



УДК 658.5:624.014.:539.4

В.И. Лукашенко – кандидат технических наук, доцент**Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КазГАСУ)****НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ АРС ЭРА-ПК2000****АННОТАЦИЯ**

Предварительные исследования и обобщения позволили развить новые направления дальнейших разработок для включения их в АРС ЭРА-ПК2000 (Автоматизированная Расчетная Система Экспертиза Расчет Анализ Пространственных Конструкций) и расширить круг решаемых задач при расчетах пространственных конструкций.

V.I. Lukashenko – candidate of technical sciences, associate professor**Kazan State University of Architecture and Building (KSUAE)****DIRECTIONS OF AAS ECA-SD2000 DEVELOPMENT****ABSTRACT**

The preliminary studies and generalizations have resulted in developing of new directions of further engineering for enabling them into AAS ECA-SD2000 and in expanding of solvable tasks to calculations of spatial designs.

Предлагаемые в АРС ЭРА-ПК2000 новые программные средства и алгоритмы созданы на основе совершенствования многочисленных версий математического обеспечения и разработок [1-5].

Целью данной работы являлась постановка новых задач и разработка алгоритмов их решения с целью дальнейшего включения их в АРС на ПЭВМ.

Углубление исследований и расширение круга решаемых задач в современных исследованиях прочности конструкций при проектировании требует получения достоверных результатов на основе уточнения существующих моделей и разработки программных средств для реализации этих уточнений.

Предварительные исследования, представленные в работе [6], позволили выделить основные тенденции и актуальные направления усовершенствования математических моделей поведения объектов и методов реализации в АРС ЭРА-ПК2000:

1. Модели учета геометрически нелинейного поведения конструкций при статических воздействиях.

2. Моделирование нелинейного поведения многоэтажных зданий с железобетонным каркасом при действии сейсмических и импульсных нагрузок.

3. Задачи исследования релаксации напряжений в элементах пленочно-тканевых покрытий.

4. Задачи расчета вращающихся в жидкой среде дисков на действие совокупности произвольных гармонических нагрузок.

5. Внедрение новых технологий и программного обеспечения для исследований высотных сооружений при проектировании в области прочности и аэродинамики.

1. Модели учета геометрически нелинейного поведения конструкций при статических воздействиях

Задача линейной теории упругости в перемещениях по методу конечных элементов, как правило, сводится к решению уравнения вида:

$$[K^y]\{q\} - \{P\} = 0, \quad (1)$$

где: $[K^y]$ – упругая матрица жесткости конструкции, не зависящая от $\{q\}$, $\{q\}$ – вектор искомых узловых перемещений, $\{P\}$ – вектор узловых усилий. Учитывая, что деформированное состояние является однозначной функцией узловых перемещений и влияет на окончательный вид матрицы жесткости, можно записать нелинейное уравнение:

$$[K(q)]\{q\} = \{P\}, \quad (2)$$

которое приходится решать различными итерационными методами.

Для решения задачи (2) в АРС использован шагово-итерационный метод учета нелинейного поведения системы, связанный с конечными перемещениями ее элементов, работающих в пределах закона Гука. Нелинейный характер поведения конструкции отражается решением заданного в неявной форме нелинейного уравнения (2) с переменными коэффициентами, представляющими элементы матрицы жесткости $K(U)$:

$$K(U)U - P = 0, \quad (3)$$

где $U = U(P)$ – функция перемещений, отражающая нелинейное поведение узлов системы (рис. 1). Решение уравнения (3) производится следующим образом:

$$K_i^* \Delta U_i^* - \Delta P_i^* = 0, \quad (4)$$

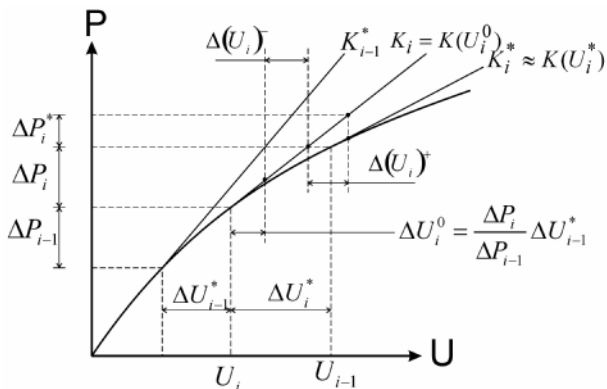


Рис. 1. Процедура шагово-итерационного метода

где: $K(U)$ на каждом шаге – линейная функция от U , а $U(P)$ – нелинейная. При этом, возникающая в ходе решения уравнения сила ΔP_i^* – есть величина невязки, которая эквивалентна величине невязки $\{f\}$, вводимой группой авторов: Дж. Стриклингом, В. Хейслером и В. Риземаном. Вычисление $K_i^* \approx K(U_i)$ из условия равновесия (4) отражает решение нелинейного уравнения (3) и производится методом Ньютона-Рафсона или модифицированным методом Ньютона-Рафсона на тех участках, где $\partial P/\partial U$ стремится к нулю.

Применение различных видов шагового метода приводит к решению, отличающемуся от точного решения, и дает накопление погрешности на каждом шаге. Предлагаемый метод уменьшает на каждом шаге невязку ΔP_i^* до минимума и, тем самым, повышает точность даже при небольшом количестве шагов. Применение различных итерационных методов типа Ньютона имеет следующие недостатки:

1. Методы не являются глобально сходящимися, то есть не все исходные векторы сходятся к решению.
2. Методы не применимы при сингулярности матрицы K_i .

Для устранения этих недостатков и уменьшения количества итераций используется алгоритм Ланцоша, который позволяет, выделяя “слабые формы” (формы колебаний, соответствующие относительно малым энергиям деформации), использовать их в итерационном процессе для определения начального приближения U_i .

2. Моделирование нелинейного поведения многоэтажных зданий с железобетонным каркасом при действии сейсмических и импульсных нагрузок

С применением средств расчетного комплекса ЭРА-ПК2000 была разработана программа по расчету строительных конструкций на действие динамических воздействий с учетом нелинейного поведения

материалов. Программа может быть использована для оценки напряженно-деформированного состояния многоэтажных зданий с железобетонным каркасом при действии сейсмических и взрывных (импульсных) нагрузок.

Программа реализует шагово-итерационный метод прямого интегрирования уравнений колебания системы. Процесс нагружения разбивается на небольшие интервалы времени, в начале и конце которых рассматриваются уравнения динамического равновесия системы. Начальными условиями для каждого интервала служат характеристики, полученные из предыдущего шага; в конце характеристики изменяются в соответствии с текущим напряженно-деформированным состоянием.

Уравнение динамического равновесия системы записывается в форме:

$$m\ddot{\Delta \mathbf{u}}(t) + c\dot{\Delta \mathbf{u}} + k(t)\Delta \mathbf{u} = \Delta \mathbf{p}(t), \quad (5)$$

где m , c , k – матрицы масс, демпфирования и жесткости, соответственно; $\Delta \mathbf{u}$, $\dot{\Delta \mathbf{u}}$, $\ddot{\Delta \mathbf{u}}$ – векторы изменения (приращения) ускорений, скоростей и перемещений масс системы в рассматриваемом интервале времени; $\Delta \mathbf{p}$ – приращение нагрузки.

Решение уравнений (6) производится методом Холлота (методом линейных ускорений).

$$\dot{k}(t)\Delta \mathbf{y}(t) = \Delta \dot{\mathbf{p}}(t), \quad (6)$$

$$\dot{k}(t) = k(t) + \frac{6}{\Delta t^2}m + \frac{3}{\Delta t}c, \quad (7)$$

$$\Delta \dot{\mathbf{p}}(t) = -m\ddot{\Delta \mathbf{y}}_p(t) + m \left[\frac{6}{\Delta t} \dot{\Delta \mathbf{y}}(t) + 3\ddot{\Delta \mathbf{y}}(t) \right] + c \left[3\dot{\Delta \mathbf{y}}(t) + \frac{\Delta t}{2} \ddot{\Delta \mathbf{y}}(t) \right]. \quad (8)$$

Здесь: $\dot{k}(t)$ – матрица эффективной динамической жесткости, а $\Delta \dot{\mathbf{p}}(t)$ – приращение эффективной нагрузки.

Динамический расчет проводится в следующей последовательности: на каждом интервале времени задается приращение нагрузки. Вычисляются матрицы $\dot{k}(t)$, $\Delta \dot{\mathbf{p}}(t)$ и решается система уравнений (7).

Приращения $\Delta \mathbf{u}$ определяются в предположении, что коэффициенты затухания постоянны, и все происходящие нелинейные процессы в системе отражаются на матрице жесткости $k(t)$. Коэффициенты матрицы жесткости определяются величиной составляющих жесткости элементов системы B , вычисление которых производится на основе диаграмм деформирования железобетонных элементов “Момент

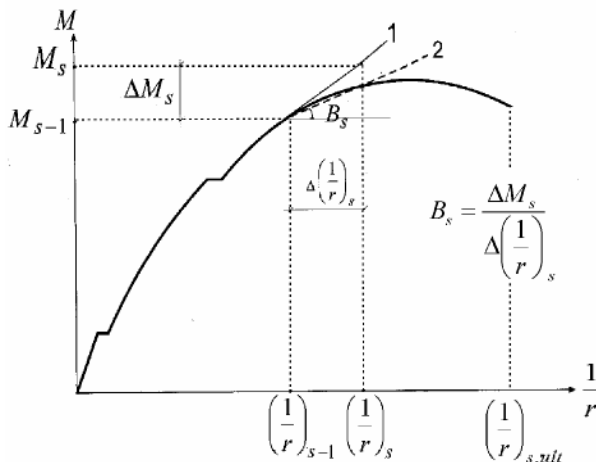


Рис. 2. Определение жесткости элемента системы на шаге s по диаграмме “Момент – кривизна”:

1 – начальное приближение; 2 – секущая составляющая жесткости.

$M_{s-1}, \left(\frac{1}{r}\right)_{s-1}$ – изгибающий момент и кривизна в сечении элемента, полученные в конце предыдущего шага;

$M_s, \left(\frac{1}{r}\right)_s$ – изгибающий момент и кривизна в сечении элемента, полученные в конце рассматриваемого шага s .

– кривизна” с включением итерационного процесса.

По выполнении условия сходимости производится проверка условия жесткости (кривизна элементов не должна превышать предельных значений). Если жесткость системы обеспечена, вычисляются значения перемещений, скоростей и ускорений в конце рассматриваемого интервала времени. Полученные величины служат начальными условиями для следующего шага интегрирования. Невыполнение условия жесткости в каком-либо элементе равносильно развитию в нем пластического шарнира. В этом случае

определяется жесткость системы, соответствующая моменту образования шарнира, вносятся изменения в расчетную схему здания (жесткое защемление элемента заменяется шарнирным). И проводится дальнейший расчет до окончания нагружения или до образования такого количества шарниров, которое превращает конструкцию в механизм. Причем, выключение связей производится по очереди. Если в пределах одного шага выключается сразу несколько элементов, то этот шаг повторяется вновь с более мелким разбиением.

3. Исследование релаксации напряжений в элементах пленочно-тканевых покрытий

Для пленочно-тканевого покрытия на основе экспериментальных исследований установлены законы изменения во времени физических свойств материалов в зависимости от исходного напряженного состояния. Ставится задача определения изменяющегося во времени НДС фрагмента пленочно-тканевого покрытия при заданной начальной деформации на его границах.

Решается объемная линейная задача теории упругости. Нити и пленочный наполнитель моделируются конечными элементами тетраэдра в области рассчитываемого фрагмента.

На основе АРС ЭРА-ПК2000 был составлен комплекс дополнительных программ, реализующих решение этой задачи.

Сначала необходимо запустить программу **formanew.exe**. В этой программе на основе параметров, указанных в файле **formanit.vv**, решением системы трансцендентных уравнений определяются геометрические параметры нитей основы и утка – прообразы пространственного представления их пересечения (рис. 3).

На выходе образуется файл **formanit.viv**, в котором содержатся эти вспомогательные параметры. Затем запускается программа **testpov.exe**. В ней образуются координаты узлов КЭ сетки нитей и топология. В

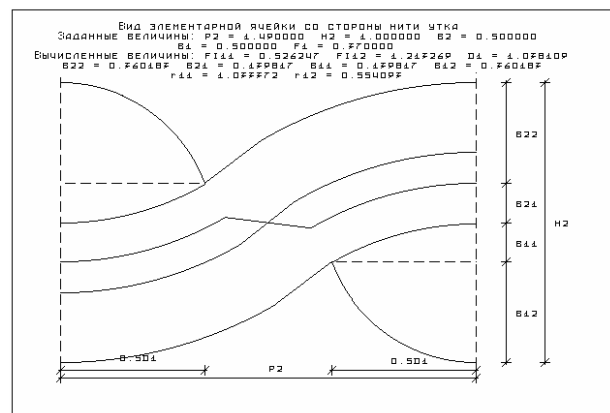
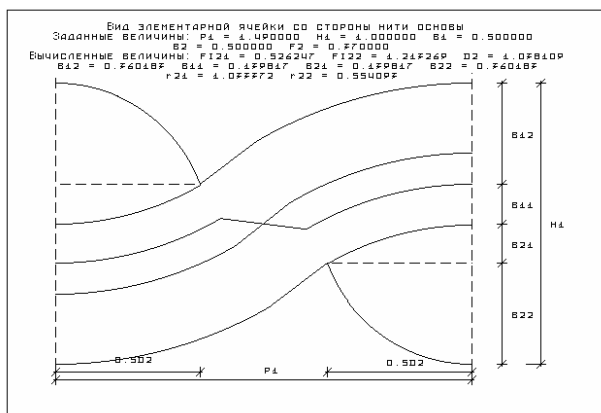


Рис. 3. Прообразы пространственного представления пересечения нитей

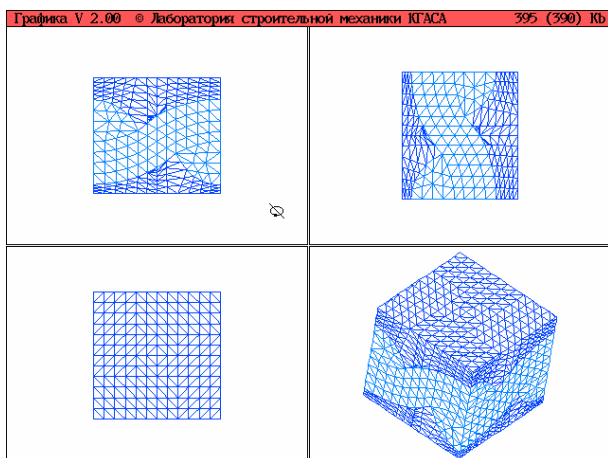


Рис. 4. Фрагмент пленочно-тканевого покрытия (расчетная модель)

результате генерируется расчетная модель фрагмента (рис. 4).

Далее происходит запуск программы **min_lent.exe**, в которой определяется новая нумерация узлов с целью минимизировать ширину ленты матрицы жесткости объединенной конструкции. Входные данные выбираются из файла **pover.viv**. Результат помещается в файл **invp.vv**.

На рис. 5 показаны некоторые результаты и возможности их представления для варианта представления фрагмента 2457 узлов (из них 640 узлов нитей) и случая нагружения торца равномерным наложенным перемещением вдоль оси X.

4. Расчет статора роторно-пульсационного аппарата (РПА) на действие совокупности произвольных гармонических нагрузок

Для получения устойчивых эмульсий механическим способом в РПА используется явление кавитации, возникающее при взаимодействии зубьев статора со смесью, разгоняемой ротором до определенной скорости. При определенных размерах статора геометрия расположения, количество рядов зубьев и их размеры могут быть подобраны таким образом, что частоты собственных колебаний зубьев и частоты возникновения вихрей, а, следовательно, и

частоты кавитационных импульсов совпадают. В этом случае процесс образования эмульсии протекает наиболее эффективно и обеспечивает наилучшее её качество.

На рис. 6 показана расчетная модель статора РПА. В модели 7536 узлов с тремя линейными степенями свободы. Область заполнена объёмными элементами тетраэдра. Расчет проводился на собственные колебания и на действие совокупности произвольных гармонических нагрузок с целью получения динамического отклика системы на спектр динамических воздействий в диапазоне частот, определяющих возникновение кавитации на зубьях статора при различных скоростях вращения ротора РПА. В расчетах использованы решения в линейной постановке и дополнительные программы **stiffet.exe** и **vin_gart.exe**, не входящие в основную библиотеку АРС ЭРА-ПК2000.

5. Внедрение новых технологий и программного обеспечения для исследований высотных сооружений при проектировании в области прочности и аэродинамики

В настоящее время в Казани и других крупных городах РТ наметилась тенденция строительства многоэтажных высотных зданий. Тенденция к высотному строительству и применение всё более лёгких конструкций приводит к доминирующей роли ветровых нагрузок на несущие каркасы зданий. Действующие СНИПы и другие нормативные документы в этой области устарели, а их новой редакцией государственные органы не занимаются. Имеющийся опыт проектирования, возведения и эксплуатации в отечественной и зарубежной практике показывает, что существенное значение для обеспечения прочности, безопасности, комфортности и экологичности высотных сооружений имеет детальный учет аэродинамических нагрузок. Действующие СНИПы не обеспечивают выполнение этих требований в условиях нестандартных архитектурных решений, размещения и необходимости учета сложной аэродинамики обтекания.

В соответствии с Концепцией научной, научно-технической и инновационной политики в системе

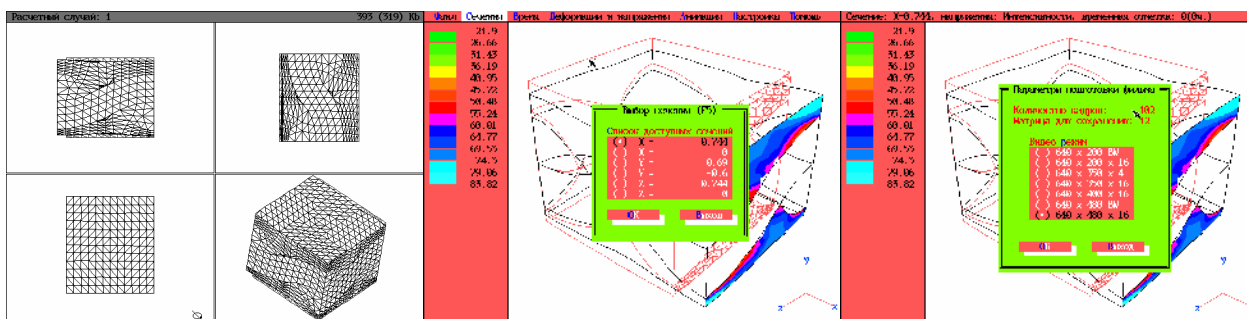


Рис. 5. Исходное НДС фрагмента (выбор сечения, настройка параметров фильма)

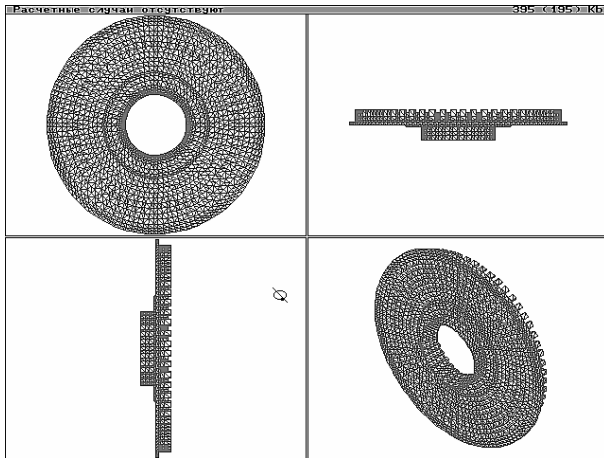


Рис. 6. Расчетная модель статора РПА

образования Российской Федерации, учитывая необходимость применения в строительной и других отраслях разработок ОНИЛ КазГАСУ и ИАТТ КГТУ им. А.Н. Туполева, на территории КазГАСУ создан совместный Центр внедрения новых технологий (ЦВНТ) расчетно-экспериментальных исследований.

Некоторые регионы, в частности г. Москва, разрабатывают свою систему нормативных актов с целью расширения нормативно-методической базы, необходимой для расчета и проектирования высотных зданий и сооружений, входящих в состав высотных многофункциональных комплексов. Здесь рассматриваются минимальные значения нагрузок и воздействий, которые как дополнение и уточнение положений СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия» рекомендуется использовать при проектировании несущих и ограждающих конструкций, оснований и фундаментов зданий и сооружений высотой более 75 метров. В Казани уже строятся такие здания, поэтому разработка аналогичных регламентов обеспечит требуемые функциональные, прочностные и другие качества возводимых сооружений.

Накопленный в КазГАСУ опыт расчета таких зданий, в том числе на ветровые и сейсмические нагрузки в сочетании с экспериментальными продувками моделей сооружений в оборудованной для этих целей аэродинамической трубе КГТУ им. А.Н. Туполева, позволит решать на требуемом уровне поставленные задачи непосредственно в Казани.

Планируются направленные расчетно-экспериментальные исследования, накопление, углубление и расширение исследований, обобщение результатов и включение новых алгоритмов и программ в библиотеку АРС ЭРА-ПК2000.

Литература

1. Аргирис Дж., Келси С. Расчет фюзеляжей произвольного поперечного сечения и произвольного закона изменения, сечений вдоль оси. // Современные методы расчета сложных статически неопределимых систем / Пер. с англ. под ред. Филина А.П. – Л.: Судпромгиз, 1961. – С. 421-653.
2. Бурман З.И., Лукашенко В.И., Тимофеев М.Т. Расчет тонкостенных подкрепленных оболочек методом конечных элементов с применением ЭЦВМ. – Казань: Изд-во КГУ, 1973. – 569 с.
3. Артюхин Г.А. Методы и алгоритмы генерации данных для подсистемы автоматизированного проектирования подкрепленных оболочек. – Дисс... канд. техн. наук. – Киев, 1985. – 158 с.
4. Бурман З.И., Аксенов О.М., Лукашенко В.И., Тимофеев М.Т. Суперэлементный расчет подкрепленных оболочек. – М.: Машиностроение, 1982. – 256 с.
5. Бурман З.И., Артюхин Г.А., Зархин Б.Я. Программное обеспечение матричных алгоритмов и метода конечных элементов в инженерных расчетах. – М.: Машиностроение, 1988. – 256 с.
6. Лукашенко В.И., Абдюшев А.А., Доронин М.М., Нуриева Д.М., Сладков А.В. Экспертиза, расчет, анализ пространственных конструкций: Монография. – Казань: КазГАСУ, 2006. – 321 с.