

DOI: 10.32347/2076-815X.2022.80.203-209

УДК 528.48

к.т.н., доцент **Ісаєв О.П.**,
geo_i@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2175-0324,
Київський національний університет будівництва і архітектури
д.т.н., професор **Куліковська О.Є.**,
kulikovskaja13@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2168-1445,
Криворізький національний університет
д.т.н., професор **Катушков В.О.**,
kva_08@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3264-413X,
Київський національний університет будівництва і архітектури

ВПЛИВ ПОХИБОК ПОЛОЖЕННЯ НА СТІЙКІСТЬ НЕСУЧОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО СТРИЖНЯ ВЕЛИКОЇ ГНУЧКОСТІ

Багато будівельних конструкцій розглядаються як стрижневі системи. Несучі елементи стрижневих систем знаходяться під навантаженням і зазнають великих напруг та деформацій. При зростанні зовнішніх навантажень вони також зростають. Може настати момент, коли деяким елементам не вистачить запасу міцності, жорсткості або стійкості. Такі випадки можуть виникнути через нерівномірне осідання та нахил споруди в сукупності з похибками виготовлення та встановлення конструкцій, недостатнього опрацювання проектів тощо. Одним із головних заходів щодо своєчасного запобігання аварійним ситуаціям є правильно організований моніторинг напружено-деформованого стану елементів. У цій роботі розглядається модель напруженої конструкції, в якій поєднуються елементи у вигляді гнучких стрижнів та елементів, що їх навантажують, представлених векторами сил. Як приклад розглянута конструкція з двох вертикальних прямолінійних стрижнів, спрямованих по одній вертикальній лінії та з'єднаних у вузлі. Нижній стрижень закріплений в основі і є елементом, що сприймає навантаження. Верхній стрижень є зовнішнім навантаженням для нижнього та представлений еквівалентом – вектором сили. Теоретично лінії дії сил лежать на одній вертикальній лінії, тому крім осьових поздовжніх сил немає інших сил і моментів; сили прикладені в одній точці із заданими координатами. При конструюванні стрижневої системи кожен стрижень необхідно встановити в задане проектне положення. На стадії монтажу конструкції будуть допущені похибки положення елементів. Вони представлені похибками в заданих кутах нахилу стрижнів і похибками положення кінців стрижнів у вузлі. У напруженій конструкції ці похибки рівнозначні похибкам векторів сил. Виникає змінена система векторів сил. У такій системі через похибки

положення з'являється горизонтальна сила, що надає основний вплив на стійкість гнучкого несучого стрижня при збільшенні зовнішнього навантаження.

Ключові слова: гнучкий стрижень; похибки положення; стійкість гнучкого стрижня; напруги та деформації стрижневої системи; геодезичний моніторинг.

Актуальність теми. Конструкції багатьох сучасних будівель та споруд розглядаються як стрижневі системи. У стрижневих системах елементи, тобто стрижні, знаходяться під навантаженням і відчують нерідко великі напруги та деформації. В нормальних умовах експлуатації, при розрахункових навантаженнях та якісному виконанні, елементи будівельних конструкцій забезпечують надійну роботу всієї споруди загалом. При посиленні зовнішніх впливів на споруду та зростанні навантажень в елементах стрижневих систем виникнуть додаткові напруження та деформації, які також зростатимуть. Може настати момент, коли деяким елементам не вистачить запасу міцності, жорсткості або стійкості, щоб упоратися з критичними навантаженнями. Подібні ситуації можуть виникнути через нерівномірне осідання та крену споруди в сукупності з похибками виготовлення та встановлення конструкцій, недостатнім опрацюванням проектів тощо.

Одним із головних заходів щодо своєчасного запобігання аварійним ситуаціям є початковий (з самого початку виникнення деформацій), безперервний геотехнічний, геодезичний та інженерно-будівельний контроль напружено-деформованого стану споруд, що знаходяться в несприятливих умовах експлуатації. Контроль передбачає прилади, методикау та точність вимірів.

Постановка задачі. Завдання цієї статті – показати вплив похибок взаємного положення елементів будівельних конструкцій у вузлі плоскої стрижневої системи; представити систему стрижнів еквівалентною системою векторів сил і оцінити стійкість несучого вертикального гнучкого стрижня в результаті похибок положення векторів сил.

Виклад матеріалу. Несучі конструкції багатьох споруд являють собою стрижневі системи, у яких окремі елементи у вигляді прямолінійних або криволінійних стрижнів з'єднані між собою в шарнірних або жорстких вузлах. При цьому залежно від призначення та розташування стрижнів у системі (конструкції) вони працюють на розтягування, стиснення або вигин, тобто здатні сприймати розтягуючі або стискаючі сили чи моменти.

Конструктивні схеми стрижневих систем можуть бути найрізноманітнішими та відображати як плоскі конструкції (у вертикальній або

горизонтальній площині), так і просторові. Вузли з'єднання можуть бути представлені в різних варіантах, коли до кожного може підходити кілька елементів з різних напрямків простору. Розглянемо для прикладу вузол плоскої системи навантажених стрижнів, в якому за проектом сходиться два вертикальних стрижня, розташованих на одній лінії.

Припустимо, до вертикальних стрижнів приклали осьове навантаження, внаслідок чого вони отримали напружено-деформований стан. За розрахунком після докладання навантаження та пружної деформації стрижні повинні зберегти форму рівноваги, забезпечивши роботу конструкції в заданих межах міцності, жорсткості та стійкості. На рис. 1 а представлена геометрична схема описаної моделі, на якій стрижні показані у вигляді відрізків ліній (осей). Загалом для вирішення завдань прикладної геодезії звертаються до різних моделей, що описують будівельні конструкції з погляду математики, будівельної та теоретичної механіки, сопромату тощо [4]. У роботі [1] була описана модель абсолютно твердого тіла, на яке впливала зовнішня сила, що представлена вектором сили, еквівалентним жорсткому прямолінійному стрижню. Було показано, що вектор сили має дві сутності – геометричну та фізичну, і у нашому розумінні – не математична абстракція. За ним стоїть реальний елемент будівельної конструкції, зорієнтований у просторі, навантажений власною вагою і зовнішнім навантаженням, і який впливає на інший елемент. У даній роботі ми використовуємо модель, в якій поєднуються елементи у вигляді гнучких стрижнів, що деформуються, і елементів, що впливають на них, представлених векторами сил.

На підставі досліджень, проведених у роботах [1; 2], було обґрунтовано, що навантаженому осьовим навантаженням прямолінійному стрижню ставиться у відповідність вектор сили, спрямований уздовж осі стрижня. Тобто стрижень та вектор сили еквівалентні. Тому в моделі ми можемо розглядати елемент, що сприймає навантаження, як несучий стрижень, а елемент (стрижень), що передає навантаження, як вектор сили.

При конструюванні стрижневої системи кожен стрижень потрібно перемістити в просторі і встановити в задане проектне положення: поставити кінцем у задану точку під заданими кутами до інших елементів.

На стадії монтажу конструкції будуть допущені похибки взаємного положення стрижнів у вузлі. Загалом це похибки в заданих кутах нахилу стрижнів і похибки положення кінців стрижнів у вузлі. Як показано в роботі [2], похибки положення стрижня та похибки положення вектора сили рівнозначні. Тому похибки в кутах нахилу осі стрижня є похибки в кутах, що визначають лінію дії сили, а похибки в координатах точок, що є початком або кінцем стрижня, є похибками в координатах точки прикладання сили.

Замінімо систему напружених стрижнів, розташованих так, як показано на рис. 1 а, еквівалентною системою векторів сил (рис. 2, а). Зробимо опис проектної системи векторів сил: напрямки дії сил протилежні; лінії дії сил лежать на одній вертикальній лінії, тому крім осьових поздовжніх сил *немає інших сил та моментів*; сили прикладені в одній точці A_0 із заданими координатами.

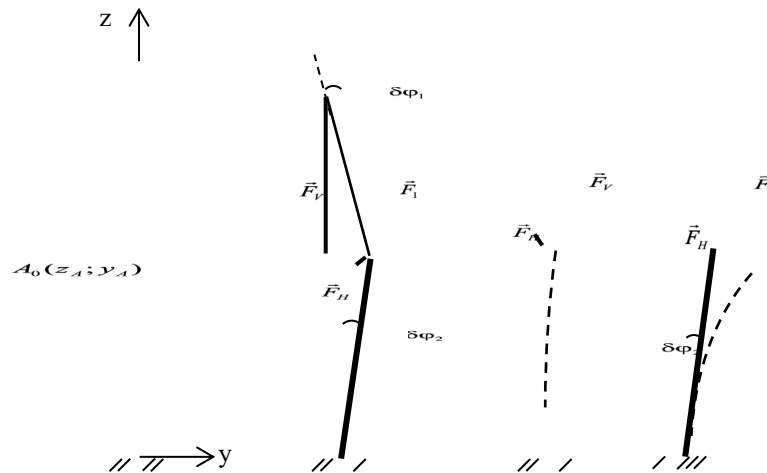


Рис. 1. Вплив похибок положення стрижнів у конструкції на стійкість несучого стрижня: а) проектна схема конструкції; б) виникнення горизонтальної складової прикладеного навантаження внаслідок похибки нахилу вектора сили; в) здатність горизонтальної сили відхилити несучий стрижень від вертикалі та впливати на його стійкість; г) посилення впливу похибки нахилу несучого стрижня на його нестійке становище

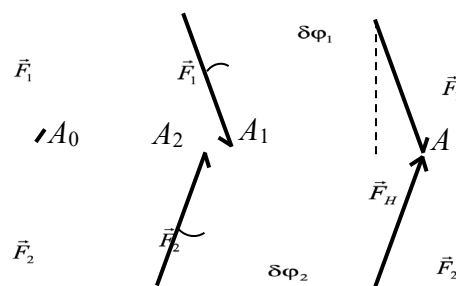


Рис. 2. Вплив похибок положення векторів сил на зміну системи сил: а) проектна схема векторів сил; б) змінена схема векторів сил унаслідок похибок положення; в) змінена система сил

Встановлюючи елементи конструкції в проектне положення, і, допускаючи похибки геодезичних та монтажних робіт, тим самим задають дійсне положення векторів сил у просторі. При реалізації проекту, внаслідок зазначених похибок виникає інша, *змінена* система векторів сил [2], яка визначає змінену фізичну взаємодію елементів будівельної конструкції. У нашому прикладі змінена система векторів сил за рахунок похибок положення в

загальному випадку представлена векторами, зміщеними відносно один одного та відносно проектної точки прикладання сили, та нахиленими щодо вертикальної лінії (рис. 2, б). Розглянемо випадок, коли вектори сил, зберігаючи загальну точку прикладання, мають кути нахилу відносно вертикальної осі (рис. 2, в) у вигляді граничних допустимих відхилень (тобто похибку нахилу). У такій системі, як бачимо, виникає горизонтальна сила, прикладена у точці А.

В моделі, що показана на рис. 1, нижній, закріплений в основі стрижень, є несучим, гнучким, працюючим на стиск і стійкість, а верхній, що передає навантаження, представлений як вектор сили. У незмінній системі зі збільшенням зовнішнього навантаження в несучому стрижні збільшуються напруження і деформації стиснення. Коли зовнішня навантажувальна сила досягне певного критичного значення, стрижень опиниться в стані біфуркації [5], тобто у нестійкій рівновазі між прямолінійною та криволінійною формою. В цьому випадку горизонтальна сила стане причиною вигину стрижня, великих переміщень, залишкових деформацій і, навіть, коливань, які призводять до руйнування. Причому в змінній системі вигин може статися значно раніше, ніж зовнішнє навантаження досягне критичного значення для даного стрижня.

Висновки. В теорії похибок положень [4] похибки положення напруженого стрижня і похибки положення еквівалентного вектора сили рівнозначні. Похибки положення напружених стрижнів у стрижневих системах (стрижні-вузли) будівельних конструкцій змінюють систему векторів сил і, таким чином, стан і форму рівноваги сил. Трансформована система сил, на відміну від теоретичної моделі, матиме інші значення та напрямки сил, прикладених не в проектних точках, а також може отримати додаткові сили та моменти сил. Тоді у разі несприятливих впливів і зовнішніх навантажень, що збільшуються (наприклад, нерівномірної осадки і крену, спільно з іншими сумарними зовнішніми впливами постійного і тимчасового типу) похибки положень сприятимуть розвитку деформацій. Прикладом може бути нестійка рівновага гнучкого стрижня під навантаженням близьким до критичного та зміна форми рівноваги (вигин стрижня) в результаті похибок положень. Звідси випливає, що, по-перше, похибки положень повинні бути в межах допустимих значень (забезпечується методикою попереднього розрахунку точності і технологіями виконання геодезичних та монтажних робіт). По-друге, система моніторингу повинна так відображати динаміку розвитку напружено-деформованого стану, щоб показувати з необхідною точністю, в якій точці розвитку знаходиться НДС на даний момент часу, і попередити про наближення цього стану до встановлених граничних напруг, зокрема до межі пропорційності. Це можливо, якщо виконувати безперервні виміри від початку розвитку деформацій.

Список літератури

1. Исаев А.П., Чибиряков В.К., Шульц Р.В. Исследование зависимости погрешности положения точки приложения силы от допустимого отклонения момента силы. *IX Междунар. науч. конгр. Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013*: сб. материалов Междунар. науч. конф. «СибОптика» в 3-х т. (г. Новосибирск, 15-26 апреля 2013 г.). Н.: СГГА, 2013. С. 3-13.
2. Исаев А.П. Воздействие погрешностей положений на систему двух вертикальных стержней. *Містобудування та територіальне планування*. 2013. № 48. С. 190-195.
3. Исаев А.П. Результаты погрешностей положения вектора силы в пространственной системе координат. *Містобудування та територіальне планування*. 2013. № 49. С. 225-230.
4. Исаев А.П. К теории положения. *Містобудування та територіальне планування*. 2014. № 51. С. 194 – 199.
5. Сопротивление материалов: учебник для вузов / Г.С. Писаренко и др.; под ред. Г.С. Писаренко. Киев: Вища школа, 1979. 696 с.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor **Isayev Alexandr**,
Kiev National University of Construction and Architecture,
Doctor of Technical Sciences, Professor **Kulikovskaya Olha**,
Krivoy Rog National University,
Doctor of Technical Sciences, Professor **Katushkov Volodymyr**,
Kiev National University of Construction and Architecture

INFLUENCE OF POSITION ERRORS ON THE STABILITY OF A LOAD-BEARING VERTICAL ROD OF GREAT FLEXIBILITY

Abstract: Many building structures are considered as rod systems. Bearing elements of rod systems are under load and experience large stresses and deformations. When external loads increase, these stresses and strains also increase. There may come a point where some elements lack strength, stiffness or stability. Such cases may arise due to uneven settlement and roll of the structure in conjunction with errors in the manufacture and installation of structures, insufficient development of projects, etc. One of the main measures for the timely prevention of emergency situations is the properly organized monitoring of the stress-strain state of the elements. In this paper, we consider a model of stressed structure, which combines elements in the form of flexible deformable rods and elements acting on them, represented by force vectors. As an example, we consider a structure of two vertical rectilinear rods pointing along one plumb line and connected in a node. The lower rod

is pinched in the base and is a load bearing element. The upper rod is an external load for the lower one and is represented by the equivalent force vector. In theory, the lines of action of forces lie on one vertical line, so there are no other forces and moments besides axial longitudinal forces; the forces are applied at one point with given coordinates. When constructing the rod system, each rod must be set to a given design position. There will be position errors of the elements during the installation phase of the structure. Position errors are generally represented by errors in the specified angles of inclination of the rods and errors in the position of the ends of the rods in the assembly. In a stressed structure, these errors are equivalent to the errors of the force vectors. A modified system of force vectors arises. In such a system, due to position errors, a horizontal force arises which has the main influence on the stability of the supporting flexible rod when the external load increases.

Key words: flexible rod; position errors; stability of flexible rod; stresses and deformations of rod system; geodetic monitoring.

REFERENCES

1. Isayev A.P., Chibiryakov V.K., Shul'ts R.V. Issledovaniye zavisimosti pogreshnosti polozheniya tochki prilozheniya sily ot dopustimogo otkloneniya momenta sily. IX Mezhdunar. nauch. kongr. Interekspo GEO-Sibir'-2013: sb. materialov Mezhdunar. nauch. konf. «SibOptika» v 3-kh t. (g. Novosibirsk, 15-26 aprelya 2013 g.). N.: SGGGA, 2013. S. 3-13. {in Russian}
2. Isaev A.P. Vozdeystviye pohreshnostey polozhenyy na systemu dvukh vertykal'nykh sterzhney. Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya. 2013. № 48. S. 190-195. {in Russian}
3. Isayev A.P. Rezul'taty pogreshnostey polozheniya vektora sily v prostranstvennoy sisteme koordinat. Mistobuduvannya ta teritorial'ne planuvannya. 2013. № 49. S. 225-230. {in Russian}
4. Isaev A.P. K teoryi polozhenyya. Mistobuduvannya ta terytorial'ne planuvannya. 2014. № 51. S. 194 – 199. {in Russian}
5. Soprotivleniye materialov: uchebnik dlya vuzov / G.S. Pisarenko i dr.; pod red. G.S. Pisarenko. Kiyev: Vishcha shkola, 1979. 696 s. {in Russian}