



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ
METAL CONSTRUCTIONS

N1, ТОМ 15 (2009) 23-29

УДК 624.014:624.04:721.011.1

(09)-0179-1

РОЗРАХУНОК І ПРОЕКТУВАННЯ ЩОГЛ НА ВІДТЯЖКАХ В СЕРЕДОВИЩІ ПК ЛІРА

І.Д. Євзеров, М.В. Лазнюк, Т.О. Нілова

Державний науково-дослідний інститут автоматизованих систем в будівництві,

2А, вул. М.Кривоноса, 03037, м. Київ, Україна.

E-mail: lazniuk@pem.com

Отримана 16 жовтня 2008; прийнята 23 січня 2009

Анотація. Розглядаються загальні принципи вирішення в ПК ЛІРА задач з розрахунку сталевих решітчастих щогл на відтяжках за допомогою МСЕ. Приділена увага основним проблемам, які можуть виникати при завданні вихідних даних для розрахунку таких конструкцій, а також методам розрахунку, що використовуються. Показано, що нормативні методи розрахунку динамічних задач не допускають виконання розрахунків в нелінійній постановці. Визначення частот власних коливань для щогл на відтяжках з урахуванням геометричної нелінійності роботи її елементів на сучасній стадії розвитку програмних комплексів МСЕ викликає значні труднощі. Шляхи спрощення розрахункової схеми (лінеаризація моделі), а також намагання вирішити такі задачі за допомогою наближених методів можуть привести в ряді випадків до некоректних результатів. Виникає необхідність у використанні інших методів вирішення задач нелінійної динаміки. Для цього в ПК ЛІРА реалізований метод прямого інтегрування, який дозволяє вирішувати фізично і конструктивно нелінійні задачі. Подальше вдосконалення ПК ЛІРА бачиться розробникам саме в розвитку цього напрямку, в вирішенні інших класів нелінійних динамічних задач, в т.ч. і геометрично нелінійних, за допомогою метода прямого інтегрування.

Ключові слова: щогли на відтяжках, метод скінченних елементів (МСЕ), скінченно-елементне моделювання, динамічний розрахунок, геометрична нелінійність.

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАЧТ НА ОТТЯЖКАХ В СРЕДЕ ПК ЛИРА

И.Д. Евзеров, М.В. Лазнюк, Т.А. Нилова

*Государственный научно-исследовательский институт автоматизированных систем в
строительстве*

2А, ул. М.Кривоноса, 03037, г. Киев, Украина.

E-mail: lazniuk@pem.com

Получена 16 октября 2008; принята 23 января 2009

Аннотация. Рассматриваются общие принципы решения в ПК ЛИРА задач по расчету стальных решетчатых мачт на оттяжках с помощью МКЭ. Уделено внимание основным проблемам, которые могут возникнуть при задании исходных данных для расчета таких конструкций, а также используемым методам расчета. Показано, что нормативные методы расчета динамических задач не допускают выполнение расчетов в нелинейной постановке. Определение частот собственных колебаний для мачт на оттяжках с учетом геометрической нелинейности работы ее элементов на современной стадии развития программных комплексов МКЭ вызывает большие трудности. Пути упрощения расчетной схемы (линеаризация модели), а также попытки решения таких задач с помощью приближенных методов могут привести в ряде случаев к некорректным результатам.

Возникает необходимость в использовании других методов решения задач нелинейной динамики. Для этого в ПК ЛИРА реализован метод прямого интегрирования, который позволяет решать физически и конструктивно нелинейные задачи. Дальнейшее совершенствование ПК ЛИРА видится разработчикам именно в развитии этого направления, в решении других классов нелинейных динамических задач, в т.ч. и геометрически нелинейных, с помощью метода прямого интегрирования.

Ключевые слова: мачты на оттяжках, метод конечных элементов (МКЭ), конечно-элементное моделирование, динамический расчет, геометрическая нелинейность.

CALCULATION AND DESIGN OF GUYED MASTS IN THE PROGRAM "LIRA"

I. Yevzerov, M. Laznyuk, T. Nilova

The State Research Institute of Automated Systems in Construction

2A, Krivonosy Str., 03037, Kiev, Ukraine.

E-mail: laznyuk@pem.com

Received 16 October 2008; accepted 23 January 2009

Abstract. The implementation of the main principles of the finite element method to design steel guyed masts with the help of the LIRA program is considered. The authors focus on the main issues of solving nonlinear problems while working with the initial data and solving methods. The article shows that the design methods of solving dynamic problems can not be used in nonlinear cases. Nowadays, the FEM program development of the problem for guyed masts can not be correctly solved in a geometrically nonlinear case. Different ways of simplifying the abovementioned problem (linearization) and other approximate methods can also lead to incorrect results. Thus, it is necessary to use other methods of solving nonlinear dynamic problems. The finite difference method of solving physically nonlinear and one-side dynamic problems is used in the LIRA program. A further development of the LIRA program is carried out by the developers just in this sphere and to solve other classes of nonlinear dynamic problems, including geometrically nonlinear ones, with the help of the forth integration method, in particular.

Keywords: guyed masts, finite element method (FEM), finite element models, dynamic problem, geometric nonlinearity.

На сегодняшнем этапе развития компьютерной техники и промышленного программного обеспечения подавляющее большинство задач, связанных с нахождением НДС строительных конструкций, предполагается решать с помощью МКЭ как наиболее признанного инструмента во всем мире. Тем не менее, не все задачи с достаточной точностью и уверенностью в достоверности результатов можно решить с помощью современных промышленных программных средств. Как правило, это связано с тем, что либо отсутствует теоретическая основа или же реализация связана с определенными трудноразрешимыми сложностями. Одной из таких задач является расчет мачт на оттяжках (рис.1).

Основная трудность при решении таких задач заключается в необходимости решения

динамической задачи (нахождения собственных значений) и одновременном учете геометрической нелинейности. Эта проблема известна достаточно давно и присуща не только рассматриваемым здесь конструкциям. В ряде работ [1, 2] предлагаются инженерные пути решения.

Основные динамические воздействия на такие конструкции — ветровое (пульсационная составляющая) и сейсмическое, возможные особые — импульсные (от обрыва оттяжек), взрывные, а также инерционные нагрузки, возникающие при быстрых вращениях или перемещениях сооружений [3-5].

Для определения нагрузок от указанных видов воздействий необходимо создавать и рассчитывать отдельные динамические задачи.

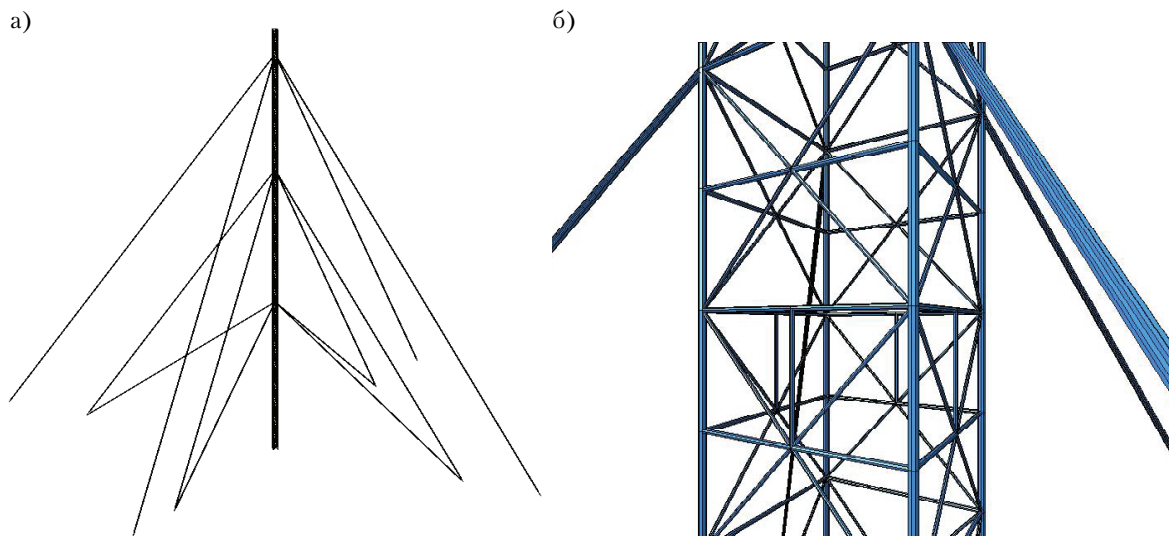


Рис. 1. Конечно-элементная модель мачты на оттяжках: *a* – расчетная схема; *b* – фрагмент модели с отображением поперечных сечений элементов.

Регламентируемый соответствующими нормативными документами метод форм (спектральный анализ) не применим в нелинейной постановке. В самом первом приближении можно воспользоваться коэффициентами динамичности, однако, как отмечается в работе [5], введение в расчет лишь динамического коэффициента приводит часто лишь к утяжелению конструкции и не может служить гарантией ее прочности, поэтому приходится обращаться к динамическому расчету. Кроме того, если для пульсационной составляющей от ветровой нагрузки значение коэффициента динамичности еще можно встретить в литературе, то расчет на импульсные воздействия с помощью коэффициентов динамичности представляется некорректным.

Для решения динамической задачи методом форм можно выполнить так называемую ее линеаризацию [1, 2]. Это инженерный метод, который может выполняться различными способами. Самый простой - замена включающихся на заданное направление ветра оттяжек рамными стержнями с такой же жесткостью EI и, если это необходимо, малой изгибной жесткостью EI и удаление из расчетной схемы остальных оттяжек.

В работе [1] приводятся два других способа, заключающиеся в замене оттяжек ферменными стержнями (работающими только на

сжатие-растяжение) или связью конечной жесткости — пружиной с вычислением их приведенных жесткостей.

Однако упрощение расчетной схемы (линеаризация модели) может привести к ошибкам в вычисленных частотах и формах колебаний [2]. Использование в спектральном анализе мгновенных матриц жесткости также может привести в ряде случаев к некорректным результатам. Поэтому правильность задания исходных данных для динамической задачи следует проверять путем сравнения полученного в ПК ЛИРА периода первой формы собственных колебаний мачты с его значением, найденным по приближенной (с ошибкой 10 ... 15 %) формуле [5, 6]:

$$T = 0,01 \cdot h \quad (1)$$

здесь h — высота мачты в метрах.

Полученные в результате динамического расчета составляющие инерционных сил в стволе суммируются и переносятся в нелинейную задачу. Здесь возникает другая трудность, поскольку количество нагрузок может быть достаточно большим. Например, только ветровых нагрузок может насчитываться 8-12 и более из-за необходимости учета нескольких опасных направлений ветра (для прямоугольных мачт — 2, для треугольных — 3), а также зональности ветровых воздействий [1, 3, 5, 6, 7]. Известно,

что распределение ветрового потока носит случайный характер (рис.2). Для некоторых элементов мачты (раскосы и распорки) более опасным может быть спад ветрового давления в отдельных зонах по высоте. Учет этого фактора особенно важен при расчетах высоких мачт (более 500м) [3]. Поэтому в ПК ЛИРА предусматривается автоматическая функция экспорта-импорта инерционных сил, что значительно облегчает эту задачу.

При моделировании оттяжек используются геометрически нелинейные КЭ (нить), предварительное (начальное или монтажное) натяжение задается с помощью геометрически нелинейного специального двухузлового КЭ для моделирования предварительного натяжения (форкопф) [8, 9].

Вычисления в ПК ЛИРА предполагается выполнять простым шаговым методом [8, 10]. Решение u нелинейной статической задачи удовлетворяет принципу возможных перемещений:

$$a(u, v) + l(v) = 0, \quad (2)$$

где v — возможное перемещение; $l(v)$, $a(u, v)$ —

функционалы возможных работ внешних и внутренних сил, линейные по v . Функционал $a(u, v)$ нелинеен по u .

Обозначим $a'(u, v, v)$ производную функционала $a(u, v)$ по u . Достаточным условием существования и единственности решения уравнения (2) является строгая монотонность функционала $a(u, v)$: при всех возможных перемещениях v справедливо неравенство:

$$a'(u, v, v) \geq K \|v\|^2, \quad (3)$$

где $\|v\|$ — энергетическая норма.

Неравенство (3) справедливо для физически нелинейных задач и для геометрически нелинейных задач в докритической стадии.

Если функционал $a'(u, v, w)$ непрерывен по u (это справедливо для геометрически и физически нелинейных задач при непрерывно дифференцируемой зависимости напряжений от деформаций), для решения задачи (2) применяется шаговый метод:

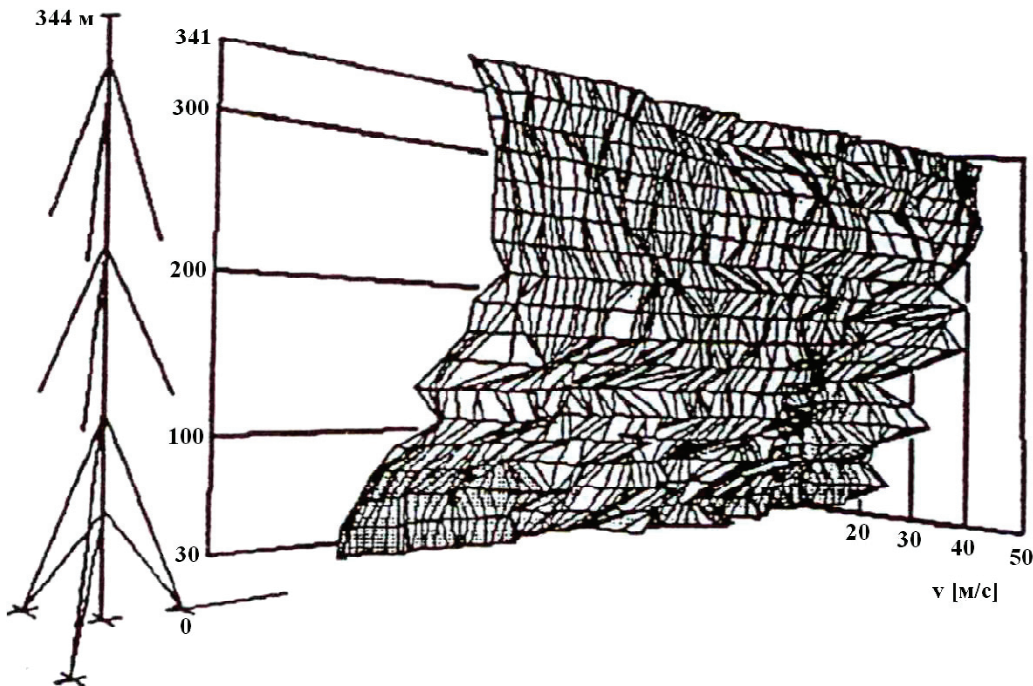


Рис. 2. Замерянное в течении 20с распределение ветрового потока [6].

$$a'(u_m, u_{m+1} - u_m, v) = (\theta_{m+1} - \theta_m) l(v), \quad (4)$$

$u_0 = 0$; $0 = \theta_0 < \theta_1 < \dots < \theta_{M-1} < \theta_M = 1$; M — количество шагов.

Для шагового метода справедлива оценка погрешности:

$$\|u - u_M\| \leq K \cdot \theta, \quad \theta = 1/M, \quad (5)$$

Для определения значения предварительного натяжения оттяжек в работе [11] предлагается два способа:

- задать последовательность монтажа и значения регулирующих воздействий и, решив серию задач для мачты с меняющейся расчетной схемой, вычислить искомые параметры предварительного напряжения;
- принять гипотезу, не учитывающую монтаж, но позволяющую каким-то образом выделить главные влияющие усилия преднатяжения и от них вычислить точно остальные параметры.

Первый способ может быть реализован с помощью специализированного нелинейного процессора ПК ЛИРА - МОНТАЖ+ [8, 9]. Этот способ позволяет более точно определить НДС конструкции, поскольку перед загрузением полезными и временными нагрузками определяется некоторое начальное НДС, сформировавшееся от поэтапного возведения мачты, демонтажа временных оттяжек и одновременного натяжения канатов. Однако для этого необходимо заранее знать технологию выполнения монтажа, монтажные схемы и т.д., что не всегда возможно. Кроме того, это требует достаточно большого количества вычислений. Поэтому, как правило, идут по второму пути.

Принимается гипотеза [11]: ствол мачты до монтажного натяжения оттяжек ненапряженный и приобретает НДС только под воздействием усилий преднатяжения оттяжек. Поскольку геометрия ствола формируется одновременно с созданием преднатяжения в оттяжках, рассматривать напряженный ствол в отрыве от процесса его формирования некорректно. Отсюда требование прямолинейности ствола и отсутствие горизонтальных равнодействующих в каждом ярусе от преднатяжения оттяжек.

Таким образом, первое главное требование к предварительному натяжению — это обеспе-

чение равновесия мачты и прямолинейности ствола. В сложных системах это приводит к необходимости итерационного подбора параметров преднатяжения. Однако, поскольку в большинстве случаев рассчитываются симметричные системы, определение предварительного напряжения можно несколько упростить [1]. В работе [5] отмечается, что величина начального напряжения выбирается, как правило, в пределах от 5 до 250 МПа. Более высокие значения необходимы только для мачт с повышенными требованиями в отношении их жесткости.

Для проверки устойчивости ствола мачты имеются два метода:

- решить линеаризованную задачу (по недеформированной схеме) [12] и найти коэффициенты запаса устойчивости при соответствующих сочетаниях нагрузжений;
- выполнить нелинейный расчет, увеличив прикладываемые нагрузки на коэффициент запаса устойчивости.

Второй метод более точен. В нелинейных задачах для проверки устойчивости симметричных мачт при наличии только вертикальных нагрузок рекомендуется задавать малые сосредоточенные силы, моделирующие начальные возмущения — наличие начальных несовершенств и отклонений в геометрии ствола, а также возможную неравномерность натяжения оттяжек. Для нахождения величины возмущений можно воспользоваться рекомендациями [4]: поперечная сила принимается в пределах 1,02 ... 2,5% от величины продольной силы в зависимости от гибкости $\lambda = l/i = 40 \dots 132$.

Для подбора или проверки сечений элементов решетки ствола мачты и оттяжек используется программа расчета стальных сечений - ЛИР-СТК [9]. Выполнение сопутствующих задач и вспомогательных функций при проектировании мачты на оттяжках (сбор ветровых, гололедных и температурных нагрузок, определение расчетных длин элементов решетки, расчет сварных швов и болтовых соединений при проектировании узлов и др.) предполагается вести с помощью соответствующих Пакетов прикладных программ "Нагрузки и воздействия" и "Стальные конструкции" [13].

Отмеченные выше трудности при решении динамических задач с учетом геометрической

нелинейности приводят к выводу о необходимости использования других методов решения задач нелинейной динамики. В ПК ЛИРА достаточно давно реализован метод прямого интегрирования, который позволяет решать физически и конструктивно нелинейные задачи [8, 10]. Ниже представлен алгоритм использования этого метода для геометрически нелинейных задач, который может быть использован для расчета мачт на оттяжках, висячих мостов, покрытий стадионов и других висячих конструкций различного назначения.

Решение u нелинейной статической задачи удовлетворяет принципу возможных перемещений:

$$b(u'', v) + a(u, v) + l(v) = 0, \quad (6)$$

где функции u, l зависят от времени t , $b(u, v)$ — функционал возможной работы инерционных сил, линейный по u, v , штрихами обозначены производные по времени. Существование и единственность решения уравнения (6) доказаны в [8, 14, 15].

Обозначим θ — шаг по времени, $t_m = m\theta$, $u_m = u(t_m)$, $\delta_m(u) = (u_{m+1} - u_m) / \theta$, $\gamma_m(u) = (u_{m+1} - 2u_m + u_{m-1}) / \theta^2$. Разностная схема имеет вид:

$$b(\gamma_m(u), v) + a'(u_m, \delta_m(u), v) + a(u_m, v) + l_m(v) = 0 \quad (7)$$

производная $a'(u, v, w)$ вычисляется без учёта усилий.

Безусловная устойчивость схемы (7) и оценка погрешности:

$$\|u - u_M\| \leq K \cdot \theta, \quad (8)$$

доказаны в [8, 16].

Выводы

Нормативные методы расчета динамических задач не допускают выполнение расчетов в нелинейной постановке. Определение частот собственных колебаний для мачт на оттяжках с учетом геометрической нелинейности работы ее элементов на современной стадии развития программных комплексов МКЭ вызывает большие

трудности. Пути упрощения расчетной схемы (линеаризация модели) могут привести к ошибкам в вычисленных частотах и формах колебаний. Попытки упростить решение таких задач с помощью приближенных способов, например, с использованием мгновенных матриц жесткостей в спектральном анализе, также могут привести в ряде случаев к некорректным результатам. Возникает необходимость в использовании других методов решения задач нелинейной динамики. Для этого в ПК ЛИРА реализован метод прямого интегрирования, который позволяет решать физически и конструктивно нелинейные задачи. Дальнейшее совершенствование ПК ЛИРА видится разработчикам именно в развитии этого направления, в решении других классов нелинейных динамических задач, в т.ч. и геометрически нелинейных, с помощью метода прямого интегрирования.

Литература

1. Перельмутер А.В. SCAD Office. Расчет мачт на оттяжках. К.: Издание ООО SCAD Office Soft, 2004. — 46 с.
2. Корнеев М.М. Стальные мосты: Теоретическое и практическое пособие по проектированию. — К., 2003. — 547 с.
3. Металлические конструкции. В 3т. Т.3. Стальные сооружения, конструкции из алюминиевых сплавов. Реконструкция, обследование, усиление и испытание конструкций зданий и сооружений. (Справочник проектировщика) / Под общ. ред. В.В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова). — М.: Изд-во АСВ, 1999. — 528 с.
4. ENV 1993-3-1. December 1997. Eurocode 3: Design of steel structures — Part 3-1: Towers, masts and chimneys — Towers and masts.
5. Савицкий Г.А. Основы расчета радиомачт. Статика и динамика. — М.: ГИЛВСР, 1953. — 275 с.
6. Металлические конструкции. В 3т. Т.3. Специальные конструкции и сооружения: Учеб. для строит. вузов; Под ред. В.В. Горева. — 2-е изд., испр. — М.: Высш. шк., 2002. — 544 с.
7. Stahlbau - sonderkapitel: 1. Abgespaunte Maste; Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Hartmut Pasternak, Cottbus, 1995.
8. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. — К.: "Факт", 2007. — 394 с.
9. ЛИРА 9.4. Руководство пользователя. Основы: Учебное пособие / Стрелец-Стрелецкий Е.Б., Боговис В.Е., Гензерский Ю.В. и др. / Под ред. Городецкого А.С. — К.: Изд-во "Факт", 2008. — 164с.
10. Городецкий А.С., Евзеров И.Д., Лазнюк М.В. Использование ПК ЛИРА в нелинейных задачах строительной механики // Математическое

- моделирование в механике деформируемых тел и конструкций. Методы граничных и конечных элементов: Материалы XXII Международной конференции (24-27 сентября 2007 г.). — СПб.: СПб ГАСУ, 2007. — С. 47-48.
11. Методика расчета мачт на оттяжках (статика, динамика, устойчивость). - К.: УкрНИИпроект-стальконструкция, 1991.
 12. Городецкий А.С., Евзеров И.Д., Лазнюк М.В. Функционалы устойчивости для пластин и стержней // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: Тезисы симпозиума (5-8 июня 2007 г.). — Нижний Новгород: ГОУ ВПО "ННГАСУ", 2007. — С. 15-16.
 13. Пакеты прикладных программ для автоматизированного проектирования конструкций: Учебное пособие / Барабаш М.С., Гераймович Ю.Д., Кекух А.Н. и др. / Под ред. Городецкого А.С. — К.: "Факт", 2006. — 112 с.
 14. Панагитопулос П. Неравенства в механике и их приложения. — М.: Мир, 1989. — 492 с.
 15. Лионс Ж.-Л. Некоторые методы решения нелинейных краевых задач. — М.: Мир, 1972. — 587 с.
 16. Евзеров И.Д. Приближенная схема для задачи о нелинейных колебаниях тонких пластин // Моделирование в механике. — Новосибирск, 1989. — Т.3 (20). — №2. — С. 54-63

Євзеров Ісаак Данилович є провідним науковим співробітником відділення САПР Державного науково-дослідного інституту автоматизованих систем в будівництві. Наукові інтереси: метод скінченних елементів, чисельні методи розв'язання нелінійних і нестационарних задач математичної фізики.

Лазнюк Михайло Васильович працює провідним науковим співробітником Державного науково-дослідного інституту автоматизованих систем в будівництві, а також головним конструктором ТОВ "ПЕМ Україна" (Zeman Group). Наукові інтереси: сталеві балки з гофрованою стінкою, методика автоматизованого проектування.

Нілова Тетяна Олексіївна працює провідним інженером Державного науково-дослідного інституту автоматизованих систем в будівництві. Наукові інтереси: комп'ютерні технології проектування з'єднань сталевих конструкцій, автоматизоване проектування вузлів металевих рамних каркасів.

Евзеров Исаак Данилович является ведущим научным сотрудником отделения САПР Государственного научно-исследовательского института автоматизированных систем в строительстве. Научные интересы: метод конечных элементов, численные методы решения нелинейных и нестационарных задач математической физики.

Лазнюк Михаил Васильевич является ведущим научный сотрудник Государственного научно-исследовательского института автоматизированных систем в строительстве, а также главным конструктором ООО "ПЕМ Украина" (Zeman Group). Научные интересы: стальные балки с гофрированной стенкой, методика автоматизированного проектирования.

Нилова Татьяна Алексеевна является ведущим инженером Государственного научно-исследовательского института автоматизированных систем в строительстве. Научные интересы: компьютерные технологии проектирования соединений стальных конструкций, автоматизированное проектирование узлов металлических рамных каркасов.

Yevzerov Isaak Danilovich is a Senior Research Scientist of the State Research Institute of Automated Systems in Construction. His research interests include the finite element method, numerical solution of nonlinear and non-stationary problems of mathematical physics.

Laznyuk Mykhailo Vasylyovych is a Senior Research Scientist of the State Research Institute of Automated Systems in Construction, and the Chief Designer of the "PEM Ukraine Ltd."(Zeman Group). His research interests include steel beams with corrugated web and methods of automated designing.

Nilova Tatiyana Alekseevna is a Leading Engineer of the State Research Institute of Automated Systems in Construction. Her research interests include computer based technology of designing steel structure joints, automated design of metal frame joints.