# К ВОПРОСУ ПОВЫШЕНИЯ СХОДИМОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОВЕДЕНИЯ КУПОЛОВ ПОД НАГРУЗКОЙ

## Авдяков Д.В.

канд. техн. наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства Курский государственный университет (г. Курск, Россия)

## Рябцева Н.А.

магистрант Курский государственный университет (г. Курск, Россия)

**Аннотация:** в работе рассмотрены факторы, влияющие на сходимость экспериментальных и теоретических исследований поведения куполов под нагрузкой.

**Ключевые слова:** купола, стропильные строительные конструкции, сетчатые купола, теоретические исследования, экспериментальные исследования, неустойчивость, нелинейность

TO THE QUESTION OF INCREASING THE CONVERGENCE OF EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES OF THE BEHAVIOR OF DOMES UNDER LOAD

### Avdyakov D.V.

Kursk State University

(Kursk, Russia)

#### Ryabceva N.A.

(Kursk, Russia)

**Abstract:** the paper examines factors influencing the convergence of experimental and theoretical studies of dome behavior under load.

*Keywords*: domes, rafter building structures, mesh domes, theoretical studies, experimental studies, instability, nonlinearity

Kursk State University

Известно, что купола, основанные на правильном многоугольном расположении тонких прямолинейных элементов с ограждающими панелями, являются эффективным средством ограничения пространства или покрытия больших площадей, при котором обеспечивается оптимальное соотношение строительного объема здания к весу ограждающих конструкций. Данное обстоятельство обеспечивает значительное преимущество перед остальными видами несущих стропильных строительных конструкций и является наиболее экономически выгодным для зданий и сооружений с большими пролетами, например, стадионов, а также объектов среды космического обитания [1, 2]. По аналогии с пологими арками, кривая графика зависимости прогиба от нагрузки может показать неустойчивость элементов куполов, включая склонность к «проскакиванию» (или «прощёлкиванию»). Т.е. часть или вся конструкция купола под действием внешних нагрузок может вогнуться в обратную сторону геометрической выпуклости (инвертироваться) [3, 4, 5]. Ключевыми факторами, влияющими на неустойчивость таких конструкций, как отметил Джионку [1], являются: структурная геометрия, режимы неустойчивости, начальные дефекты, граничные условия,

жесткость соединений и т. д. Что касается структурной геометрии, поскольку свойства материала и отдельных элементов обычно могут изменяться в ограниченном диапазоне, ряд исследователей сосредоточились на влиянии коэффициента подъема пролета или пологости конструкций купола [2, 6, 7]. При различных геометрических условиях и распределении нагрузки, структура может неустойчивости: демонстрировать различные формы неустойчивость элемента, узла, неустойчивость геометрической формы, а также общую неустойчивость [6, 8]. Большинство проведенных исследователями численных анализов, особенно основанных на моделях ферм [2, 9, 10], показали хорошую сходимость при изучении общей неустойчивости сетчатых куполов. Однако было сделано лишь несколько попыток исследовать неустойчивость элемента и режимы отказа, связанные с неустойчивостью элемента (например, неустойчивость кручения). Ланза указал на такое поведение элемента по результатам проведенного эксперимента [11]. Тем не менее, это поведение не было зафиксировано ни в одном другом эксперименте, возможно, из-за их слишком больших моделей [1]. В 1992 году авторы Джионку и Балут подчеркнули опасность распространения локальной неустойчивости на большую площадь [12]. Это явление было из причин обрушения большепролетного павильона в Бухареста в 1963 году и затем было исследовано Абеди и Парком [6, Жесткость соединений, а также граничные условия, также привлекли внимание 13]. исследователей. Его значительное влияние на поведение сетчатых купольных конструкций было подчеркнуто Джионку и Балутом [12], Лопесом и др. [4], Шоном и др. [14] и т.д. Фактически, изменение жесткости соединения может не только изменить несущую способность и влиять на наличие прощелкиваний в реакции после потери устойчивости [4], но также вызвать последующую потерю устойчивости [15].

Несмотря на то, что большинство имитационных анализов производилось из предположения идеально шарнирных или жестких соединений, в реальности трудно создать такие идеальные соединения экспериментально. Некоторые исследования были сосредоточены на разработке численных моделей, включающих полужесткие соединения [4, 16, 17]. Их работа показала недостаточную сходимость между экспериментальными и численными результатами, поскольку для сетчатых куполов сложно отличить влияние жесткости соединения и других недостатков и искусственных ошибок в экспериментальных исследованиях, например, предварительного напряжения, возникающего в результате сборки купола. Как следствие, эти эксперименты с полужесткими соединениями не могут являться идеальной проверкой для численного анализа.

Большое количество теоретических подходов было выполнено для исследования нелинейного поведения сетчатых куполов. Нагрузка выпучивания была исследована Ямадой и др. [18] и Шоном и др. [2] с учетом различных геометрических дефектов и типов нагрузки. Поведение после выпучивания, которое содержит множество смежных путей равновесия (ветвей разветвления), также привлекло многих исследователей. Теоретико-групповая теория бифуркации, которая первоначально использовалась при анализе гексагональных сетчатых куполов Хили [19], является одним из основных подходов. Гатерманн и Хохманн [20], Мурота и Икеда [21] и Гатерманн [22] разработали метод отслеживания путей равновесия симметричных ферменных конструкций. Кавех и Никбахт [23] и Чен и Фэн [7] расширили алгоритм до каркасных моделей. Метод доказал свою достаточную точность и эффективность при анализе ферменных конструкций. Однако для жестко соединенных шестиугольных куполов для анализа выпучивания элементов и связанного поведения выпучивания модель каркаса обычно включает сотни степеней свободы и имеет большое количество равновесных ветвей. Это может занять много времени для всех численных методов.

В отличие от большого количества численных исследований, в научной литературе было описано мало экспериментов по сетчатым куполам, особенно для режима после выпучивания. Кани и Макконнел [24, 25], Като и др. [26] и Кани и Хейдан [27] получили локальные явления разрушения сетчатых куполов при кратковременной нагрузке экспериментально, но эксперимент завершили сразу после предельной или выпучивающей нагрузки. Другими словами, их испытания просто представили поведение неустойчивости узла и они пренебрегли исследованиями поведения сетчатых куполов после выпучивания. Лопес и др.[4] и Ма и др.[28] продемонстрировали прочность после выпучивания своих экспериментальных сетчатых куполов. Тем не менее, в их результатах не было показано явного поведения проскока. Лопес и др.[4] и Фонг и др.[29] изучали сетчатые купола с полужесткими соединениями и получили более лучшую согласованность между численными и экспериментальными результатами, но в то же время, вводя новые неоднозначные факторы. Ограниченные точностью изготовления, все эти эксперименты имели проблему наличия неизбежных начальных дефектов и начального предварительного напряжения. До сих пор, хотя и имеется множество численных результатов, все еще отсутствует надежная экспериментальная проверка высоко нелинейных реакций после выпучивания гексагональных сетчатых куполов, особенно для типичного поведения проскока и множественных устойчивых путей равновесия.

Одним из выходов с целью устранения вышеописанных дефектов экспериментальных моделей сетчатых куполов является их изготовление с помощью 3D-печати, что позволит обеспечить необходимую жесткость узлов и может дать более лучшую сходимость численных и экспериментальных результатов исследований. Серия купольных конструкций высокой точности с идеально жесткими соединениями и зажатыми граничными условиями может быть выполнена с помощью 3D-печати. Эта новая технология показала свою надежность при создании сложных 3D-структур с наличием минимального предварительного напряжения [30, 31], что необходимо для повышения точности проводимых экспериментов и сравнения их с численным анализом.

### Список литературы:

1. Gioncu V. Buckling of reticulated shells: state-of-the-art. Int. J. of Space Structures (May) 1995.

2. Shon S.D., Lee S.J., Lee K.G., Characteristics of bifurcation and buckling load of space truss in consideration of initial imperfection and load mode. J. Zhejiang Univ.-Sci. A (Appl. Phys. and Eng.) 14, 2013 — pp 206–213.

3. Chen X., Shen S.Z. Complete load-deflection response and initial imperfection analysis of singlelayer lattice dome. Int. J. Space Struct. 8, 1993. — pp 271–278.

4. López A., Puente I., Serna M.J.A. Numerical model and experimental tests on single-layer latticed domes with semi-rigid joints. Comput. Struct. 85, 2007 — pp 360–374.

5. Rothert H., Dickel T., Renner D. ,. Snap-through buckling of reticulated space trusses. J. Struct. Div. (ASCE) 107, 1981 — pp 129–143.

6. Abedi K., Parke G.A.R., Progressive Collapse of Single-Layer Braced Domes. International Journal of Space Structures Vol 11 (3), 1996 — pp 291–306.

7. Chen Y., Feng J. Group-theoretic method for efficient buckling analysis of prestressed space structures. Acta Mechanica 226 (3), 2015 — pp 957–973.

8. Su W.J., Hai X. Analysis on the stability of single layer spherical lattice shell. In: Xie L. (Ed.), Proceedings, Second International Conference on Civil Engineer- ing, Energy and Environment (CEEE 2015), 6, 2016 — pp. 70–76.

9. Tanaka K., Kondoh K., Atluri S.N. Instability analysis of space trusses using exact tangent-stiffness matrices. Finite Elem. Anal. Des. 1, 1985 — pp 291–311.

10. Koohestani K., Kaveh A. Efficient buckling and free vibration analysis of cyclically repeated space truss structures. Finite Elements in Analysis and Design 46 (10), 2010 — pp 943–948

11. Lanza P. Instability of Single Layer Doubly Curved Vaults. International Jour- nal of Space

Structures 7 (4), 1992 — pp 253–264.

12. Gioncu V., Balut N. Instability Behaviour of Single Layer Reticulated Shells. International Journal of Space Structures 7 (4), 1992 — pp 243–252.

13. Abedi B.K., Parke G. Experimental Study of Dynamic Propagation of Lo- cal Snap-through in Single-layer Braced Domes. International Journal of Space Structures 16 (2), 2001 — pp 125–136.

14. Shon S.D., Hwang K.J., Lee S.J. Numerical evaluation of buckling behavior in space structure considering geometrical parameters with joint rigidity. J. Central South Univ. 21, 2014 — pp 1115–1124.

15. Shan W., Oda K., Hangai Y., Kondoh K. Design and static behavior of a shallow lattice wooden dome. Engineering Structures 16 (8), 1994 — pp 602–608.

16. Ramalingam R., Jayachandran S.A. Postbuckling behavior of flexibly connected single layer steel domes. J. Construct. Steel Res. 114, 2015 — pp 136–145.

17. Zhao Z., Chen Z., Yan X., Xu H., Zhao B. Simplified numerical method for latticed shells that considers member geometric imperfection and semi-rigid joints. Adv. Struct. Eng. 19, 2016 — pp 689–702.

18. Yamada S., Takeuchi A., Tada Y., Tsutsumi K. Imperfection-sensitive overall buckling of singlelayer lattice domes. J. Eng. Mech. 127, 2001 — pp 382–396.

19. Healey T.J. A group-theoretic approach to computational bifurcation problems with symmetry. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 67 (3), 1988 — pp 257–295.

20. Gatermann K., Hohmann A. Symbolic exploitation of symmetry in numerical pathfollowing. IMPACT of Computing in Science and Engineering 3 (4), 1991 — pp 330–365.

21. Murota K., Ikeda K. Computational use of group theory in bifurcation analysis of symmetric structures. SIAM journal on scientific and statistical computing 12 (2), 1991 — pp 273–297.

22. Gatermann K. Computation of Bifurcation Graphs. In: Exploiting Symmetry in Applied and Numerical Analysis, volume 29 of Lectures in Applied Mathematics. American Mathematical Society, 1993 — pp 187–202.

23. Kaveh A., Nikbakht M. Stability analysis of hyper symmetric skeletal structures using group theory. Acta Mechanica 200 (3-4), 2008 — pp 177–197.

24. Kani I.M., McConnel R.E. Collapse of shallow lattice domes. J. Struct. Eng. 113, 1987 — pp 1806–1819.

25. Kani I.M., Mcconnel R.E. Single Layer Shallow Lattice Domes: Analysis , Gen- eral Behaviour and Collapse. International Journal of Space Structures 3 (2), 1988 — pp 64–73.

26. Kato A., Mutoh I., Shomura M. Collapse of semi-rigidly jointed reticulated domes with initial geometric imperfections. J. Construct. Steel Res. 4 8, 1998 — pp 145–168.

27. Kani I.M., Heidan A. Automatic two-stage calculation of bifurcation path of perfect shallow reticulated domes. J. Struct. Eng. 133, 2007- pp 185–194.

28. Ma, H., Ren, R., Fan, F. Experimental and numerical research on a new semi—rigid joint for single-layer reticulated structures. Eng. Struct. 126, 2016 — 725–738.

29. Fong M., Liu Y.P., Chan S.L. Second-order analysis and experiments of semi-rigid and imperfect domes.. Adv. Struct. Eng. 15, 2012 - pp 1537-1546.

30. Moon S.K., Tan Y.E., Hwang J., Yoon Y.-J. Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 1 (3), 2014 — pp 223–228.

31. Turner B., Strong R., Gold S. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling. Rapid Prototyping Journal 20 (3), 2014 — pp. 192–204.