

13. Николаев, А. Г. Первая краевая задача теории упругости для цилиндра с N цилиндрическими полостями [Текст]: А. Г. Николаев, Е. А. Танчик. – Сибирский журнал вычислительной математики. – 2015. – Т. 18, № 2. – С. 177 – 189.
14. Николаев, А.Г. Обобщенный метод Фурье в пространственных задачах теории упругости [Текст]: А. Г. Николаев, В. С. Проценко. – Х.: Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – 2011. – 344с.
15. Meleshko, V. V. Equilibrium of an elastic finite cylinder under axisymmetric discontinuous normal loadings [Text]: V. V. Meleshko, Yu. V. Tokovyy. – J.Eng. Math. – 2013.– V. 78. – P.143 – 166.
16. Khoroshun, L. P. Mathematical models and method of the mechanics of stochastic composites [Text]: L. P. Khoroshun. – International Applied Mechanics. – 2000. – V.36, №10. – P.1284 – 1316.
17. Мирошников, В. Ю. Визначення НДС в пружньому напівпросторі з циліндровими порожнинами, які задані в циліндричних системах координат та межею напівпростору, яка задана в декартовій системі координат [Текст]: В. Ю. Мірошніков, А. В. Медведєва, С. О. Ворончїхіна, С. В. Олешкевич. – Науковий вісник будівництва. – 2014. – Вип. 2. – С.81 – 85.

Мирошников В.Ю. СМЕШАННАЯ ЗАДАЧА ТЕОРИИ УПРУГОСТИ ДЛЯ ПРОСТРАНСТВА С ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ ПОЛОСТЯМИ И НЕКОТОРЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ КОНТАКТНОГО ТИПА.

Приведено решение трехмерной задачи теории упругости, когда на границах одних параллельных цилиндрических полостей заданы напряжения, а на границах других касательные усилия и нормальные перемещения. Решение системы уравнений Ламе получено обобщенным методом Фурье в цилиндрических координатах, связанных с цилиндрами. Бесконечные системы линейных алгебраических уравнений, к которым сведена проблема, решаются методом усечения. В результате были найдены перемещения и напряжения в упругом теле. Числовые результаты приведены для случая двух цилиндров.

Ключевые слова: цилиндрические полости в пространстве, уравнения Ламе, обобщенный метод Фурье.

Miroshnikov V.Yu. THE MIXED PROBLEM OF THE THEORY OF ELASTICITY FOR A SPACE WITH CYLINDRICAL CAVITIES AND CERTAIN BOUNDARY CONDITIONS OF CONTACT TYPE. The solution of the three-dimensional problem of the theory of elasticity is given, when stresses are given at the boundaries of some parallel cylindrical cavities, and tangential forces and normal displacements on the boundaries of others. The solution of the Lamé system of equations is obtained by the generalized Fourier method in cylindrical coordinates connected with cylinders. Infinite systems of linear algebraic equations, to which the problem is reduced, are solved by truncation. As a result, displacements and stresses in the elastic body were found. Numerical results are given for the case of two cylinders.

Keywords: cylindrical cavities in space, Lamé equations, generalized Fourier method.

DOI: 10.29295/2311-7257-2018-93-3-163-167

УДК 539.3

Семененко Н.В., Бессмертный С.И., Лылка А.М., Нечволод О.О.

*Харківський національний університет будівництва та архітектури
(вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна; e-mail: strojneh_kstuca@gmail.com)*

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ТЕОРИЙ РАСЧЕТА ТОРОИДАЛЬНЫХ ОБОЛОЧЕК

Задача определения напряженно-деформированного состояния торовых оболочек под действием внутреннего давления и радиальных сил приложенных по внешнему и внутреннему экватору является актуальной, имеет практическое значение. Решается в постановке на основе безмоментной теории осесимметричной деформации оболочек с использованием дифференциальных уравнений краевого эффекта. Получены значения внутренних усилий и деформаций. Определены соответствующие напряжения, которые позволяют аналитически определить запас прочности рассматриваемой такого вида комбинированной конструкции.

Ключевые слова: торовые оболочки, комбинированные системы на основе торовых оболочек с шпангоутами, оболочки под внутренним и внешним давлением, плавной нагрузкой изменяющейся вдоль меридиана.

В практике машиностроения широкое применение находят конструкции в виде торовых оболочек (баки, баллоны высокого давления, защитная и рабочая камеры термоядерных установок и т.д.), сопряженных с упругими элементами в виде стержней, пластинок и оболочек. Для таких комбинированных конструкций основными исходными данными при определении напряженно-деформированного состояния является давление наддува, силы реакций соседних элементов, постоянное внутреннее или внешнее давление, изменяющаяся нагрузка вдоль меридиана.

Аналитические методы расчета торовых оболочек.

Методика расчета симметрично-деформированных оболочек вращения обычно основана на заимствовании частного решения из безмоментной теории, а решение однородной задачи определяется как первое приближение, даваемое асимптотическим методом. Эта методика расчета неприменима к торовым оболочкам по таким причинам: по линиям нулевой Гауссовой кривизны (асимптотическим линиям) перемещения, определяемые безмоментной линейной теорией не ограничены; коэффициент при искомой функции в основном разрешающем уравнении в точках асимптотической линии обращается в нуль, в то время как асимптотическое интегрирование основывается на предположении, что данный коэффициент существенно превосходит единицу. В связи с этим вопрос об интегрировании разрешающего уравнения осесимметричной деформации торовых оболочек требует специального исследования.

Впервые задача для напряженно-деформированного состояния торовой оболочки в общей постановке решалась Висслером; пользуясь переменными Мейснера, он свел задачу к решению гипергеометрического уравнения класса Фукса с четырьмя особыми точками. Решение было получено в медленно сходящихся рядах.

Ввиду сложности, а также большого объема вычислений, решение Висслера широко не использовалось. И.В. Геккелер указал ряд трудностей получения точного решения уравнений торовых оболочек (построение решения в рядах происходит зачастую по весьма сложным законам; сходимость рядов плохая и нередко начинается после вычисления большого количества членов; получаемое таким путем решение громоздко и мало пригодно для практических целей).

Так, в работах Е.А. Морозовой, А.П. Филина, В. Юлюге, К.Ф. Черных и др. показана некорректность безмоментного линейного решения торовой оболочки. Вместе с тем отмечается, что существует целый класс нагрузок, при которых указанное состояние имеет место. Кроме того, в связи с этим приведены соответствующие условия, налагаемые на поверхностную нагрузку.

В работах В.И.Усюкина, Petera Jordana, посвященных расчету торовых оболочек, подверженных действию постоянного давления, указываются пути преодоления выше упомянутых трудностей, связанных с использованием безмоментной теории. Для получения корректного решения эти авторы разбивают оболочку на три зоны. Для пологих зон, включающей точки асимптотической линии, составляются дифференциальные уравнения по деформированному состоянию. Использование метода возмущений, приводит к линеаризованным уравнениям для безмоментной торовой оболочки. Однако, при таком подходе вносится определенная погрешность при выполнении граничных условий, так как перемещения в остальных зонах торовой оболочки определяются по линейной безмоментной теории.

Широкое распространение при расчете безмоментных оболочек получил метод разделения напряженного состояния на основное и дополнительное. В основном -

усилия определяются из уравнений безмоментной теории при данной геометрии, в дополнительном - из линеаризованных уравнений, содержащих большой параметр. Такой подход отражен в работах.

В работах Е.Ф.Зеновой и В.В. Новожилова, А.А. Лахтина, А.И. Лурье, В.В. Новожилова, С.Д. Пономарева, Ю.С. Сельского, В.И. Феодосьева использовано уравнение Мейснера. Введением новой независимой переменной устраняется особенность в правой части уравнения. Решение однородного уравнения задачи выражается через функции Ганкеля, для вычисления которых в области малых значений аргумента (зависящего от геометрии оболочки и независимой переменной по меридиану) удобно пользоваться хорошо сходящимися рядами, а в области больших значений аргумента - асимптотическими формулами для функций Бесселя. Частное решение определяется в форме тригонометрического ряда, коэффициенты которого представлены в виде бесконечных цепных дробей. При таком подходе можно получить частное решение, которое справедливо только для нагрузок в виде равномерного давления и осевой силы, а эффективность этого метода в основном зависит от заданной геометрии оболочки.

С.А. Тумаркин преодолел некоторые из этих трудностей: - он нашел частное решение, остающееся конечным всюду, годное для симметричной нагрузки, представленной в виде тригонометрического ряда; при этом использовано уравнение В.В. Новожилова. Используя этот подход, С.А. Тумаркин, З.А. Аксельрад и Л.А. Летов рассмотрели геометрически нелинейную осесимметричную деформацию оболочки переменной толщины. Показали, что в случае нагрузок, представляющих периодическую функцию независимой переменной, частное решение можно построить в виде тригонометрического ряда, коэффициенты которого определяются решением бесконечной системы алгебраических уравнений. Структура цепных дробей такова, что они сходятся тем лучше, чем тоньше оболочка.

Приведенными методами могут решаться контактные задачи об усилении торовой оболочки упругими элементами в произвольном сечении меридиана, но при взаимодействии оболочки и элементов по асимптотическим линиям на решение накладываются различные ограничения. Так, например, Н.С. Куратов рассмотрел тороидальное сопряжение не замкнутой оболочки, находящейся под внутренним давлением. Общее решение однородного уравнения найдено в виде степенного ряда, который имеет хорошую сходимость для оболочек средней толщины.

Иной подход для сегмента торовой оболочки представлен В.М. Богомольным и Р.Д. Степановым; мембранные усилия в сегменте тонкой торовой оболочки при действии краевой изгибной нагрузки определены с помощью частного решения основного дифференциального уравнения. Моментное напряженное состояние определяется с использованием метода характеристик.

При больших значениях параметра (зависящего от геометрических и физических характеристик оболочки) удобнее переходить к асимптотическим методам, использующим этот параметр, но использование обычных приемов асимптотического интегрирования затруднено, так как в полюсных точках меридиана член уравнения, содержащий большой множитель, обращается в нуль. Тщательные разработки асимптотических представлений решений задач об осесимметричном деформировании торовой оболочки представили

С.А. Тумаркин, Р. Кларк, В.С. Чернина, К.Ф. Черных и др. Для достаточно тонкой оболочки ($\delta \cdot R^{-1} \ll 1/100$) решение однородного разрешающего уравнения может быть построено асимптотическими методами и использовано как в окрестностях особых точек $\theta = \pm \pi/2$, так и вдали от них. При большем отношении большого и малого радиусов ($\alpha \cdot R^{-1}$) решение и расчетные формулы значительно упрощаются, так как можно пренебречь членами порядка $R \cdot \alpha^{-1}$ по сравнению с единицей.

При достаточно плавных нагрузках решение рассматриваемого уравнения с

правой частью также может быть построено асимптотическим методом. Приближенное решение имеет сравнительно простой вид и на его основе могут быть получены расчетные формулы для определения смещений и напряжений в различных конструкциях; содержащих торовую оболочку. Использование представленной идеи в работах позволяет решить некоторые инженерные задачи (торовая оболочка при внутреннем давлении и осевой силе; изгиб четверти тора распределенным краевым моментом; растяжение линзового компенсатора; трубчатый компенсатор в условиях изгиба и сдвига). Приближенное решение, представляемое асимптотическим методом, несколько проще выводов исследований, но применимость расчетных формул ограничена существенным требованием (параметр, зависящий от геометрических и физических характеристик оболочки, должен быть много больше единицы). К.Ф. Черных решил задачу об изгибе четверти тора на основе метода сопряженных оболочек, что позволило вывести основные зависимости, соответствующие заданным граничным условиям. Используя асимптотическое интегрирование основного разрешающего уравнения осесимметричных оболочек, А.Н. Волков ограничивается первым приближением; показано, что для НДС осесимметричной торовой оболочки можно предложить ряд упрощенных схем (обобщенное безмоментное напряженное состояние, чисто моментное напряженное состояние; краевые эффекты). Обобщенное безмоментное напряженное состояние можно разложить на обобщенное безмоментное напряженное состояние, вызванное поверхностной нагрузкой, и обобщенное безмоментное напряженное состояние, вызванное краевой нагрузкой. Этот путь исследовали А.С. Авдонин, В.И. Богомольный. Упрощенные схемы можно использовать при действии нагрузки на оболочку вдали от асимптотических линий.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Лурье А.И. Статика тонкостенных упругих оболочек. Гостехиздат, 1948.
2. Ляв А.И. Математическая теория упругости. ОНТИ, М.: 1935.
3. Никифоров С.П. Теория упругости и пластичности. Стройиздат, 1955.
4. Тимошенко С.П. Теория упругости. ГТТИ, 1933.
5. Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки. Гостехиздат, 1966; или Устойчивость упругих систем, Гостехиздат, 1939.
6. Филоненко-Бородич М.М. Задача о равновесии упругого параллелепипеда при заданных нагрузках на его гранях. ПММ, т. XV, вып. 2, 1951.
7. Штаерман И.Я. Контактная задача теории упругости. Гостехиздат, 1949.
8. Чернина В.С. Статика тонкостенных оболочек вращения. - М.: Наука, 1968, 455 с.
9. Чернина В.С. К расчету торообразных оболочек. - Изв. АН СССР, ОТН. Мех., 1961, №4.
10. Черных К.Ф. Линейная теория оболочек. - Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1964, ч. 2, с. 295.
11. Clark R., Toroidal shell expansion joints, Appl. Math, 1954, 21, №02.
12. Rebinson I., Structural Matrix Analysis for the Engineer, Willey, 1966, p. 54.
13. Семененко Н.В. Расчет торовой оболочки, взаимодействующей по внешнему экватору со шпангоутом. // Науковий вісник будівництва, ХНУБА, ХОТВ АБУ. - № 47. - 2008.
14. Вандаковский А.Т., Семененко Н.В., Юнис Б.Н. Преобразование зависимости Ляме применительно к расчету бетонных трубопроводов. // Науковий вісник будівництва, ХНУБА, ХОТВ АБУ. - № 51. - 2009.

Семененко Н.В., Безсмертний С.І., Лилка А.М., Нечволод О.О. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ТЕОРІЙ РОЗРАХУНКУ ТОРОЇДАЛЬНИХ ОБОЛОНОК. Завдання визначення напружено-деформованого стану торових оболонок під дією внутрішнього тиску і радіальних сил прикладених по зовнішньому і внутрішньому екватору є актуальною, має практичне значення. Вирішується в постановці на основі безмоментної теорії осісиметричної деформації оболонок з використанням диференціальних рівнянь крайового ефекту. Отримано значення внутрішніх зусиль і деформацій. Визначено відповідні напруги, які дозволяють аналітично визначити запас міцності розглянутої такого виду комбінованої конструкції.

Ключові слова: торові оболонки, комбіновані системи на основі торові оболонки з шпангоутами, оболонки під внутрішнім і зовнішнім тиском, плавної навантаженням змінює уздовж меридіана.

Semenenko N.V., Bessmertny S.I., Lylka A.M., Nechvolod O.O. LITERARY REVIEW OF THE THEORIES OF THE CALCULATION OF TOROIDAL SHELLS. The problem of determining the stress-strain state of the toroidal shells under the action of internal pressure and radial forces applied along the outer and inner equator is topical and of practical importance. It is

solved in the formulation on the basis of the axisymmetric theory of axisymmetric deformation of shells using the differential equations of the edge effect. The values of internal forces and deformations are obtained. The corresponding stresses are determined, which allow us to analytically determine the safety margin of the considered type of combined structure.

Key words: torus shells, combined systems based on torus shells with frames, shells under internal and external pressure, smooth load varying along the meridian.

DOI: 10.29295/2311-7257-2018-93-3-167-172
УДК 624.012

Яровий С.М.

*Харківський національний університет будівництва та архітектури
(вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна; e-mail: psp-nauka@yandex.ua)*

ЗАЛИШКОВИЙ РЕСУРС МЕТАЛЕВИХ ДИМОВИХ І ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ТРУБ ТА ЇХ НЕСУЧИХ ВЕЖ

Останнім часом проблеми надійності металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж набули особливого значення у зв'язку з великою кількістю аварій на промислових підприємствах України та за кордоном. Крім того, велика кількість металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж виробили проектний ресурс, істотно змінився режим їх роботи і навантаження, з'явилося безліч дефектів і пошкоджень. Все це вимагає аналізу надійності і залишкового ресурсу металевих димових труб і несучих веж. Розрахунок залишкового ресурсу повинен проводитися на основі даних про технічний стан конструкцій, і проводиться з урахуванням існуючих дефектів і пошкоджень, фактичних характеристик матеріалів. роботу. На основі інформації про зміну параметрів технічного стану димових труб і несучих веж розроблена методика визначення залишкового ресурсу. В результаті дослідження одержані формули, що враховують залишкові напруження при приварці накладок на основі підсумування зварювальних та зовнішніх напружень з урахуванням концентраторів напружень. Одержані результати дають можливість більш точно враховувати зварювальні напруження при підсиленні труб з тріщинами та підвищувати надійність димових труб під час експлуатації.

Ключові слова: металеві димові і вентиляційні труби, несучі вежі, надійність, довговічність, залишковий ресурс.

В останній час проблеми надійності для металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж здобула особливу значимість в зв'язку з великою кількістю випадків аварій на промислових підприємствах в Україні та за кордоном. Крім того, велика кількість металевих димових і вентиляційних труб та їх несучих веж випрацювала свій проектний ресурс, під час експлуатації змінився режим їх роботи, підвищились навантаження та утворилось багато

дефектів та пошкоджень (рис. 1). Все це потребує негайного проведення діагностики і визначення дійсного технічного стану конструкцій, проведення аналізу їх надійності.

Металеві димові і вентиляційні труби та їх несучі вежі експлуатуються тривалий час в складних умовах і забезпечення надійності, як правило, проводиться на основі здобутих даних при технічному обстеженні, визначенні причин виникнення пошкоджень і