

новки, может работать в сети, имеет удобный интерфейс, «Help», возможность масштабирования графики.

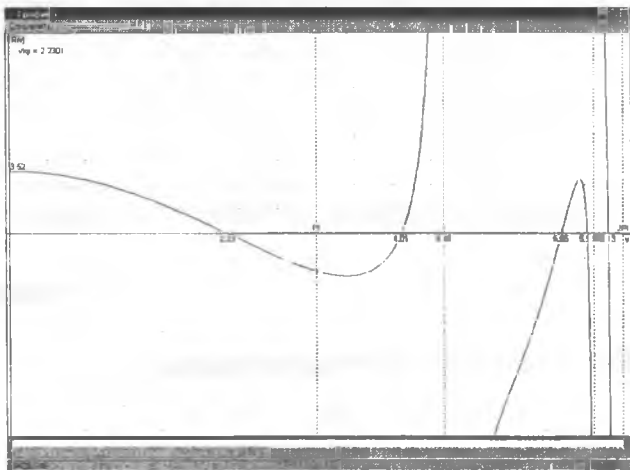


Рис. 3. Окно графика изменения функции устойчивости

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дарков А.В., Шалошников Н.Н. Строительная механика. – М.: Высш. шк., 1986. – 607 с.
2. Турчак Л.И. Основы численных методов. – М.: Наука, 1987. – 320 с.

УДК 681.3:624.04

**ИГНАТОВ А.Ю.**

*Научный руководитель: Игнатюк В.И., доцент, к.т.н.*

**РАСЧЕТ ТРЕХШАРНИРНЫХ АРОК НА СТАТИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ С ПОМОЩЬЮ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ НА ПЭВМ**

В задачах расчета сооружений можно выделить две стороны, одна из которых представляет суть и физические основы методов расчета и работы сооружений, а вторая связана с математической реализацией расчетных зависимостей и большими (в той или иной степени) объемами вычислений.

Учебные компьютерные программы (УКП) должны уменьшать объем ручных вычислений, облегчать трудоемкие и повторяющиеся вычислительные процессы, не скрывая при этом сущности и принципов расчета, а, наоборот, способствуя изучению методов расчета и физических основ работы сооружений. УКП должны представлять также возможности исследования поведения и работы сооружений при изменении их характеристик и параметров, то есть должны представлять собой обучающе-исследовательскую систему. Главная сложность при составлении таких программ – найти то соотношение двух сторон в задаче и методе ее решения, которое позволяло бы, с одной стороны, максимально облегчить математические вычисления и уменьшить объем ручного счета, а, с другой стороны, максимально сохранить сущностно-физическую сторону задач и методов расчета [2, 3].

На основе таких подходов и позиций составлялась рассматриваемая учебная компьютерная программа «Арка3».

Расчет трехшарнирных арок на статические нагрузки заключается [1] в нахождении внутренних силовых факторов (изгибающих моментов  $M$ , поперечных  $Q$  и продольных  $N$  сил) и в определении деформированного вида арок. Внутренние усилия  $M$ ,  $Q$  и  $N$  при действии внешних нагрузок (рис. 1) после определения опорных реакций вычисляются по формулам:

$$\begin{aligned}
 M_x = & R_A \cdot x - H_A \cdot y - \sum_{j=1}^{n_q} [q_j a_j (x_{qj} + 0,5a_j) + 0,5(q'_j - q_j) a_j (x_{qj} + 0,667 a_j)] - \\
 & - \sum_{i=1}^{n_{P_i}} P_i (x - x_{P_i}) + \sum_{k=1}^{n_{m_k}} m_k - \sum_{s=1}^{n_{F_s^{neb}}} F_s^{neb} (y - y_{F_s}) + \sum_{r=1}^{n_{F_r^{np}}} F_r^{np} (y_{Fr} - y) + \\
 & - \sum_{k=1}^{n_{q_k^{neb}}} [q_{rk}^{neb} b_k (y - y_{qk} - 0,5b_k) + 0,5(q'_{rk}{}^{neb} - q_{rk}^{neb}) b_k (y - y_{qk} - 0,667b_k)] - \\
 & + \sum_{u=1}^{n_{d_u}} [q_{ru}^{np} d_u (y_{qu} + 0,5d_u - y) + 0,5(q'_{ru}{}^{np} - q_{ru}^{np}) d_u (y_{qu} + 0,667d_u - y)]; \\
 Q_y = & \left[ R_A - \sum_{i=1}^{n_{P_i}} P_i - \sum_{j=1}^{n_q} \left( \frac{q_j + q'_j}{2} a_j \right) \right] \cos \varphi_x - \\
 & - \left[ H_A + \sum_{s=1}^{n_{F_s^{neb}}} F_s^{neb} - \sum_{r=1}^{n_{F_r^{np}}} F_r^{np} + \sum_{k=1}^{n_{q_k^{neb}}} \left( \frac{q_{rk}^{neb} + q'_{rk}{}^{neb}}{2} b_k \right) - \sum_{u=1}^{n_{d_u}} \left( \frac{q_{ru}^{np} + q'_{ru}{}^{np}}{2} d_u \right) \right] \sin \varphi_x; \\
 N_x = & - \left[ R_A - \sum_{i=1}^{n_{P_i}} P_i - \sum_{j=1}^{n_q} \left( \frac{q_j + q'_j}{2} a_j \right) \right] \sin \varphi_x - \\
 & - \left[ H_A + \sum_{s=1}^{n_{F_s^{neb}}} F_s^{neb} - \sum_{r=1}^{n_{F_r^{np}}} F_r^{np} + \sum_{k=1}^{n_{q_k^{neb}}} \left( \frac{q_{rk}^{neb} + q'_{rk}{}^{neb}}{2} b_k \right) - \sum_{u=1}^{n_{d_u}} \left( \frac{q_{ru}^{np} + q'_{ru}{}^{np}}{2} d_u \right) \right] \cos \varphi_x,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где:  $n_{P_i}$ ,  $n_{m_k}$ ,  $n_{q_j}$ ,  $n_{F_s}$ ,  $n_{F_r}$ ,  $n_{q_k}$ ,  $n_{d_u}$  – число соответственно вертикальных сил, сосредоточенных моментов, вертикальных распределенных нагрузок, горизонтальных сил и распределенных нагрузок слева и справа от шарнира С, действующих слева от сечения  $x$  (рис 1).

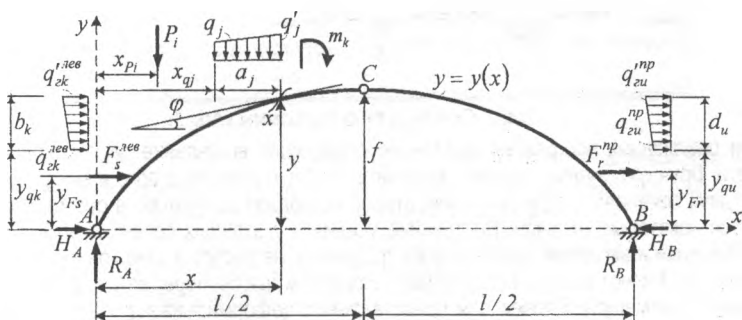


Рис. 1. Расчетная схема трехшарнирной арки

Для определений перемещений точек используется формула Мора, расчет по которой с учетом криволинейности осей арок и сложности грузовой эпюры изгибающих моментов выполняем путем численного интегрирования с применением формулы трапеций

$$\Delta_{ip} = \int \frac{\bar{M}_i M_{px}}{EJ} ds = \sum_{j=1}^{n_j} \frac{\Delta x_j}{E_j \cos \varphi_j} (2\bar{M}_i^{лев} \cdot M_{pj}^{лев} + \bar{M}_i^{лев} \cdot M_{pj}^{пр} + \bar{M}_i^{пр} \cdot M_{pj}^{лев} + 2\bar{M}_i^{пр} \cdot M_{pj}^{пр}), \quad (2)$$

где:  $\Delta_{ip}$  – перемещение точки в  $i$ -ом направлении;  $n_j$  – число участков, на которые разбивается пролет арки;  $E_j$  – жесткость  $j$ -го участка;  $\bar{M}_i, \bar{M}_i^{лев}, \bar{M}_i^{пр}$  – эюра изгибающих моментов от действия единичной силы, приложенной в направлении искомого перемещения ( $i$ ), и ее левая и правая ординаты на  $j$ -ом участке;  $M_p, M_{pj}^{лев}, M_{pj}^{пр}$  – эюра изгибающих моментов от внешней нагрузки и ее ординаты (левая и правая) на  $j$ -ом участке;  $\cos \varphi_j$  – косинус угла наклона касательной к оси арки на  $j$ -ом участке по отношению к оси  $x$ .

Расчеты внутренних усилий в сечениях и перемещений сечений в арке представляют собой однородные повторяющиеся для каждого из сечений вычисления, являющиеся достаточно трудоемкими. Поэтому естественно передать все эти вычисления компьютеру, что и сделано в программе «Arka3», основное рабочее окно которой представлено на рис. 2.

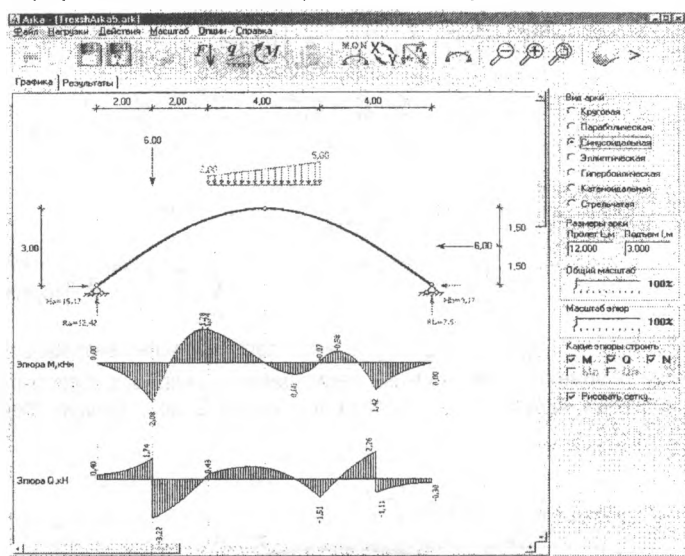


Рис. 2. Основное окно программы «Arka3»

При реализации программы выполнено следующее выделение двух сторон метода расчета. Вручную студент должен вычислить опорные реакции в арке и внутренние усилия в двух сечениях – одно на левой, второе на правой полуарках, в расчетах которых имеются некоторые отличия. Внутренние усилия в указанных сечениях арки являются контрольными и вводятся после запуска программы на расчет в окне контрольных величин (рис. 3). Расчет остальных сечений с заданным шагом передается программе. Вычисление перемещений точек для представления деформированного вида арки очень объемно, трудоемко и вручную вообще трудно выполнимо, поэтому полностью передается компьютерной программе. Если контрольные величины верны, то программа выполняет полный расчет арки. Если же какое-то из внутренних усилий вычислено неверно, то выдается сообщение об ошибке, и студент должен выполнить перерасчет указанной величины (величин). Результаты расчета арки представляются как в табличном ви-

де с представлением внутренних усилий для всех сечений, включая характерные, так и в графическом виде – показываются эпюры внутренних усилий  $M$ ,  $Q$  и  $N$  в арке (рис. 2) и ее деформированный вид (рис. 4). Внутренние усилия и перемещения при необходимости могут быть вычислены для любого заданного сечения.

Введите координаты контрольных сечений и усилия  $M$ ,  $Q$ ,  $N$  в них!

Xк1, м	Mк1, кН*м	Qк1, кН	Nк1, кН
4	1.739	0.43	-16.46
Xк2, м	Mк2, кН*м	Qк2, кН	Nк2, кН
	0.083	1.43	-16.9

$0.1 \cdot L < X_{к1} < 0.4 \cdot L$  или  $0.6 \cdot L < X_{к1} < 0.9 \cdot L$   
 $X_{к2} - X_{к1} < 0.45 \cdot L$  . если  $X_{к1} < L/2$   
 $X_{к2} > X_{к1} + 0.45 \cdot L$  . если  $X_{к1} > L/2$

ОК Отмена

Рис. 3. Окно ввода контрольных величин

Программа объемом 1,1 Мбт составлена в среде программирования Delphi 7, работает под управлением Windows 98 и выше, не требует специальной установки, может работать в сети, имеет удобный интерфейс работы в программе, развитый и подробный «Help», графическое представление и исходных данных, и результатов расчета. Имеются возможности ряда настроек вида программы и изображений в ней, масштабирования графических объектов, вычисления  $y$ -ой ординаты для любого заданного сечения  $x$ , автоматического разложения наклонных сил на горизонтальные и вертикальные составляющие. Исходные данные задачи могут быть сохранены в файл, а результаты расчета – выведены на печать.

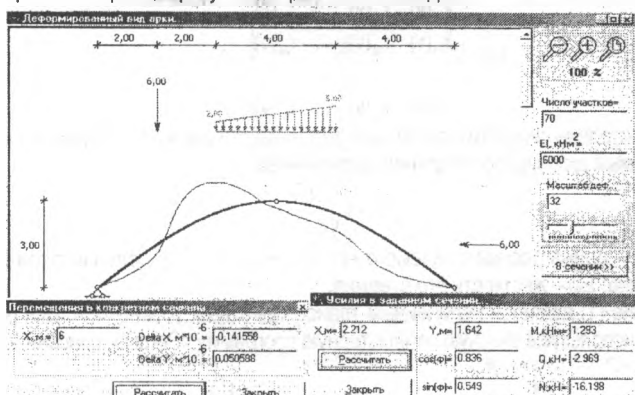


Рис. 4. Окно деформированного вида арки, перемещений и усилий в заданном сечении

После расчета программа позволяет студенту выполнить исследование влияния на напряженно-деформированное состояние арок ряда параметров:

- законов изменения оси арки (круговой, параболический, синусоидальный, катеноидальный, эллиптический, гиперболический, стрельчатый);
- относительного подъема арок ( $f/l$ ), характеризующего их крутизну;
- числа участков разбивки арок.

Изложенные подходы в создании учебной программы «Арка3», 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, индивидуализации познавательной деятельности, развитию творческого и инженерного мышления будущих специалистов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика. – М.: Высш. шк., 1986. – 607 с.
2. Игнатюк В.И. Создание учебных компьютерных программ для курса строительной механики // Высшая школа. – 2001. – № 6. – С. 35–38.
3. Игнатюк В.И., Богомолов Д.В. О принципах разработки учебной компьютерной программы по расчету статически неопределимых рам методом сил // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: Сб. трудов VII Международного научно-методич. семинара. – Брест: БГТУ, 2001. – С. 508–512.

УДК 681.3:624.04

**ЛЕВЧУК А.А.**

*Научный руководитель: Игнатюк В.И., доцент, к.т.н.*

### ИССЛЕДОВАНИЕ УРАВНЕНИЙ УСТОЙЧИВОСТИ В РАСЧЕТАХ РАМ НА УСТОЙЧИВОСТЬ МЕТОДОМ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Рассматриваются плоские рамы, нагруженные системой взаимосвязанных узловых центрально приложенных сил  $P_i$  ( $i=1\dots m$ ). Для рам известны их геометрия, размеры и соотношения жесткостей элементов. Считаем, что все силы  $P_i$  изменяются (растут) пропорционально одному параметру  $P$ . Задача устойчивости решается статическим способом с использованием метода перемещений [1]. Разрешающее уравнение устойчивости имеет вид

$$R(v) = \begin{vmatrix} r_{11}(v) & r_{12}(v) & \dots & r_{1n}(v) \\ r_{21}(v) & r_{22}(v) & \dots & r_{2n}(v) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1}(v) & r_{n2}(v) & \dots & r_{nn}(v) \end{vmatrix} = 0, \quad (1)$$

где:  $n$  – степень кинематической неопределимости рамы;  $v$  – параметр устойчивости, определяемый для сжатых стержней выражением

$$v_i = l_i \sqrt{\frac{N_i}{EJ_i}} \quad (2)$$

Здесь:  $l_i$  – длина рассматриваемого  $i$ -го стержня;  $N_i$  – продольная сжимающая сила в этом стержне;  $EJ_i$  – жесткость  $i$ -го стержня.

Уравнение (1) является нелинейным трансцендентным уравнением. Для решения таких уравнений используем учебную компьютерную программу «Parust», описанную в работе [1].

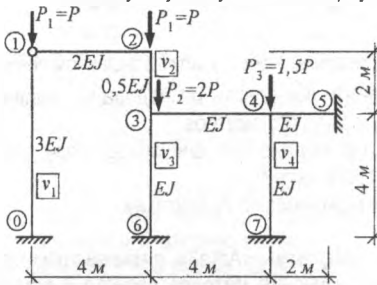


Рис. 1

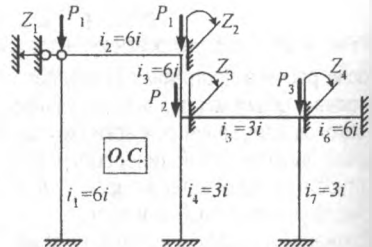


Рис. 2

Решим задачу устойчивости, например, для рамы, представленной на рис. 1. Пара-