



**О ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ
МЕТОДА ПРОДОЛЖЕНИЯ ПО НАИЛУЧШЕМУ ПАРАМЕТРУ
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК**

Ю. Н. Згода, А. А. Семенов

Згода Юрий Николаевич, аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, тел.: +7 (812) 575-05-49; e-mail: yurii.zgoda@mail.ru;

Семенов Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных технологий, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация, тел.: +7 (812) 575-05-49; e-mail: sw.semenov@gmail.com

Компьютерное моделирование тонкостенных оболочечных конструкций представляет собой сложный с вычислительной точки зрения процесс. Многие классические подходы к моделированию оболочек предполагают их последовательное нагружение, что усложняет изучение поведения конструкции в условиях потери устойчивости. Целью данной работы является анализ и совершенствование производительности компьютерного моделирования оболочек при использовании метода продолжения по наилучшему параметру. В алгоритм был встроены механизмы валидации, позволяющие получить более полное представление о потере устойчивости оболочки. Предложено также использование предварительной компиляции для сокращения длительности вычислений на этапе адаптивного выбора шага по длине дуги. Результаты вычислительного эксперимента показали, что разработанный алгоритм обеспечивает сокращение длительности вычислений примерно в 20 раз в сравнении с более распространенными методами моделирования. Точность моделирования при этом сохраняется.

Ключевые слова: метод продолжения по наилучшему параметру, высокопроизводительные вычисления, тонкостенные оболочечные конструкции, оболочки, Julia, arc length, потеря устойчивости, критическая нагрузка.

**ON THE HIGH-PERFORMANCE IMPLEMENTATION
OF THE BEST PARAMETER CONTINUATION METHOD FOR SIMULATION OF THIN-WALLED SHELLS**

Yu. N. Zgoda, A. A. Semenov

Zgoda Yuriy Nikolayevich, postgraduate student, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation, phone: +7 (812) 575 05 49; e-mail: yurii.zgoda@mail.ru;

Semenov Aleksey Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information Technologies, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, St. Petersburg, Russian Federation, phone: +7 (812) 575 05 49; e-mail: sw.semenov@gmail.com

Computer modeling of thin-walled shell structures is a complex computational task. Many classical approaches to shell modeling include sequential loading, which makes it difficult to study the behavior of a structure under buckling conditions. The purpose of this work is to analyze and improve the performance of computer simulation of shells when using best parameter continuation method. A validation mechanism was developed that provides a more comprehensive view on the stress-strain state of a construction. It was also proposed to use precompilation to reduce the duration of calculations while evaluating the adaptive arc length step. The results of the computational experiment show a 20x speed up of computation process in comparison to more widely used computation methods without the loss of computation accuracy.

Keywords: best parameter continuation method, high-performance computations, thin-walled shell structures, shells, Julia, arc length, buckling, critical load.

Для изучения поведения тонкостенных оболочечных конструкций (оболочек) под воздействием внешних сил зачастую используют компьютерное моделирование [1–2]. Оно позволяет определить напряженно-деформированное состояние (далее – НДС), а также рассчитать критическую нагрузку конструкций (то есть нагрузку, превышение которой приводит к потере устойчивости).

Возможны разные подходы к компьютерному моделированию оболочек: аналитические методы [3], метод конечных элементов (далее – МКЭ) [4]; методы, основанные на расчете конечных разностей [5]; метод Рунге [6–7] и другие [8–9]. Метод конечных элементов в целом является одним из наиболее распространенных в строительной отрасли [10–11]. Вне зависимости от выбранного метода чаще всего вычислительный процесс сводится к решению последовательности систем линейных (далее – СЛАУ) или нелинейных (далее – СНАУ) алгебраических уравнений, где каждая

система описывает поведение конструкции при конкретном нагружении [1].

Однако последовательное нагружение не позволяет получить непрерывного решения в области потери устойчивости. На рисунке 1 приведен пример диаграммы «нагрузка – прогиб» в центре срединной поверхности некоторой оболочки. Нагрузка около 2,8 МПа является критической для этой конструкции. Можно заметить, что из такой диаграммы невозможно определить нижнюю критическую нагрузку (то есть нагрузку, до которой нужно разгрузить конструкцию для перехода в исходное состояние).

Применительно к моделированию оболочек наиболее перспективным при решении данной проблемы является модифицированная версия метода продолжения по параметру [12], называемая методом продолжения по наилучшему параметру (далее – МППНП).

Использование МППНП применительно к оболочкам позволяет моделировать конструкцию

таким образом, что значения нагрузки или перемещения в ходе вычислений могут убывать или возрастать на участке потери устойчивости. Следует отметить, что на практике отдельные участки такой кривой, например, нисходящий участок между верхней и нижней критическими нагрузками, не реализуются и носят исключительно математический характер. Это помогает получить непрерывную кривую решения, а вычислительный процесс сделать наиболее устойчивым и однозначным.

Несмотря на то, что метод продолжения решения с использованием длины дуги применялся для решения подобных задач и ранее, вопросы, связанные с оценкой его производительности и программной реализацией, изучены не до конца. В большинстве известных работ рассматриваются лишь математические аспекты данного метода.

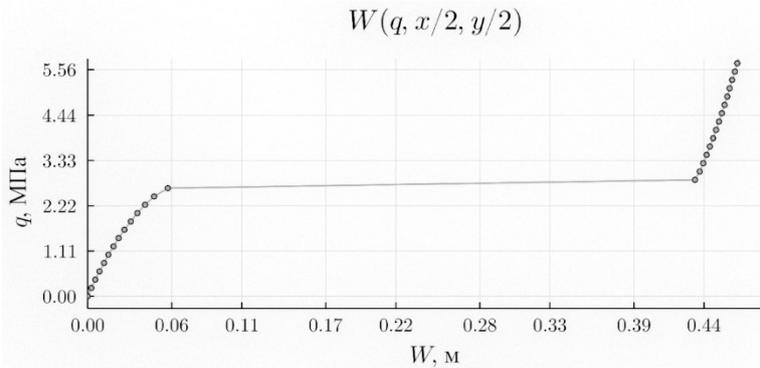


Рис. 1. Диаграмма «нагрузка – прогиб», полученная путем последовательного нагружения конструкции

Целью данной работы является анализ и совершенствование производительности моделирования оболочек при использовании МППНП. В рамках данной цели были решены такие задачи, как детальный анализ алгоритмического представления данного метода и разработка высокопроизводительных оптимизаций этого алгоритма.

Для вычислительных экспериментов использовался компьютер на базе ОС Windows 10 19041.388, процессора AMD Ryzen 9 3900X, 64 ГБ ОЗУ и графического ускорителя Nvidia Geforce RTX 2070 Super. Для программной реализации – язык программирования Julia (версия интерпретатора 1.8.0).

Математическое описание МППНП

Рассмотрим реализацию МППНП для моделирования оболочек в соответствии с трудами А. А. Семенова [12–13]. Пусть функционал полной потенциальной энергии деформации (далее – ФППЭД), преобразованный в функцию по методу Ритца, имеет следующий вид:

$$E_{sf} = E_{sf}(U_{kl}, V_{kl}, W_{kl}, \Psi_{xkl}, \Psi_{ykl}, q), \quad k, l = 1, \dots, \sqrt{N}, \quad (1)$$

где $U_{kl}, V_{kl}, W_{kl}, \Psi_{xkl}, \Psi_{ykl}$ – неизвестные аппроксимационные коэффициенты, которые необходимо определить через МППНП; U_{kl}, V_{kl}, W_{kl} – коэффициенты, определяющие поперечные, продольные и вертикальные перемещения соответственно; Ψ_{xkl}, Ψ_{ykl} – коэффициенты, связанные с углами поворота нормали в плоскости xOz и yOz соответственно; q – вещественный параметр, описывающий прикладываемую к конструкции нагрузку,

$$(d\lambda)^2 = \sum_{k=1}^{\sqrt{N}} \sum_{l=1}^{\sqrt{N}} \left((dU_{kl})^2 + (dV_{kl})^2 + (dW_{kl})^2 + (d\Psi_{xkl})^2 + (d\Psi_{ykl})^2 \right) + (dq)^2. \quad (6)$$

Уравнение (6) описывает гиперсферу в $N+1$ -мерном пространстве решений. Радиусом гиперсферы является задаваемый шаг по длине дуги $d\lambda$.

N – количество неизвестных аппроксимационных коэффициентов по каждой из пяти компонент НДС: U, V, W, Ψ_x, Ψ_y .

Для нахождения минимума этого функционала приравняем его производные по аппроксимационным коэффициентам к нулю:

$$\frac{\partial E_{sf}}{\partial U_{kl}} = 0, \frac{\partial E_{sf}}{\partial V_{kl}} = 0, \frac{\partial E_{sf}}{\partial W_{kl}} = 0, \frac{\partial E_{sf}}{\partial \Psi_{xkl}} = 0, \frac{\partial E_{sf}}{\partial \Psi_{ykl}} = 0, \quad k, l = 1, \dots, \sqrt{N}. \quad (2)$$

Система (2) включает в себя $5N$ нелинейных уравнений. Представим данную систему в векторной форме:

$$F(X, q) = 0, \quad (3)$$

где F – вектор-функция, составленная из левых частей системы; X – вектор, составленный из неизвестных метода Ритца. Очевидно, что при $q = 0$ (ненагруженное состояние оболочки), ее перемещения и углы поворота нормали равны нулю, то есть:

$$F(X^0, 0) = 0 \Rightarrow X^0 = 0. \quad (4)$$

В МППНП в качестве наилучшего используется не параметр нагрузки q (как в методе последовательных нагружений В. В. Петрова [14]), а длина дуги кривой множества решений. Параметр нагрузки q становится равноправным с остальными неизвестными и определяется на каждом итерационном шаге:

$$\tilde{X} = (X, q)^T = (U_{kl}, V_{kl}, W_{kl}, \Psi_{xkl}, \Psi_{ykl}, q)^T, \quad k, l = 1, 2, \dots, \sqrt{N}, \quad (5)$$

Параметр длины дуги λ не входит явно в систему уравнений (3) и связан с переменными задачи следующим образом:

Дифференцируя (3) по параметру λ , считая, что переменные задачи зависят от него, получим систему дифференциальных уравнений:

$$\bar{J} \frac{d\tilde{X}}{d\lambda} = 0, \quad (7)$$

с начальным условием:

$$\tilde{X}(\lambda_0) = 0, \lambda_0 = 0, \quad (8)$$

где $\bar{J} = \frac{\partial F(\tilde{X})}{\partial \tilde{X}}$ – расширенная матрица Якоби, имеющая $5N$ строк и $5N + 1$ столбцов. Процесс продолжения решения по наилучшему параметру на каждом шаге сводится к решению задачи Коши:

$$\tilde{X}_{k+1} = \tilde{X}_k + \frac{\frac{d\tilde{X}}{d\lambda}(\lambda_k)}{\left| \frac{d\tilde{X}}{d\lambda}(\lambda_k) \right|} \cdot \Delta\lambda_k, \lambda_{k+1} = \lambda_k + \Delta\lambda_k, k = 0, 1, 2, \dots$$

Таким образом, моделирование конструкции сводится к последовательному решению СЛАУ относительно приращений $\tilde{\Delta X}$. По сравнению с распространенным в литературе подходом, предполагающим минимизацию квазиньютоновскими методами [15–16], решение последовательности СЛАУ занимает значительно меньше времени.

В работе [12] отмечается, что основной сложностью при реализации МППНП является выбор шага по длине дуги. Этот метод не позволяет зафиксировать какой-либо конкретный шаг по нагрузке, так как изменение нагрузки является неизвестным СЛАУ. При слишком большом шаге может проявиться неустойчивость метода Эйлера, а при слишком малом – будут выполняться лишние итерации.

Для решения описанных трудностей в работе [13] приводится адаптивный алгоритм выбора шага по сетке. В данной работе предлагается модификация этого алгоритма, обладающая следующими особенностями:

1) выполнена параметризация алгоритма. Большая часть констант, которые в предыдущей версии алгоритма были зафиксированы, в текущей реализации являются параметрами вычислительного процесса;

2) предусмотрены различные сценарии завершения работы алгоритма как корректного (по превышении максимальной нагрузки и максимального прогиба), так и некорректного (по превышении максимально допустимого количества итераций и потере устойчивости метода). Этот аспект алгоритма крайне важен при проведении серии вычислительных экспериментов с большим количеством моделируемых конструкций. Например, в работе [17] эта особенность используется для формирования обучающих данных нейросети;

3) завершение работы по достижению требуемого вертикального перемещения реализовано таким образом, чтобы итоговый расчет включал в себя и верхнюю, и нижнюю критические нагрузки.

Входные данные алгоритма (после знака равенства указано значение по умолчанию):

- $I_{\max} = 5000$ – максимально допустимое количество итераций;

$$\begin{bmatrix} \bar{J} \\ \left(\frac{d\tilde{X}}{d\lambda} \right)^T \end{bmatrix} \frac{d\tilde{X}}{d\lambda} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \tilde{X}(\lambda_0) = 0. \quad (9)$$

Система (9) нелинейна относительно $\frac{d\tilde{X}}{d\lambda}$. Проведем линеаризацию и перейдем к итерационному процессу по методу Эйлера:

$$\begin{bmatrix} \bar{J}(\lambda_k) \\ \left(\frac{d\tilde{X}}{d\lambda} \right)^T(\lambda_{k-1}) \end{bmatrix} \frac{d\tilde{X}}{d\lambda}(\lambda_k) = \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

- $\Delta W_{\max} = 10$ % толщины оболочки – максимально возможное изменение максимального прогиба при переходе на следующую итерацию;

- $W_{\max} = 2000$ % толщины оболочки – значение максимального прогиба, до которого необходимо продолжать вычисления;

- $\Delta S_{\text{start}} = 0,01$ – начальный шаг по длине дуги;

- $\alpha_{\max} = 0,0177$ рад или $1,01$ – максимально допустимый угол между двумя векторами-решениями;

- $\alpha_{\min} = 0,0094$ рад или $0,54$ – минимально допустимый угол между двумя векторами решениями;

- $S_m = 10$ – параметр уменьшения шага по длине дуги;

- $S_p = 1,5$ – параметр увеличения шага по длине дуги;

- q_{\max} – максимальное рассматриваемое значение нагрузки.

Предлагаемый алгоритм реализации МППНП имеет следующий вид:

1. Задать шаг по длине дуги $\Delta s = \Delta s_{\text{start}}$.
2. Определить максимальную обнаруженную нагрузку $q_{\text{last}} = 0$ и соответствующий максимальный прогиб $W_{\text{last}} = 0$.
3. В качестве решения для МППНП на нулевом шаге принять $X_0 = \vec{0}$.

4. Вычислить X_1 в соответствии с (10).

Далее начинается итерационный процесс для i -й итерации.

5. Если $I > I_{\max}$, завершить выполнение.

6. Вычислить X_i по формуле (10).

7. Если нагрузка для полученного решения оказалась меньше $1,0$ МПа, то это означает, что решение потеряло устойчивость и следует завершить выполнение с ошибкой.

8. Если $i \leq 2$, то необходимо вернуться к шагу 6.

9. Вычислить угол α между векторами X_i, X_{i-1} .

10. Если $\alpha > \alpha_{\max}$, то текущий шаг по длине дуги слишком велик, требуется:

- а) обновить шаг по длине дуги: $\Delta s = \Delta s \cdot S_m$;

- б) отбросить последние два решения, то есть вернуться к решению с индексом $i-2$.

11. Определить максимальные перемещения срединной поверхности оболочки при X_i, X_{i-1} . Определить разность ΔW между ними.

12. Если $\Delta W \geq \Delta W_{\max}$, то необходимо:

а) рассчитать новый шаг по формуле

$$\Delta s = \frac{\Delta s \Delta W_{\max}}{2\Delta W};$$

б) отбросить последние два решения, то есть вернуться к решению с индексом $i-2$.

13. Если $\alpha < \alpha_{\min}$, то переопределить шаг:

$$\Delta s = \Delta s \cdot S_p;$$

14. Если $q \geq q_{\text{last}}$, где q – значение нагрузки текущего решения X_i :

а) обновить значение переменной: $q_{\text{last}} = q$;

б) обновить значение переменной: $W_{\text{last}} = W_{\text{cur}}$, где W_{cur} – максимальный вертикальный прогиб на текущей итерации F .

15. Если $W_{\text{last}} \geq W_{\max}$, то завершить вычисления.

16. Если $q_{\text{last}} \geq q_{\max}$, то завершить вычисления.

17. Перейти к итерации $I + 1$ и вернуться на шаг 5.

Предложенная модификация алгоритма позволяет при обнаружении потери устойчивости выполнять моделирование до тех пор, пока не будет выполнен переход в новое равновесное состояние (пункт алгоритма 14), что позволяет получать более информативные расчеты. На рисунке 2 приведены результаты моделирования некоторой конструкции без учета пункта 14 (слева) и с его учетом (справа), в качестве максимального значения вертикального прогиба использовано значение 0.2 МПа.

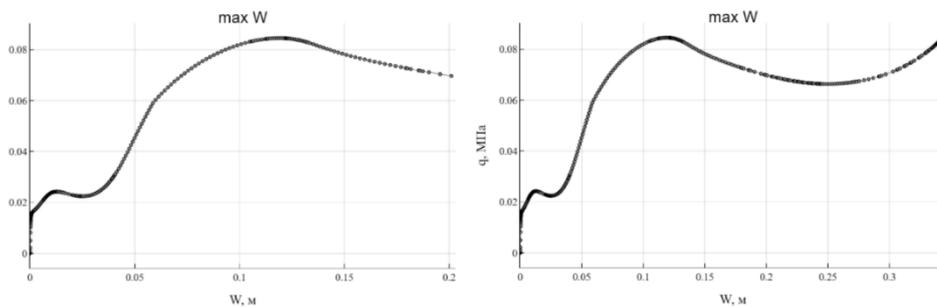


Рис. 2. Диаграмма «нагрузка – максимальный прогиб» без использования специального условия завершения (слева) и с его использованием (справа)

Из вышеописанного следует, что решение без использования специальной проверки в некотором смысле не завершено. По нему можно определить верхнее значение критической нагрузки, но нельзя узнать нижнее. С помощью предложенного алгоритма можно установить нижнее значение критической нагрузки, а также состояние оболочки после «схлопывания», но при этом не требуется ручная корректировка максимального количества итераций или максимального прогиба.

Важной особенностью приведенного алгоритма является то, что на каждой итерации происходит определение максимального вертикального прогиба. Это позволяет завершить работу по достижении требуемого прогиба, а также выполнять адаптацию шага по длине дуги (см. пункт алгоритма 12 а). Однако для определения максимального значения необходимо выполнить дискретизацию срединной поверхности оболочки некоторой сеткой и вычислить компоненты НДС в различных ее точках. С учетом того, что эта процедура выполняется на каждой из нескольких тысяч итераций алгоритма, она должна быть высокопроизводительной.

В рамках данной работы были рассмотрены различные подходы к вычислению значений вертикальных перемещений при реализации МППНП. Наиболее эффективным среди них оказался подход, заключающийся в предварительной компиляции функции, которая описывает вертикальный прогиб. Он позволяет максимально эффективно рассчитывать значения вертикального прогиба по поверхности оболочки и существенно сокращает общую длительность вычислений.

Для оценки производительности вычислений с использованием приведенного выше алгоритма, рассмотрим оболочку двоякой кривизны с линейными размерами $a = b = 5,4$ м, радиусами кривизны $R_1 = R_2 = 20,25$ м, толщиной $h = 0,09$ м. Оболочка изготовлена из стали, модуль упругости $E = 2.1e5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, модуль сдвига $G = 8.08e4$ МПа. При ее моделировании использовалась равномерно распределенная нормальная к поверхности нагрузка. Диапазон значений прикладываемой нагрузки – от 0,0 до 4,0 МПа. Расчет выполнялся по методу Ритца, минимизация в первом случае осуществлялась через метод LBFGS [16], во втором – по предложенному алгоритму.

Данные о длительности построения решений приведены в таблице, в которой используются следующие обозначения:

- N – количество аппроксимационных слагаемых;
- K – количество слагаемых функционала;
- O – длительность минимизации по методу LBFGS, мс;
- O_2 – длительность минимизации с использованием МППНП, мс.

По сравнению с минимизационным подходом, предложенный алгоритм выполняет вычисления примерно в 20 раз быстрее. На рисунке 3 приведены диаграммы «нагрузка – максимальный прогиб» для результатов расчета при $N = 16$ с использованием минимизационного подхода и МППНП. Как можно увидеть, МППНП позволяет получить более подробное представление о процессе деформирования конструкции при потере устойчивости, но сохранении точности моделирования

Таблица 1

Оценка длительности вычислений с использованием МППНП

<i>N</i>	1	4	9	16	25
K	34	1350	19193	146081	755530
O	0,201	0,498	2,998	49,651	403,617
O_z	0,104	0,137	0,209	2,592	20,058

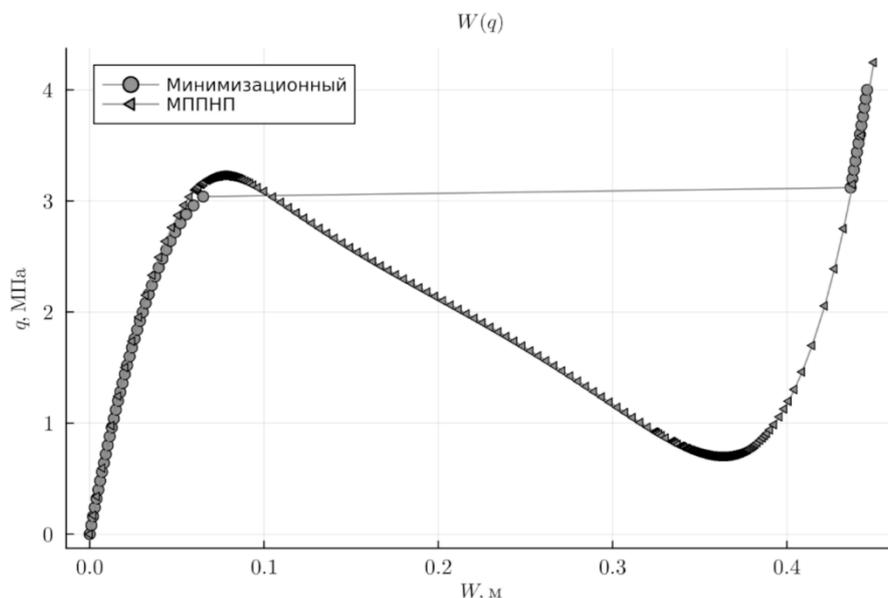


Рис. 3. Сравнение результатов моделирования с использованием LBFGS и МППНП

Заключение

Разработана оригинальная модификация алгоритма моделирования тонкостенных оболочек по методу МППНП. В рамках этой модификации предложена оптимизация алгоритма, связанная с предварительной компиляцией аппроксимационных функций в ходе адаптивного выбора шага. Проведен анализ производительности, который

показал, что в сравнении с классическим подходом, заключающимся в последовательном нагружении конструкции и применении методов многомерной оптимизации, МППНП позволяет сократить длительность вычислений примерно в 20 раз. При этом результаты моделирования оказываются более информативными, чем при использовании классических подходов.

Список литературы

1. Карпов В. В. Прочность и устойчивость подкрепленных оболочек вращения : в 2 ч. : монография / В. В. Карпов. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2010. – Ч. 1. Модели и алгоритмы исследования прочности и устойчивости подкрепленных оболочек вращения. – 288 с.
2. Трещев А. А. Кузнецова, В. О. Деформирование цилиндрической оболочки из титанового сплава под воздействием агрессивной водородсодержащей среды / А. А. Трещев, В. О. Кузнецова // Строительная механика и конструкции. – 2022. – № 2 (33). – С. 26–39.
3. Кудряшов А. В. Существование решения задачи о конечном деформировании круговой упругопластической оболочки / А. В. Кудряшов, Р. А. Каюмов, И. З. Мухамедова, Ф. Р. Шакирзянов // Вестник Технологического университета. – 2015. – Т. 18 (3). – С. 251–253.
4. Avramov K. Transient response of functionally graded carbon nanotubes reinforced composite conical shell with ring-stiffener under the action of impact loads / K. Avramov, B. Uspensky, N. Sakhno, O. Nikonov // European Journal of Mechanics – A/Solids. – 2022. – Vol. 91. – Pp. 104429.
5. Karamooz M. R. Analysis of the buckling of rectangular nanoplates by use of finite-difference method / M. R. Karamooz, S. Talebi, A. Shahidi // Meccanica. – 2014. – Vol. 49. – Pp. 1–13.
6. Панин А. Н. Устойчивость пологих железобетонных ребристых оболочек / А. Н. Панин // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 2 (31). – С. 101–106.
7. Aguib S. Analysis of buckling stability behavior of hybrid plate using Ritz approach and numerical simulation / S. Aguib, N. Chikh, L. Kobzili, T. Djedid, A. Nour, M. Meloussi // Structures. – 2021. – Vol. 34. – Pp. 3222–3237.
8. Коломоец А. А. Применение методов дифференцирования и продолжения по параметру / А. А. Коломоец, А. С. Модин // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2017. – № 1. – С. 4–15.
9. Ступишин Л. Ю. Исследование оптимальных форм пологих геометрически нелинейных оболочек по критерию максимума значений низших частот малых свободных колебаний / Л. Ю. Ступишин, А. Г. Колесников, И. В. Соломатников // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 5–2 (38). – С. 313–316.
10. Садчиков П. Н. Автоматизация расчета оптимального объема полипропиленового волокна в составе фибробетона плит перекрытий с отверстиями / П. Н. Садчиков, О. И. Евдошенко, Н. П. Садчиков // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2021. – № 1 (35). – С. 75–81.
11. Шамшина К. В. Результаты экспериментальных исследований деформационных свойств сжимаемых железобетонных конструкций с коррозионными продольными трещинами в защитном слое бетона / К. В. Шамшина // Инженерно-строительный вестник Прикаспия – 2020. – № 1 (31). – С. 26–33.

12. Семенов А. А. Метод непрерывного продолжения решения по наилучшему параметру при расчете оболочечных конструкций / А. А. Семенов, С. С. Леонов // Ученые записки Казанского университета. Серия: физико-математические науки. – 2019. – Т. 161 (2). – С. 230–249.
13. Семенов А. А. Геометрически нелинейная математическая модель расчета прочности и устойчивости ортотропных оболочечных конструкций : автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. А. Семенов. – СПб. : СПбГАСУ, 2014. – 183 с.
14. Петров В. В. Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластин и оболочек / В. В. Петров. – Саратов : Саратовский университет, 1975. – 119 с.
15. Баранова Д. А. Сравнительный анализ расчета прочности и устойчивости подкрепленных оболочек на основе ПК ОБОЛОЧКА и ПК ANSYS / Д. А. Баранова, А. Л. Волюнин, В. В. Карпов // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. – 2010. – Т. 10 (4). – С. 23–27.
16. Згода Ю. Н. Высокопроизводительный расчет тонкостенных оболочечных конструкций с использованием параллельных вычислений и графических ускорителей / Ю. Н. Згода, А. А. Семенов // Вычислительные Технологии. – 2022. – Т. 27 (6). – С. 45–57.
17. Згода Ю. Н. Возможности глубокого обучения применительно к задаче компьютерного моделирования тонкостенных оболочечных конструкций / Ю. Н. Згода // IV Международная конференция по нейронным сетям и нейротехнологиям (NeuroNt'2023). – СПб. : СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2023. – С. 68–71.

© Ю. Н. Згода, А. А. Семенов

Ссылка для цитирования:

Згода Ю. Н., Семенов А. А. О высокопроизводительной реализации метода продолжения по наилучшему параметру применительно к моделированию тонкостенных оболочек // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2024. № 1 (47). С. 105–110.

УДК 004.02: 004.94

DOI 10.52684/2312-3702-2024-47-1-110-114

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ РЕСУРСОВ ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

А. В. Макаров, В. Ф. Шуршев

Макаров Альберт Владимирович, аспирант, Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, тел.: + 7 (967) 339-28-93; e-mail: brad-pit1999@mail.ru;

Шуршев Валерий Федорович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной информатики, Астраханский государственный технический университет, г. Астрахань, Российская Федерация, тел.: + 7 (851) 261-45-08; e-mail: v.shurshev@mail.ru

В статье рассмотрены методы для оценки ресурсов газовых месторождений, выявлены их преимущества и недостатки. Показано, что при оценке ресурсов месторождения имеют место геологические риски. При их анализе необходимо учитывать основные элементы управления залегаем углеводородов. Представлено описание метода геологической аналогии, в котором на практике используются коэффициенты масштабирования других методов и компьютерные имитации. Преимуществом использования объемных методов при оценке залежей является их хорошая привязка к наиболее важным аспектам геологии. Для прогнозирования объемов залежей возможно использовать методы экстраполяции. Сделан вывод, что в методе для оценки залежей газа должна быть заложена некоторая мера риска. Для оценки объема газовых месторождений необходимо использовать методы, основанные на интегрированной системе моделей материального баланса, позволяющие учитывать и корректировать дополнительную априорную информацию о начальных извлекаемых запасах.

Ключевые слова: углеводороды, газ, месторождение, оценка, прогноз, методы, компьютерное моделирование, экспертные оценки.

METHODS FOR ASSESSING THE RESOURCES OF GAS FIELDS

A. V. Makarov, V. F. Shurshev

Makarov Albert Vladimirovich, postgraduate student, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, phone: + 7 (967) 339-28-93; e-mail: brad-pit1999@mail.ru;

Shurshev Valeriy Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Applied Informatics, Astrakhan State Technical University, Astrakhan, Russian Federation, phone: + 7 (851) 261-45-08; e-mail: v.shurshev@mail.ru

Methods for assessing the resources of gas fields are considered, their advantages and disadvantages are revealed. It is shown that geological risks take place when assessing the resources of the deposit. When analyzing geological risks, it is necessary to take into account the basic elements of hydrocarbon occurrence management. A description of the method of geological analogy is presented, in which scaling coefficients of other methods and computer simulations are used in practice. It is shown that the advantage of using volumetric methods in the assessment of deposits is its good binding to the most important aspects of geology. It is possible to use extrapolation methods to predict the volume of deposits. It is concluded that some measure of risk should be included in the method for assessing gas deposits. It is shown that in order to estimate the volume of gas deposits, it is necessary to use methods based on an integrated system of material balance models that allow taking into account and correcting additional a priori information about the initial recoverable reserves.

Keywords: hydrocarbons, gas, field, assessment, forecast, methods, computer modeling, expert assessments.

Несмотря на последние события в политике сырьё по-прежнему остается ключевым источником дохода российского бюджета. Многие газовые и экономике, добыча и продажа углеводородного