

ОБ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИН РАСЧЕТНОГО ЦИКЛА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ

Игнатюк В.И., Бочарова Н.В.

Сегодня изучение таких дисциплин, как теоретическая механика, сопротивление материалов, строительная механика, численные методы невозможно без использования современных компьютерных программ. При этом для использования в учебном процессе можно выделить три-четыре вида компьютерных программ, цели и назначение которых различно, и которые нацелены на решение следующих задач в обучающем процессе:

1) учебные компьютерные программы, направленные на совершенствование изучения учебного материала дисциплин, методов расчета [2,3];

2) учебные компьютерные программы расчета конструкций и сооружений, которые в учебном процессе служат для проверки результатов, полученных в процессе решения задач с использованием изучаемых методов расчета;

3) программные комплексы, используемые в расчетно-проектной практике, которые необходимо использовать в учебном процессе для сравнения получаемых результатов и их анализа, ориентируясь на связь с реальным проектированием и производством;

4) МаhtCad-программы, создаваемые самими обучающимися в математической среде «МаhtCad» в помощь себе и своим коллегам.

К первой группе относится целый ряд учебных компьютерных программ, разработанных на кафедре прикладной механики (строительной механики) в Брестском государственном техническом университете, среди которых выделим программы:

- «Arka3» – Статический расчет трехшарнирных арок;
- «Arka2» – Статический расчет двухшарнирных;
- «ArkBes» – Статический расчет бесшарнирных арок;
- «MetSil» – Расчет статически неопределимых рам методом сил;
- «ParUst» – Решение уравнений устойчивости в расчетах рам на устойчивость методом перемещений.

Учебные компьютерные программы должны облегчать трудоемкие вычислительные процессы, уменьшая объем ручных вычислений, при этом не должны потерять сущность и принципы методов расчета. Такие программы должны способствовать изучению методов расчета, познанию их физической сути и физических основ работы сооружений, должны представлять возможности исследования поведения и работы сооружений при изменении их характеристик и параметров, то есть должны представлять обучающе-исследовательскую систему. Главная сложность при составлении таких программ – найти то соотношение двух сторон в задаче, методе расчета, которое позволяло бы, с одной стороны, максимально облегчить математические вычисления, максимально уменьшить объем ручного счета, а с другой стороны, максимально сохранить сущностно-физическую сторону задач и методов расчета. Решение этой проблемы требует глубокого анализа методов расчета, которые при их реализации в учебных программах следует разделить на две части. Одна из них, менее трудоемкая с вычислительной точки зрения, но несущая в себе суть и физические основы метода и способствующая его изучению и познанию, должна выполняться вручную. Вторая, менее информативная, но более трудоемкая часть, должна передаваться компьютерной программе. Следует заметить, что это разделение в разных методах расчета может быть совершенно разным, что зависит от процедур методов, и в одной компьютерной программе расчета на разных его этапах эти части могут взаимно переплетаться друг с другом.

Покажем реализацию этих принципов на примере программы расчета статически неопределимых рам методом сил – программы «MetSil» [3].

Процедура расчета методом сил статически неопределимых рам состоит [1] из этапов:

1. Определение степени статической неопределимости (числа «лишних» связей) рамы L .
 2. Выбор основной системы метода сил (О.С.), то есть статически определимой, геометрически неизменяемой системы, получаемой из статически неопределимой рамы путем отбрасывания лишних связей и замены их неизвестными усилиями X_1, X_2, \dots, X_L , которые являются основными неизвестными метода расчета.

3. Построение в расчетной О.С. метода сил единичных эпюр усилий $\bar{M}_1, \bar{M}_2, \dots, \bar{M}_L$ от действия единичных значений неизвестных метода сил X_1, X_2, \dots, X_L и грузовой эпюры изгибающих моментов M_P от действия внешней нагрузки.

4. Вычисление величин единичных коэффициентов и свободных членов канонических уравнений метода сил по формулам Мора:

$$\delta_{ii} = \sum_1^n \int_0^l \frac{\bar{M}_i^2 dx}{EJ}; \quad \delta_{ik} = \sum_1^n \int_0^l \frac{\bar{M}_i \bar{M}_k dx}{EJ}; \quad \Delta_{iP} = \sum_1^n \int_0^l \frac{\bar{M}_i M_P dx}{EJ}, \quad (1)$$

где: $\bar{M}_i, \bar{M}_k, M_P$ – зависимости изменения изгибающих моментов (их эпюр) в О.С. от действия соответственно единичных значений сил X_i, X_k и внешних нагрузок; EJ – изгибная жесткость стержня (на участке интегрирования), n, l – число участков интегрирования и их длины.

Отметим, что коэффициенты и свободные члены канонических уравнений метода сил по своей сути являются перемещениями.

Вычисление интегралов Мора в выражениях (1) может быть выполнено по формулам Симпсона и трапеций.

Заметим, что если построить суммарную единичную эпюру:

$$\bar{M}_s = \bar{M}_1 + \bar{M}_2 + \dots + \bar{M}_L, \quad (2)$$

то можно вычислить суммы соответственно всех единичных и грузовых перемещений:

$$\delta_{ss} = \sum_{i=1}^L \sum_{k=1}^L \delta_{ik} = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{M}_s^2 dx}{EJ}, \quad \Delta_{sP} = \sum_{i=1}^L \Delta_{iP} = \sum_{i=1}^n \frac{\bar{M}_s M_P dx}{EJ}. \quad (3)$$

Эти величины могут быть использованы для проверки правильности вычисления коэффициентов и свободных членов канонических уравнений метода сил (1).

5. Решение системы канонических уравнений метода сил

$$\begin{cases} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \delta_{13}X_3 + \dots + \delta_{1L}X_L + \Delta_{1P} = 0; \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \delta_{23}X_3 + \dots + \delta_{2L}X_L + \Delta_{2P} = 0; \\ \delta_{31}X_1 + \delta_{32}X_2 + \delta_{33}X_3 + \dots + \delta_{3L}X_L + \Delta_{3P} = 0; \\ \dots \\ \dots \\ \delta_{L1}X_1 + \delta_{L2}X_2 + \delta_{L3}X_3 + \dots + \delta_{LL}X_L + \Delta_{LP} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

и определение неизвестных метода сил X_i ($i = 1 \dots L$). Система канонических уравнений метода сил (2) является неоднородной системой линейных алгебраических уравнений и может быть решена, например, способом Гаусса.

6. Расчет и построение окончательных эпюр изгибающих моментов в системе – выполняется на основе принципа независимости действия сил по формуле:

$$M = \bar{M}_1 X_1 + \bar{M}_2 X_2 + \dots + \bar{M}_L X_L + M_P. \quad (5)$$

7. Построение по эпюре M окончательной эпюры поперечных сил Q .

8. Построение по эпюре Q способом вырезания узлов с учетом действующих в узлах внешних нагрузок эпюры продольных сил N .

Алгоритм программы. В рассматриваемой компьютерной программе «MetSil» выполняется следующее разделение указанных процедур метода сил на две части, составляющее алгоритм программы.

Вручную предлагается выполнить этапы 1–3, 7 и 8, которые несут в себе в большей степени физическую суть метода, позволяют более глубоко понять и изучить метод и основные его принципы. Этапы 1–3 позволяют закрепить навыки определения числа лишних связей, выбора рациональных расчетных О.С. метода сил, навыки кинематического анализа систем, построения эпюр внутренних сил в статически определимых системах (в О.С.), показать и закрепить умение вычислять перемещений по формулам Мора (1), для чего необходимо вычислить вручную коэффициенты δ_{SS} и Δ_{SP} (3), являющиеся как проверочными в расчете, так и контрольными в программе.

Программа проверяет правильность вычисления контрольных величин δ_{SS} и Δ_{SP} (с учетом допускаемых погрешностей) и при их верном вычислении выполняет расчет наиболее трудоемких этапов метода сил 4, 5, 6, то есть вычисляет все коэффициенты и свободные члены (единичные и грузовые перемещения (1)) системы уравнений, производит решение системы канонических уравнений метода сил (4) с определением неизвестных метода сил X_1, X_2, \dots, X_L , выполняет расчет и построение окончательной эпюры изгибающих моментов M (5).

Эпюры поперечных и продольных сил Q и N (этапы расчета 7 и 8) студент должен в конце рассчитать и построить опять же самостоятельно (вручную), а также выполнить статическую проверку равновесия рамы.

При неверном вычислении коэффициентов δ_{SS} или Δ_{SP} программа выдает соответствующее сообщение, и требуется произвести их расчет (или одного из них) заново с последующим новым вводом в программу для контроля.

Ввод исходных данных осуществляется в основном окне программы (рисунок 6), в котором показан ввод эпюры M_P для рамы, представленной на рисунке 5, где показана и выбранная расчетная основная система метода сил ($L=6$).

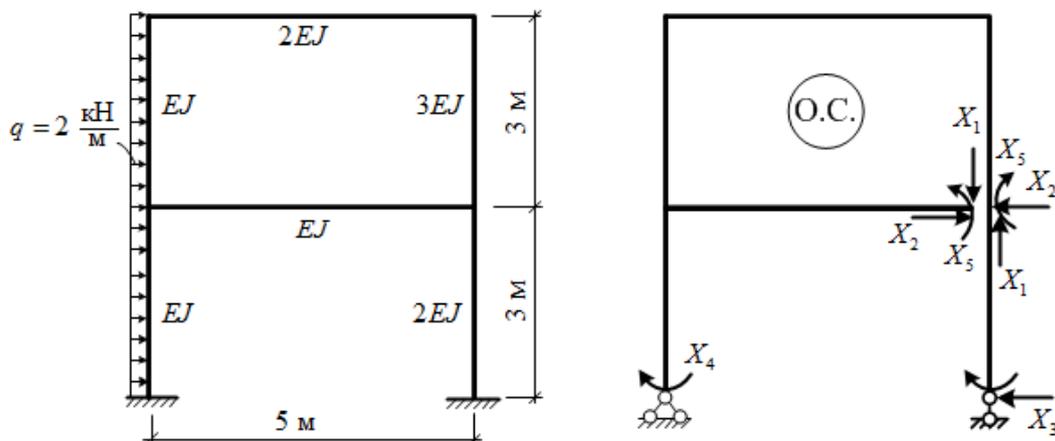


Рисунок 1 – Расчетная схема рамы и основная система метода сил

После ввода исходной информации, включающей координаты узлов, привязку стержней и их жесткостные характеристики, ординаты единичных ($\bar{M}_1, \bar{M}_2, \dots, \bar{M}_L$) и грузовой (M_P) эпюр изгибающих моментов, программу можно запустить на расчет.

В результате появляется окно ввода контрольных величин (рисунок 2), в котором необходимо ввести проверочные для расчета значения суммарных единичного δ_{SS} и грузового Δ_{SP} перемещений. Эти перемещения необходимо вычислить предварительно вручную.

Если контрольные значения вычислены неверно, то программа выдает соответствующее сообщение, и студент должен выполнить перерасчет контрольных величин.

Если контрольные значения вычислены верно, то программа выполняет полный расчет рамы – вычисляются все единичные коэффициенты (δ_{ik}) и свободные члены (Δ_{iP}) системы канонических уравнений метода сил, решается система канонических уравнений (4), определяются неизвестные метода сил X_i , выполняется расчет всех ординат (5) и графическое построение окончательной эпюры изгибающих моментов M .

Результаты расчета в программе представляются как в табличном, так и в графическом виде – изображается окончательная эпюра изгибающих моментов M (рисунок 3).

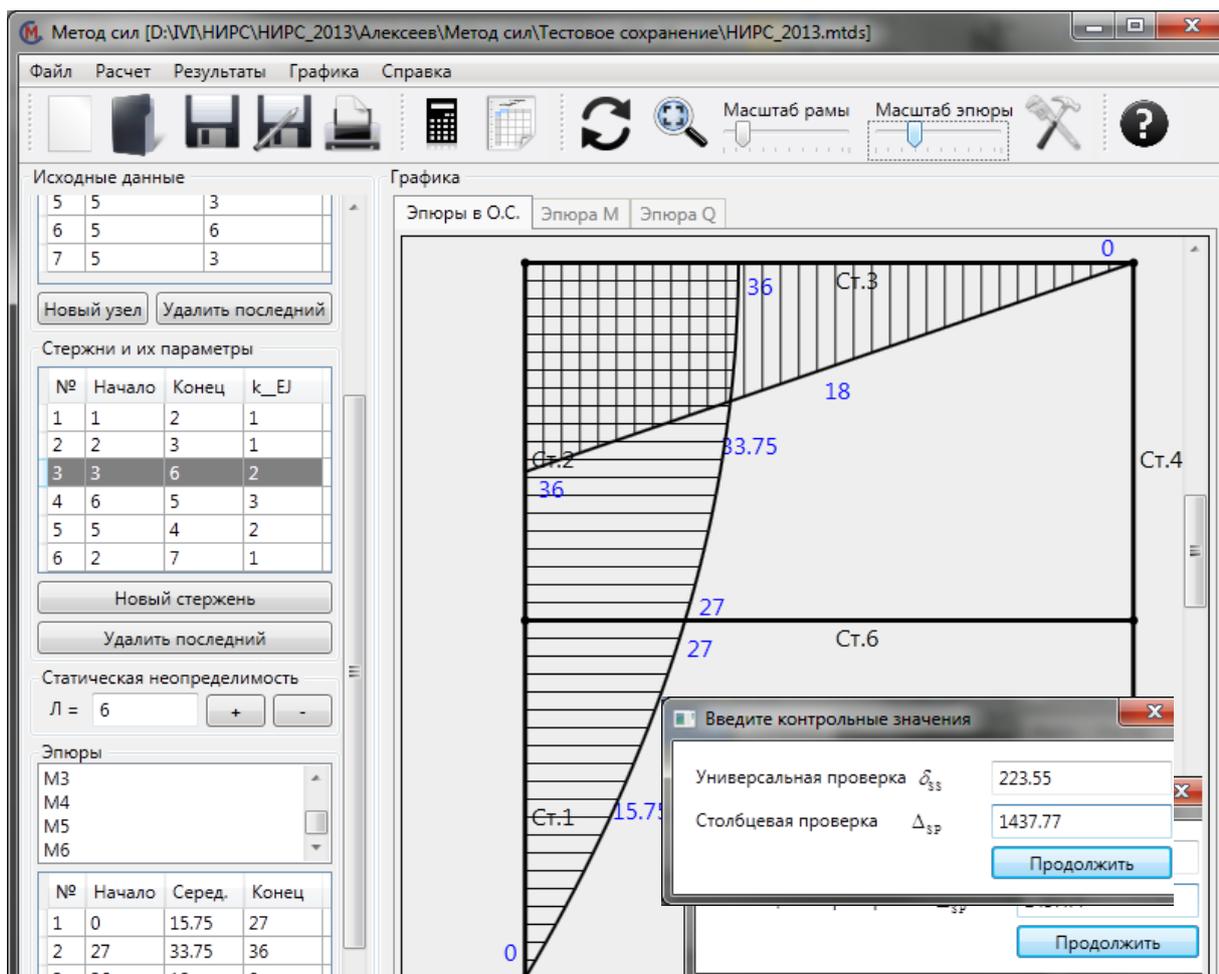


Рисунок 2 – Основное окно программы «MetSil» и окно ввода контрольных величин

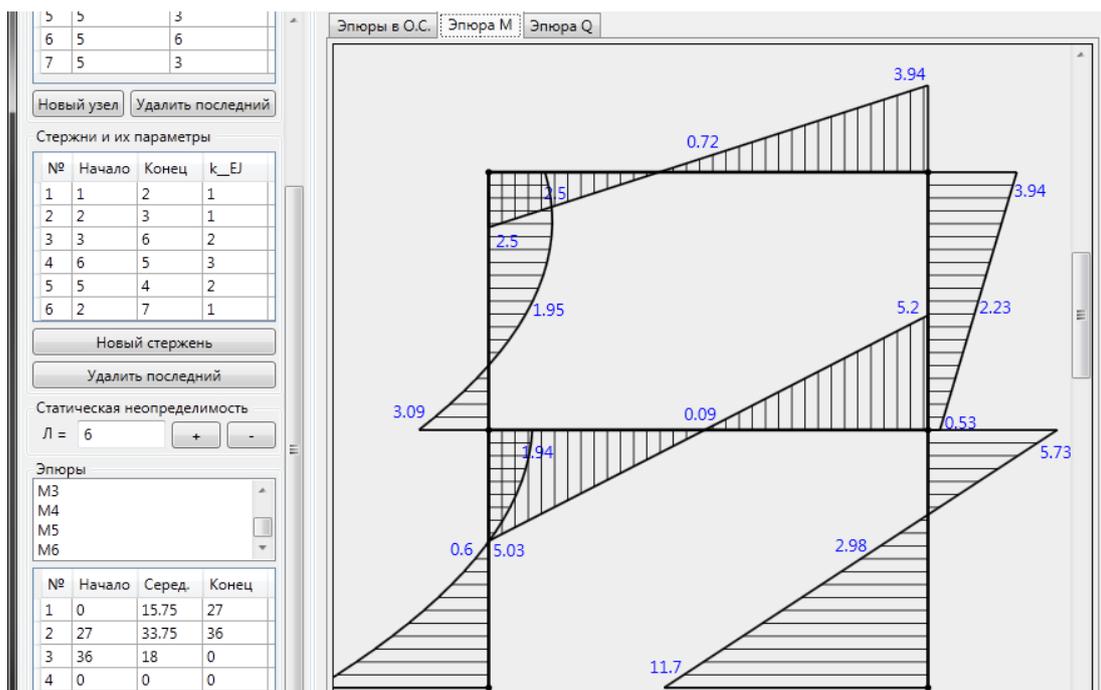
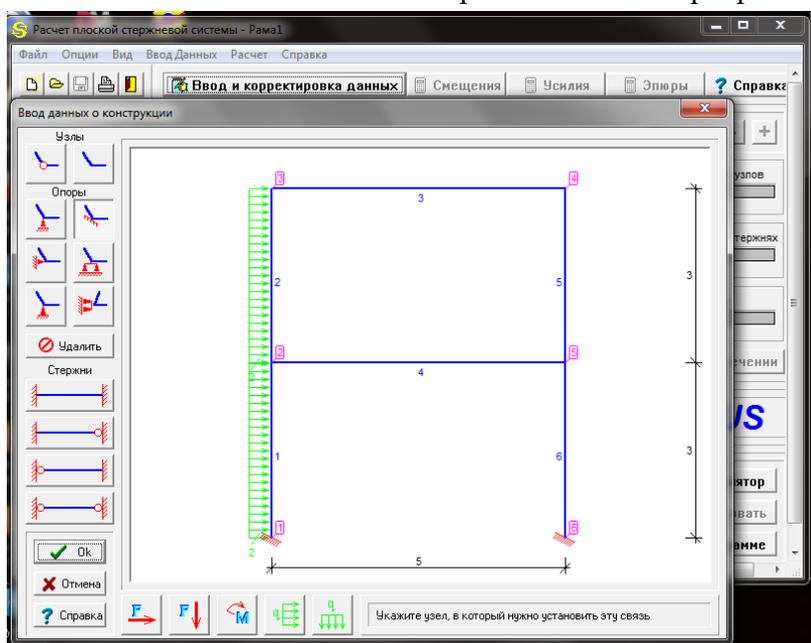


Рисунок 3 – Окончательная эпюра изгибающих моментов

При успешно выполненном расчете программа позволяет выполнять анализ характера зависимостей эпюр изгибающих моментов M и поперечных сил Q в раме и исследовать влияние величин жесткостей стержней на значения усилий в раме при одной и той же нагрузке, что делается уже без контроля. Все это важные моменты для самостоятельной работы студентов.

Второй вид программ – учебные компьютерные программы расчета конструкций и сооружений, которые в учебном процессе служат для проверки получаемых результатов, а также для выполнения исследовательских расчетов по анализу работы и поведения конструкций и сооружений. Эти программы разрабатываются на основе универсальных методов расчета, позволяющих рассчитывать широкий класс конструкций, сооружений. Сегодня это – обычно метод конечных элементов. К таким программам относятся следующие компьютерные программы, разработанные на кафедре:

- «SIRIUS» – Статический расчет плоских стержневых систем;
- «VEGA» – Расчет усилий в плоских стержневых системах при действии статических нагрузок (на базе МКЭ) с учетом упругой податливости узловых соединений;
- «ORION» – Статический расчет пространственных стержневых систем;
- «CrossBeam» – Статический расчет систем перекрестных балок.

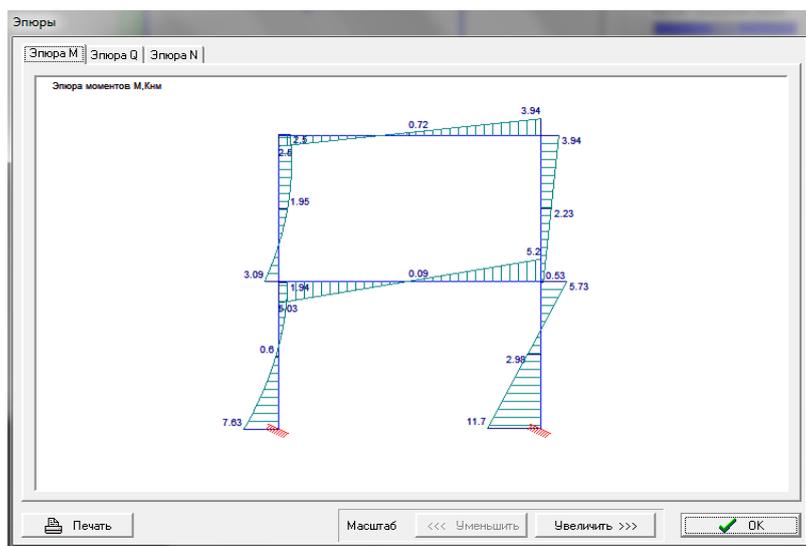


Программа «Sirius», например, предназначена для расчета плоских стержневых систем на статические нагрузки, создана на базе метода конечных элементов. Программа обладает удобным и интуитивным интерфейсом графического ввода исходных данных (рисунок 4), наглядным представлением результатов расчета в табличном и в графическом (рисунок 5) видах.

Рисунок 4 – Программа «Sirius». Ввод исходных данных

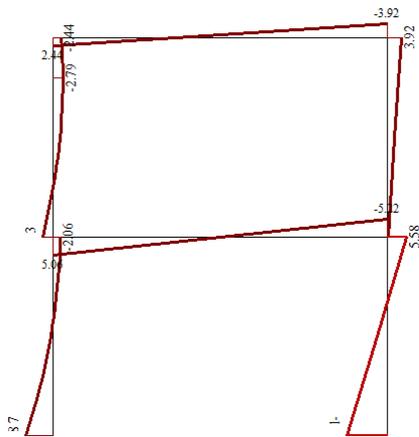
Рисунок 5 – Программа «Sirius». Результаты расчета

Важным является и использование для проверочных расчетов и анализа получаемых результатов компьютерных программных комплексов, используемых в расчетно-проектной практике. Это позволяет изучить возможности этих программ, особенности формирования расчетных схем при их использовании, приобрести опыт работы в этих программах. в университете используются программные комплексы LiraSap2013, SCAD Office 21.1. могут быть также использованы для ознакомления и проверки полученных решений, но для работы в них необходимо дополнительно.

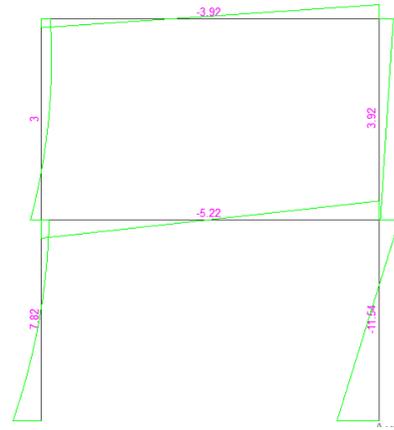


Результаты расчета рамы, изображенной на рис.1, (эпюра изгибающих моментов) показаны на рисунке 6 .

а)



б)



а) эпюра M, LiraSapr2013; б) эпюра M, SCADOffice 21.1

Рисунок 6 – Эпюры изгибающих моментов в программных комплексах

Стержневые системы при использовании МКЭ разделяются на конечные элементы (КЭ) с различными условиями их закрепления по концам, все КЭ соединяются друг с другом в узлах с соблюдением условий равновесия и неразрывности перемещений. Нагрузка прикладывается в узлах, а внеузловая нагрузка приводится к эквивалентной узловой. Для работы в программно-вычислительных комплексах LiraSapr2013[6] и SCAD [5] нужно предварительно ознакомиться с алгоритмом формирования расчетных моделей конструкций и получения визуализации результатов расчета.

Выполним расчет двухшарнирной арки с затяжкой, представленной на рис. 7. Жесткость арки принята постоянной по длине стержня EJ , жесткость затяжки принята равной: $EA_{зат} = 5EJ$. Ось стержня арки определяется параболической зависимостью:

$$y = \frac{4f}{l^2} x(l-x) = \frac{4 \cdot 4}{12^2} x(12-x) = 0,1111x(12-x) \cdot$$

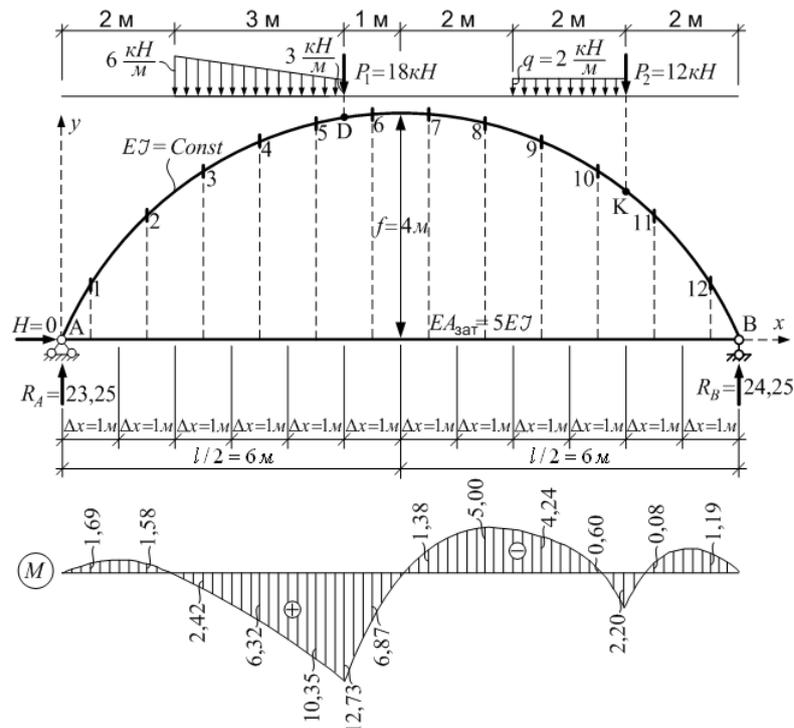
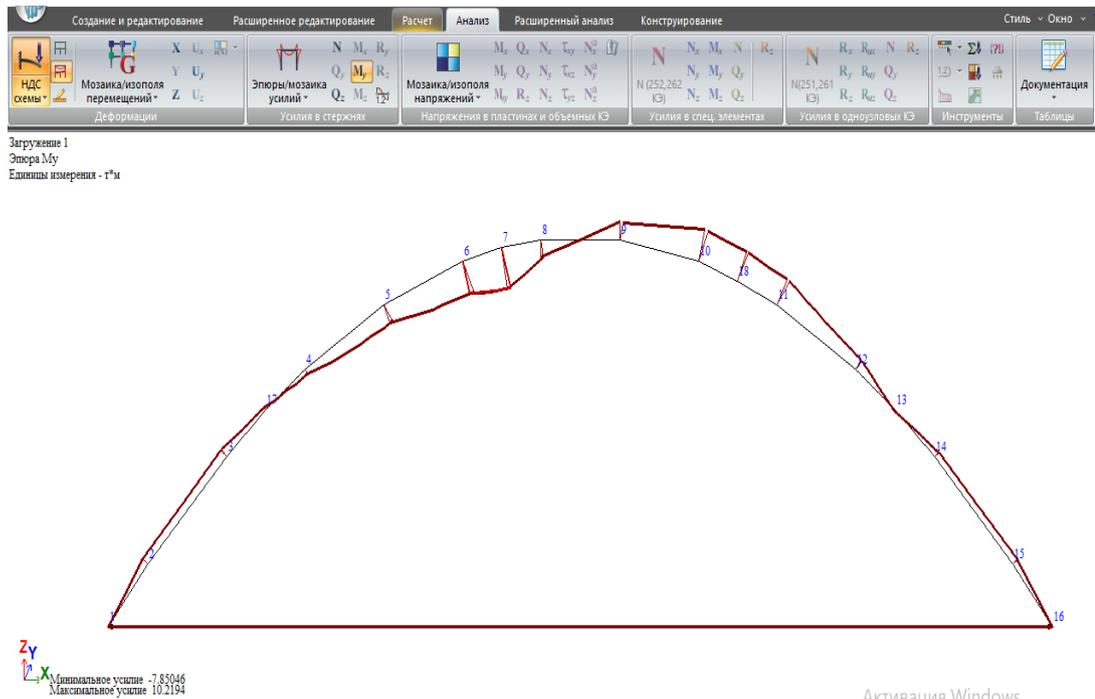
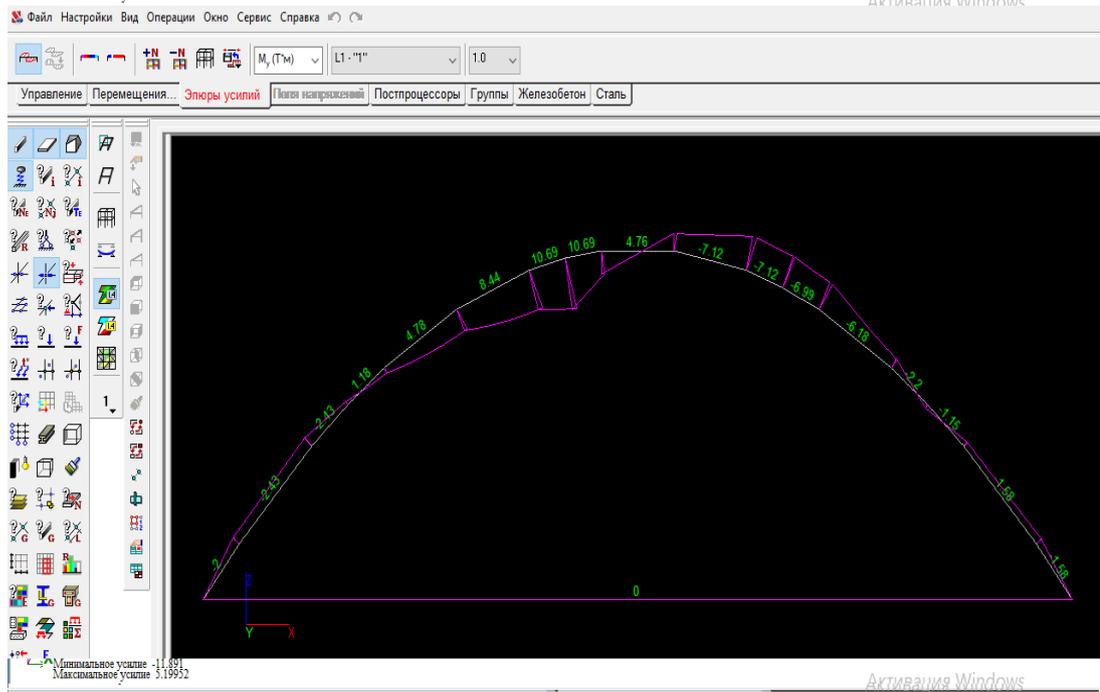


Рисунок 7 – Расчетная схема двухшарнирной арки, эпюра M

а)



б)



а) эпюра M , LiraSapr2013; б) эпюра M , SCADOffice 21.1

Рисунок 8 – К определению усилий двухшарнирной арки в LiraSapr2013, SCAD

Сегодня следует обратить внимание и на математическую среду MahtCad, которая в настоящее время очень сильно развита и имеет большие возможности как выполнения расчетов по различным программам среды, так и предлагает серьезные возможности в программировании, что позволяет решать в MahtCad самые серьезные задачи. Нами разработан, например, MahtCad-аналог программы «Sirius», который позволяет получить все необходимые численные результаты и даже отдельно для каждого из стержней изображать графики эпюр усилий. Такие программы студенты сегодня могут создавать сами и использовать их для решения любых своих задач.

Изложенные принципы создания учебных программ, с нашей точки зрения, создают условия и базу для более глубокого изучения методов расчета и понимания физических основ работы сооружений, способствуют интенсификации и активизации учебного процесса, развитию инженерного и творческого мышления у будущих специалистов.

Список источников

1. Игнатюк, В.И. Строительная механика : пособие по дисциплине «Строительная механика» для студентов и слушателей ИПКиП строительных специальностей / В. И. Игнатюк, И. С. Сыроквашко.– Брест : Изд-во БрГТУ, 2017. – 188 с.
2. Игнатюк, В.И. Создание учебных компьютерных программ для курса строительной механики / В.И. Игнатюк // Высшэйшая школа. – 2001. – № 6. – С. 35–38.
3. Учебная компьютерная программа расчета статически неопределимых рам методом сил // В. И. Игнатюк, Т. Ю. Алексеев // Вестник Брест. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 5 : Физика, математика, информатика. – С. 47–50.
4. Игнатюк, В.И. Численные методы решения задач строительной механики : учебное пособие / В.И. Игнатюк, Н.В. Бочарова. – Брест: БрГТУ, 2015. – 100 с.
5. Вычислительный комплекс SCAD/ В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко, М.А. Микитаренко, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер. –М: Издательство «СКАД СОФТ». 2013. – 656 с.
6. Водопьянов, Р.Ю., Титок, В.П., Артамонова, А.Е. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2015 Руководство пользователя. Обучающие примеры. / Под ред. А.С. Городецкого – М.: Электронное издание, 2015. – 460 с.