Relative to* задать местную систему координат элементов *Element Edge / Solid CSys or Nodal Output CSys*, во вкладке *Elemental Output Vectors* установить для *Vector 1 = 7426..Plate Bot MajorPrn Stress*, для *Vector 2 = 7427..Plate Bot MinorPrn Stress*. Нажав кнопку *Palette*, можно выбрать цвет изображения векторов.

Для настройки визуализации ПГУ на панели команд нажать кнопку *Post Process* → *Post Options* → *More Options* → выбрать вкладку *Post Processing* → выбрать в списке *Contour Vector Style* → в списке *Vector*

Style найти *0..Center, Dual Arrow* (двойные стрелки в центре элемента)
→ Apply → OK.

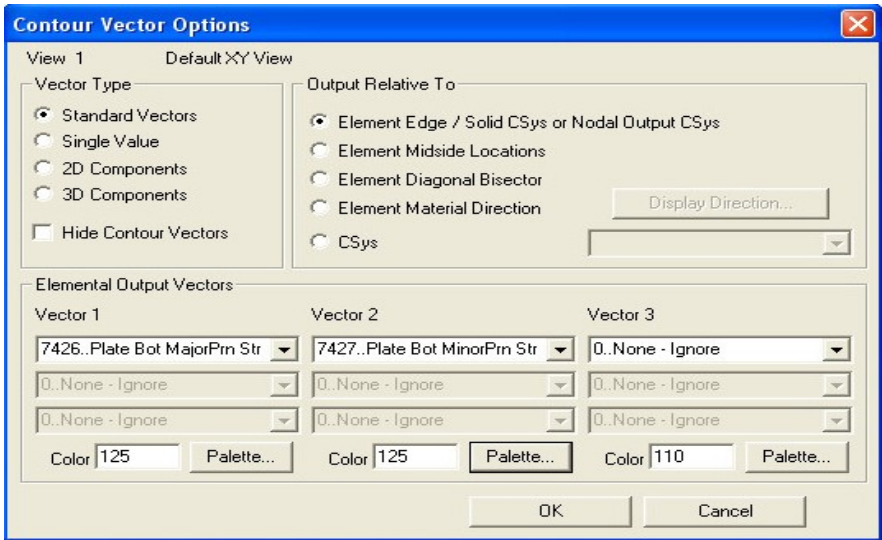


Рис. 6. Настройка отображения ПГУ

Для отключения отображения ПГУ выполнить: *View* → *Select (F5)*
→ во вкладке *Contour Style* установить *None - Model Only* → *OK*.

14. Рассчитать силовой фактор ТОК: *File* → *Program* → *Run Script*
→ запустить программу *G_factor_V.bas* → выбрать все элементы *Select All* → *OK* → ввести № результатов выходного набора → получили $G_{ТОК}$.

В результате решения демонстрационного примера за 5 итераций оптимизации распределения материала найдена ТОК с $G_{ТОК} = 2,59 \cdot 10^8$ Н.мм.

5.3. Разработка силовой схемы фермы

В третьей лабораторной работе на основе анализа ТОК разрабатывается силовая схема фермы. Создаётся модель фермы (КЭМ-2), реализующая это техническое решение.

На рис. 7, а показано распределение толщин в ТОК для демонстрационного примера. Отметим, что сгустки материала пластины размещены преимущественно в зонах А и Б.

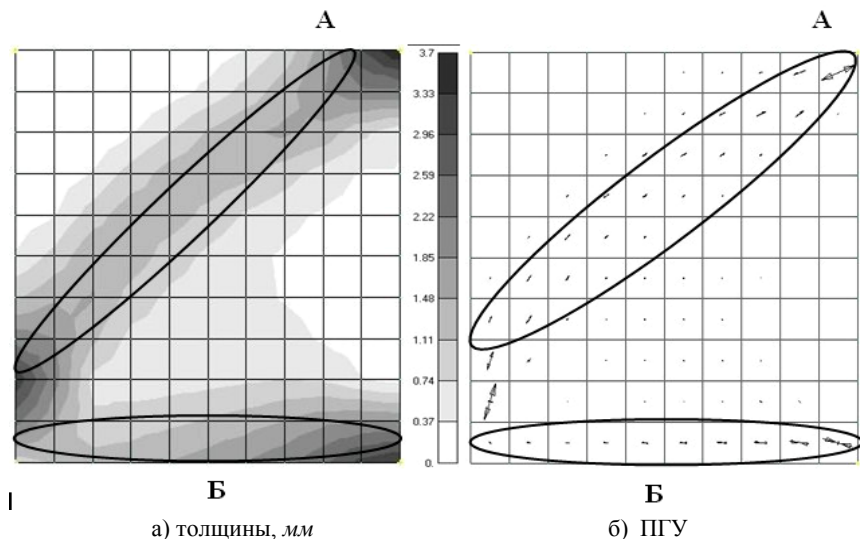


Рис. 7. Данные о ТОК, используемые для разработки ССК

Распределение ПГУ (рис. 7,б) свидетельствует о преобладании в этих зонах одноосных потоков усилий, поэтому в соответствующих направлениях целесообразно установить стержневые элементы. В качестве начального варианта ССК выберем двух стержневую ферму. Проверим весовую эффективность этого варианта ССК.

Порядок выполнения.

1. Сохраним *model_1* (ТОК) как *model_2*.
2. Удаляем все предыдущие результаты расчётов: **Delete** → **Output** → **Set** → **Select All** → **OK** → **OK**.
3. Удаляем все мембранные элементы: **Delete** → **Model** → **Element** → нажать в окне выбора элементов для удаления **Select All** → **OK**.

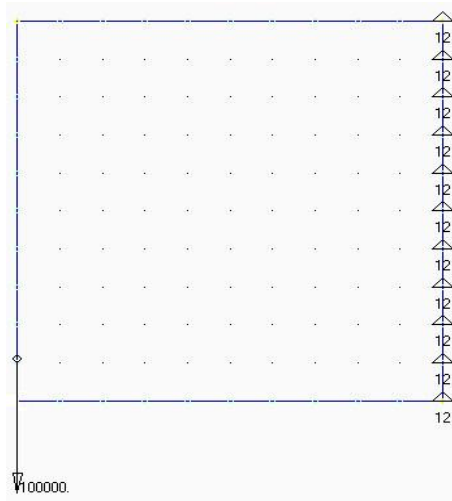


Рис. 8. Узлы КЭМ-1

4. Создаём свойство для стержневых элементов: **Model** → **Property** → задать заголовок **Title=Rod** → выбрать **material <D16>** → нажав на кнопку **Elem/Property Type**, установить тип элемента **< Rod >** → **OK** → задать площадь поперечного сечения стержней в $мм^2$: **Area=100** → **OK** → **Cancel**.

5. Формируем ферменную конструкцию по уже существующим в модели узлам (рис. 8): **Model** → **Element** → в диалоговом окне выбрать свойство **< Rod >** → указать узлы, задающие начало и конец каждого создаваемого стержня → **OK** → **Cancel**.

6. Удаляем все «лишние» узлы, не использованные в п. 5 для создания фермы: **Delete** → **Model** → **Node** → **Select All** → **OK** → **OK**.

7. Проводим проверку на совпадающие узлы: **Tools** → **Check** → **Coincident Nodes** → **Select All** → во вкладке **Options (Параметры)** ставим галочку **Merge Coincident Entities (Слияние совпадающих объектов)** → **OK**.

8. Создаём уникальные свойства для каждого стержневого элемента: **File** → **Program** → **Run Script** → запустить программу **Update_prop_3.bas** → в окне выбора объектов **Select All** → **OK**.

9. Расчёт: **File** → **Analyze**.

10. Оптимизация фермы: **File** → **Program** → **Run Script** → выбрать программу **Optmembr.bas** → в окне выбора объектов нажать кнопку **Method**, выбрать **Type** → в выпадающем списке выбрать < **Rod** > → **OK** → ввести № выходного набора → **OK**.

Просмотр результатов расчёта:

Нажать на кнопку **Post Process** → **Post Data {}** → выбрать в списке **Output Set** → во вкладке **Output Vectors**: в поле **Deformation**: выбрать **1. Total translation** → в поле **Contour**: выбрать **3183Rod Axial Stress (Осевые напряжения в стержнях)** → **OK**.

На рис. 9 показаны напряжения в двухстержневой ферме.

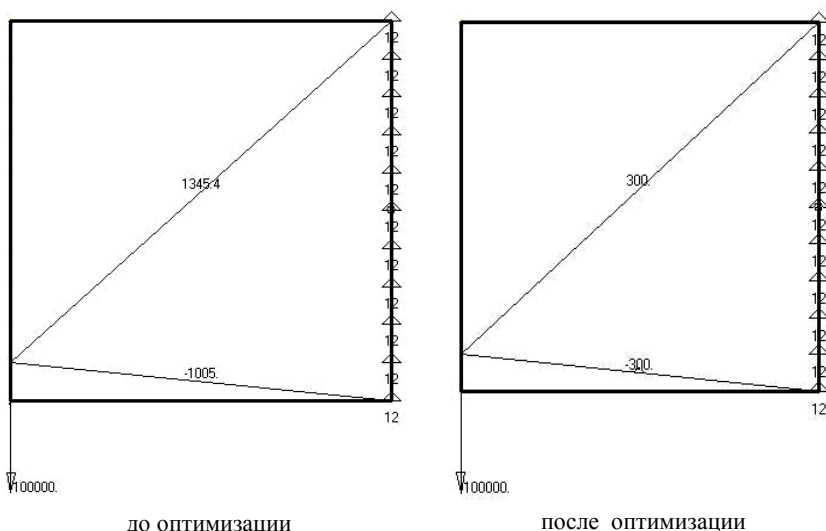


Рис. 9. Осевые напряжения в стержнях КЭМ-2

11. Вычисление силового фактора фермы $G_{фермы}$: **File** → **Program** → **Run Script** → запустить программу **G_factor_V.bas** → **Select All** → **OK** → ввести № выходного набора → **OK**.

В результате найдена ферменная конструкция, состоящая из двух стержней, с силовым фактором $G_{фермы} = 2,82 \cdot 10^8$ Н·мм, превышающем значение для ТОК на 8,2 %, что свидетельствует о наличии резервов для снижения массы этой фермы.

5.4. Модификация силовой схемы фермы

На заключительной лабораторной работе в проектную область с найденной ферменной конструкцией вписывается заполнитель (континуальная модель). В комбинированной КЭМ-3, объединяющей ферму и континуальную модель, выполняется оптимизация распределения материала в заполнителе. Анализ распределения материала и ПГУ в заполнителе позволит модифицировать ССК, что найдёт отражение в модели модифицированной фермы (КЭМ-4).

Порядок выполнения.

1. Сохраняем *model_2* как *model_3*.
2. Создаём сетки мембранных конечных элементов: *Mesh* → *Geometry* → *Surface* → выбрать поверхность для генерации сетки → выбрать свойство *{membrane}* → *OK*.

На рис. 10 представлена КЭМ-3, объединяющая двух стержневую ферму и континуальную модель.

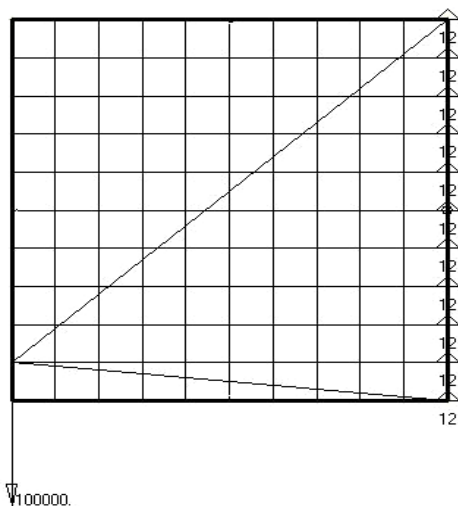


Рис. 10. КЭМ-3

3. Задаём уникальные свойства мембранным элементам: *File* → *Program* → *Run Script* → запустить программу *Update_prop_3.bas* → нажать кнопку *Method* → выбрать *Type* → выбрать *мембранный тип элементов* → *OK*.

4. Удаляем все предыдущие результаты расчётов: *Delete* → *Output* → *Set* → *Select All* → *OK* → *OK*.

5. Расчёт: *File* → *Analyze*.

6. Оптимизация континуальной модели (только мембранных элементов): *File* → *Program* → *Run Script* → запустить программу *Optmembr.bas* → нажать кнопку *Method* → выбрать *Type* → установить мембранный *min* силовых элементов → *OK* → указать число случаев нагружения → *OK* → № выходного набора → *OK*.

Выполнить 10 – 20 циклов «расчёт – оптимизация».

На рис. 11 показано распределение толщин и ПГУ в заполнителе после оптимизации.

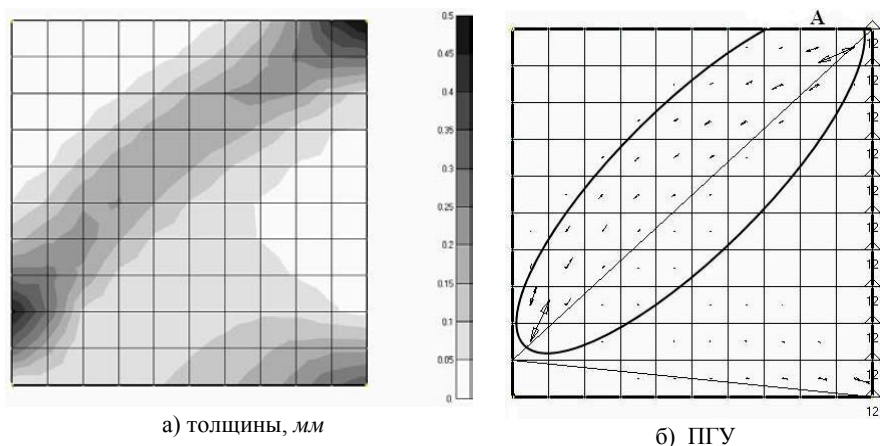


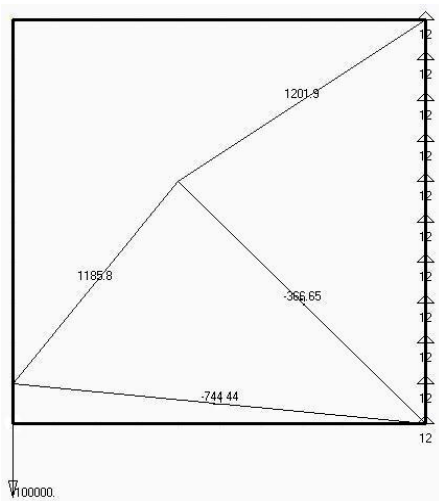
Рис. 11. Данные о заполнителе в КЭМ-3

В зоне А заполнителя наблюдаются сгустки материала. ПГУ в этой зоне располагаются по эллиптической траектории. Анализ результатов показывает, что в ферме с исходной ССК вместо стержня, положение которого не соответствует генеральному пути передачи усилий в зоне А заполнителя, целесообразно использовать два стержня, расположив их по эллиптической траектории. Для устранения «механизма» в месте стыка новых стержней необходимо добавить ещё один стержень, соединяющий этот узел с нижним правым узлом опоры (рис. 12).

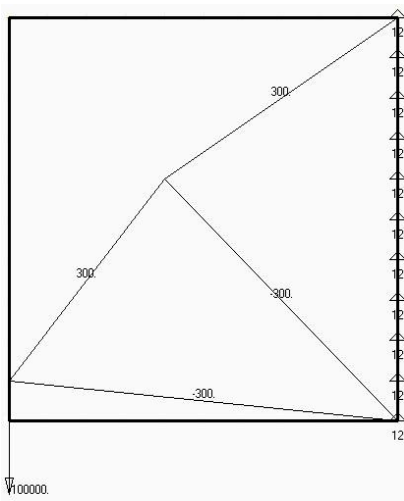
1. Сохраняем *model_3* как *model_4*.
2. Удаляем все мембранные элементы: **Delete** → **Model** → **Element** → нажать **Select All** → **OK**.
3. Создаём ферменную конструкцию: **Model** → **Element** → в диалоговом окне выбрать свойство (*rod*) → нажать на кнопку **Type** и выбрать тип элемента **Rod** → **OK** → указать узлы для каждого создаваемого стержня → **OK**.
4. Удаляем все «лишние» узлы: **Delete** → **Model** → **Node** → **Select All** → **OK** → **OK**.
5. Проводим проверку на совпадающие узлы: **Tools** → **Check** → **Coincident Nodes** → **Select All** → **Merge Coincident Entities** → **OK**.
6. Создание уникальных свойств стержневых элементов: **File** → **Program** → **Run Script** → запустить программу *Update_prop_3.bas* → нажать кнопку **Method** → выбрать **Type** → выбрать *стержневой тип* элементов → **OK**.
7. Расчёт: **File** → **Analyze**.
8. Оптимизация: **File** → **Program** → **Run Script** → запустить программу *Optmembr.bas* → нажать кнопку **Method** → выбрать **Type** → установить *стержневой тип* элементов → **OK** → в новом диалоговом окне указать число случаев нагружения → **OK** → ввести № выходного набора → **OK**.
9. Определение силового фактора: **File** → **Program** → **Run Script** → запустить программу *G_factor_V.bas* → **Select All** → **OK** → ввести № выходного набора → **OK**.

На рис. 12 представлены напряжения в спроектированной четырех стержневой ферме.

В результате этого занятия найдена ферменная конструкция, состоящая из 4 стержней, с силовым фактором $G_{фермы} = 2,68 \cdot 10^8 \text{ Н}\cdot\text{мм}$. Значения силового фактора G для различных вариантов ССК представлены в табл. 1.



а) до оптимизации



б) после оптимизации

Рис. 12. Осевые напряжения в стержнях КЭМ-4

Таблица 1 – Силовой фактор для ССК

№	Конструкция	Модель	$G, *10^8 \text{ Н*мм}$	ΔG
1	ТОК	КЭМ-1	2,59	–
2	Двух стержневая ферма	КЭМ-2	2,82	8,2 %
3	Четырех стержневая ферма	КЭМ-4	2,68	3,4 %

6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

В отчёте по циклу лабораторных работ должны содержаться следующие данные.

1. Эскиз варианта задания с исходными данными.
2. Данные по КЭМ-1.
 - 2.1 Картины эквивалентных напряжений и толщин в ТОК, представленные численными значениями и линиями равных уровней.
 - 2.2 Картина ПГУ.
 - 2.3 Графики изменения коэффициента максимального напряжения и силового фактора по итерациям оптимизации заполнителя.

3. Осевые напряжения в стержнях фермы КЭМ-2.
4. Данные по КЭМ-3.
 - 4.1 Картины эквивалентных напряжений и распределения материала в континуальном заполнителе.
 - 4.2 Картина ПГУ в континуальном заполнителе.
5. Осевые напряжения в стержнях модифицированной фермы (КЭМ-4).
6. Результаты вычисления силового фактора G для вариантов конструкций.
7. Анализ результатов и выводы по работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Комаров, В.А.* Проектирование силовых схем авиационных конструкций // Актуальные проблемы авиационной науки и техники / *В.А. Комаров*. – М.: Машиностроение, 1984. – С. 114–129.
2. *Болдырев, А.В.* Развитие методики проектирования силовых схем авиационных конструкций с использованием модели тела переменной плотности / *А.В. Болдырев, М.В. Павельчук* // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. – Т. 15. № 6(3). – С. 603–606.
3. *Рычков, С.П.* MSC.visual Nastran для Windows / *С.П. Рычков* – М.: ИТ Пресс, 2004. – 552 с.
4. *Комаров, В.А.* Весовой анализ авиационных конструкций: теоретические основы / *В.А. Комаров* // Общероссийский научно-технический журнал «Полёт», 2000. – №1. – С. 31–39.

