

Д. Г. Кучерявенко, В. Л. Якушев

РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЗАДАЧИ УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКИХ ОБОЛОЧЕК МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассматриваются нелинейные деформации и устойчивость тонких оболочек. При таких расчетах учет нелинейных эффектов является сложной задачей из-за нелинейной зависимости между внешней нагрузкой и перемещением точек оболочки и наличием особых точек в решении. Пространственная задача расчета на прочность при действии внешних нагрузок от присоединенных трубопроводов узлов врезки штуцеров Ду 600 в корпус вакуумного конденсатора 2000 КВКГ-4-М10-У-И/25Г-6-6 установки АВТ-4 Рязанского НПЗ решается методом конечных элементов.

Проектирование объектов топливно-энергетического комплекса Тюменского региона ведется с опорой на государственные стандарты, разработанные несколько десятков лет назад и основанные, в большей части, на экспериментальных данных. Разработка новых подходов с привлечением современных высокопроизводительных суперкомпьютеров и предложенных или усовершенствованных в последнее время математических методов позволит повысить эффективность, качество и скорость проектирования подобных объектов.

До недавнего времени задачи устойчивости оболочек невозможно было решать из-за отсутствия мощных вычислительных средств. С появлением суперкомпьютеров и резким увеличением производительности персональных машин ситуация коренным образом изменилась. Разработано множество математических методов, наибольшую популярность из которых приобрел метод конечных элементов. На его основе создано несколько крупных пакетов программ (таких, как ANSYS, FEMLAB и т. п.), позволяющих решать довольно широкий спектр задач. (К сожалению, все они зарубежного происхождения, и авторам неизвестно ни одного российского аналога.) Тем не менее возможности этих пакетов ограничены и определяются лишь базовыми элементами и методологиями, включенными в их состав, что далеко не всегда позволяет решить поставленные задачи.

В классическом методе конечных элементов принято пренебрегать компонентами, зависящими от вязких и динамических сил. Можно пойти и по другому пути — пренебречь кинетической составляющей, оставив при этом вязкую. Вязкость в этом случае может рассматриваться не как реальное свойство материала, а как средство для получения непрерывного решения во времени при переходном процессе. Такой подход дает ряд вычислительных преимуществ, поскольку решение зависит только от одного параметра — времени, нет необходимости искать способы обхода особых точек, а на каждом временном слое рассматривается линейная эллиптическая задача, методы решения которой достаточно хорошо разработаны. Можно построить единый итерационный процесс для расчета нелинейных деформаций и устойчивости тонкостенных элементов, хорошо сходящийся около особых точек и позволяющий по единому алгоритму провести расчет нелинейных деформаций оболочки, устойчивых до- и закритических состояний, верхних и нижних критических нагрузок.

В результате была получена система алгебраических уравнений (1), описывающих деформацию оболочки:

$$K\dot{Q} + K_0 Q + P_n - P = 0, \quad (1)$$

здесь K — матрица коэффициентов жесткости;

Q — матрица узловых перемещений;

P — вектор нагрузки.

При скоростях обобщенных перемещений $\dot{Q} = 0$ (1) переходит в систему статических нелинейных уравнений, решение которых соответствует какому-либо устойчивому состоянию оболочки для заданной внешней нагрузки:

$$K_0 Q + P_n - P = 0. \quad (2)$$

В работе Стриклина Д. А. и др. [1] предложен для решения систем (2) самокорректирующийся метод первого порядка. В этом случае (2) дифференцируется по какому-либо параметру (например, нагрузке), и полученное выражение складывается с (2), умноженным на скалярную величину Z :

$$(K_0 + K_1 + \bar{K}_2)\dot{Q} + Z(K_0 Q + P_n - P) = 0. \quad (3)$$

Для решения нелинейных уравнений, подобных полученным выше, требуется выполнение большого количества арифметических операций на ЭВМ. В настоящее время единственной реальной возможностью

повышения производительности ЭВМ является использование систем параллельной обработки информации, позволяющих разделить вычислительный процесс или отдельные его этапы на независимые ветви, одновременно выполняемые на разных устройствах.

В рамках диссертационной работы специалистами АОТ «ВНИИНЕФТЕМАШ» было предложено выполнить расчет на прочность при действии внешних нагрузок от присоединенных трубопроводов узлов врезки штуцеров Ду 600 в корпус вакуумного конденсатора 2000 КВКГ-4-М10-У-И/25Г-6-6 установки АВТ-4 Рязанского НПЗ (рис. 1).

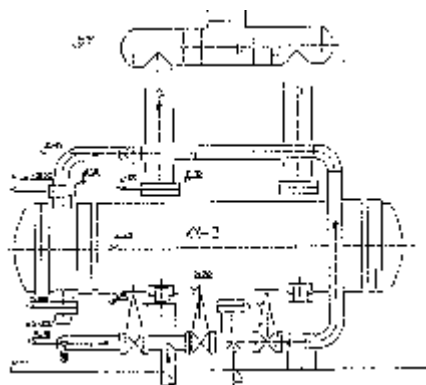


Рис. 1. Схема подсоединения вакуумных конденсаторов КХ-1 и КХ-2

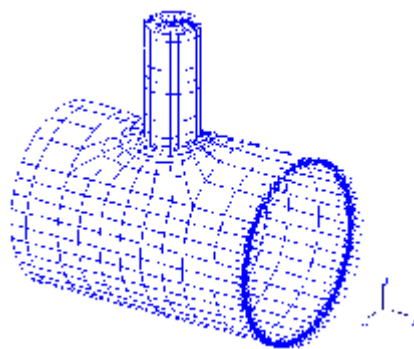


Рис. 2. Расчетная конечно-элементная модель

Ввиду симметрии конструкции можно рассматривать только ее половину. Расчетная конечно-элементная модель приведена на рис. 2.

При расчете был применен параллельный алгоритм. Расчетная область оболочки была разбита на ряд подобластей с одинаковым количеством конечных элементов. Разбиение области на подобласти представляет собой первый шаг на пути к решению задачи, и именно этот шаг не имеет теоретического обоснования. Искусство разбиения области зависит от инженерных навыков. Плохое или несовершенное разбиение будет приводить к ошибочным результатам, если даже остальные этапы осуществляются с достаточной точностью.

Исходная информация о каждой подобласти (геометрия оболочки, разбиение на конечные элементы, свойства материала, нагрузка, граничные условия) была передана закрепленному за ней независимому потоку. После этого потоки вычисляли параллельно и независимо друг от друга матрицы жесткости своей части оболочки с учетом граничных условий.

На следующем этапе в каждой такой матрице неизвестные, соответствующие внутренним узлам, выражались через неизвестные в узлах на границах между подобластями, а затем решалась система только для этих переменных итерационным методом путем пересылки неизвестных между потоками.

Качественная картина деформации, полученная в результате конечноэлементного расчета, приведена на рис. 3. На рис. 4 представлено распределение мембранных напряжений в конструкции. На рис. 5–10 представлены полученные в результате расчетов первые шесть форм потери устойчивости конструкции.

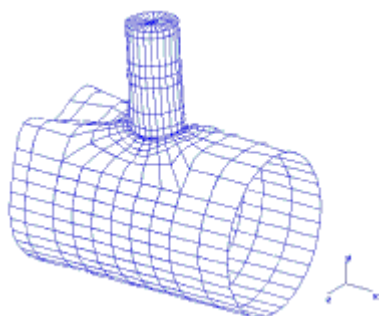


Рис. 3. Деформации конструкции при нагружении наружным давлением и внешними нагрузками от присоединенных трубопроводов

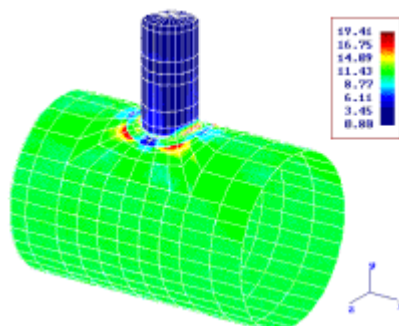


Рис. 4. Мембранные напряжения в конструкции при нагружении наружным давлением и внешними нагрузками от присоединенных трубопроводов

В результате расчета получены следующие величины коэффициентов запаса устойчивости по верхней

критической нагрузке:

Форма потери устойчивости

Коэффициент запаса устойчивости

Первая

5,28

Вторая

5,45

Третья

7,06

Четвертая

7,15

Пятая

7,83

Шестая

7,98

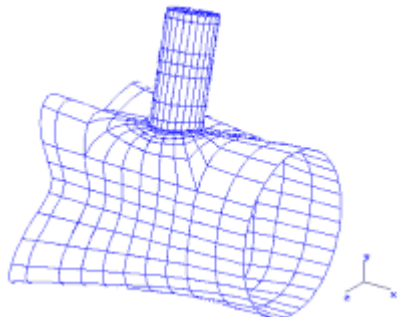


Рис. 5. Первая форма потери устойчивости

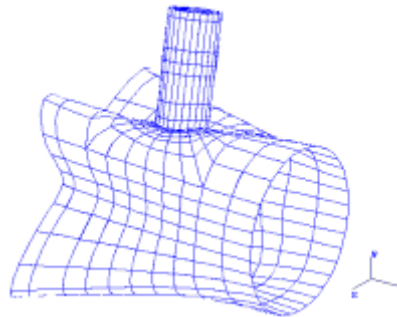


Рис. 6. Вторая форма потери устойчивости

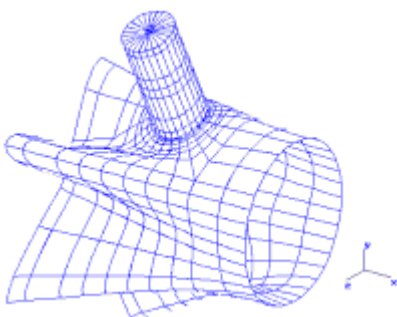


Рис. 7. Третья форма потери устойчивости

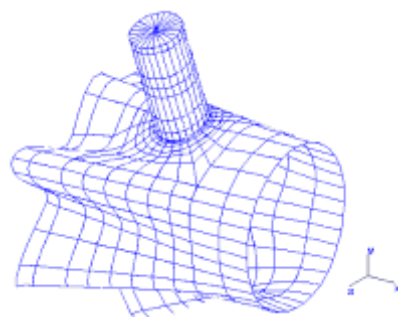


Рис. 8. Четвертая форма потери устойчивости

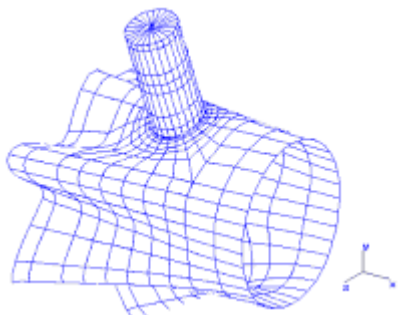


Рис. 9. Пятая форма потери устойчивости

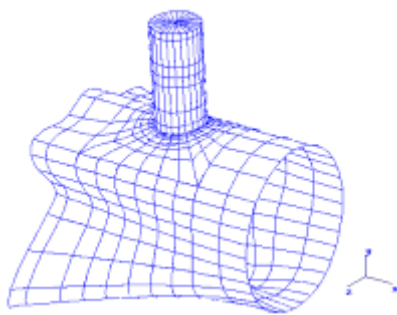


Рис. 10. Шестая форма потери устойчивости

Величины коэффициентов запаса устойчивости по верхней критической нагрузке во всех случаях превышают 5,0, что является достаточным для обеспечения необходимого запаса устойчивости. Следовательно, конструкцию можно признать надежной при эксплуатации в рамках заявленных величин внешнего воздействия.

Литература

1. Striclin J.A., Haisler W.E., Von Rieseeman W.A. Evaluation of solution procedures for material and/or geometrically nonlinear structural analysis. AIAA J., 41, 3, 1973. P. 292–299.
2. Zenisek A. A general theorem on triangular finite C(m)-elements // RAIRO. 1974. Analyse numerique, R2. P. 119–127.
3. Голованов А. И. Конечно-элементный расчет оболочек с дискретно заданной геометрией // Прочность и устойчивость оболочек / Тр. семинара. Вып. 19. Ч. 2. Казань, 1986. С. 69–82.
4. Голованов А. И., Корнишин М. С. Введение в метод конечных элементов статики тонких оболочек. Казань, 1990. 269 с.

5. Стрэнг Г., Фикс Д. Теория метода конечных элементов. М.: Мир, 1977. 350 с.
6. Сьярле Ф. Метод конечных элементов для эллиптических задач. М.: Мир, 1980. 512 с.
7. Якушев В. Л. Влияние начальных несовершенств на закритические формы цилиндрической панели. Актуальные проблемы механики оболочек / Тр. Междунар. конф., посвящ. памяти заслуж. деят. науки ТаССР проф. А. В. Саченкова. Казань: УНИПРЕСС, 1998. С. 258–263.
8. Якушев В. Л. Математическое моделирование нелинейных деформаций и устойчивости тонких оболочек // ДАН. 1997. Т. 357, № 3. С. 346–349.
9. Якушев В. Л. Применение метода дополнительной вязкости для решения нелинейных задач устойчивости оболочек // Изв. РАН. МТТ. 1992. № 1. С. 153–163.

D. G. Kucheryavenko, V. L. Yakushev

**SOLUTION OF NONLINEAR PROBLEM REGARDING STABILITY
OF THIN SHELLS USING METHOD OF FINITE ELEMENTS**

The paper gives a description of nonlinear deformations and stability of thin shells. Under such computations, account for nonlinear effects appears to be a challenging problem due to nonlinear dependence between external load and travel of shell points, and presence of special points in the solution. A spatial problem of strength analysis under external loads from connected pipeline assemblies of cut-in Dy 600 unions into the casing of 2000 KBKГ-4-M10-У-И/25 Г-6-6 vacuum capacitor in the ABT-4 plant from Ryazan oil refinery could be solved using method of finite elements.