

УДК 528.2

канд. техн. наук, доцент Исаев А.П.,

geo_i@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2175-0324,

доцент Гуляев Ю.Ф., gulaev_uf@ukr.net, ORCID:0000-0002-7265-1975,

Чуланов П.А., chulanov.po@kpnuba.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6735-3770,

Киевский национальный университет строительства и архитектуры

DOI: 10.32347/2076-815x.2019.70.230-240

ОСОБЕННОСТИ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА РАЗНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Оцениваются особенности работы геометрически неизменяемых статически определимых и статически неопределимых систем для организации геодезического мониторинга несущих строительных конструкций.

Ключевые слова: статически определимые системы, статически неопределимые системы, стержневые конструкции, геодезический мониторинг, перемещения, осадка, деформации, напряжения, точность геодезических измерений.

Актуальность подготовки и организации проведения геодезического мониторинга определяется строительством большого количества крупных, нетиповых, сложных инженерных сооружений. Одними из самых важных вопросов, которые возникают при этом – с какой точностью нужно получить результаты и с какой точностью нужно для этого делать измерения.

В геодезическом мониторинге поведения строительных конструкций, работающих под воздействием силовых и температурных нагрузок, определяют координаты точек, по которым определяют перемещения и деформации, оценивают пространственное положение элементов, их размеры, форму, и т.д. С какой точностью нужно определять координаты, а затем перемещения и деформации, зависит от напряженно-деформированного состояния конструкции, её геометрии, характера внешней нагрузки, изменений температуры и других факторов.

Исходя из этого, в данной статье сделана попытка обосновать расчет точности и показать, для каких типов строительных конструкций и при каких внешних воздействиях на них достаточно обойтись требованиями общего характера и условиями геометрических зависимостей, а для каких обязательно использовать в расчете ещё и физические зависимости.

Постановка задачи. Показать задачи геодезического мониторинга для инженерных конструкций, представленных как статически определимые и

статически неопределимые системы. Описать их с точки зрения напряженно-деформированного состояния и особенностей физической работы при перемещениях, деформациях и погрешностях положения. Показать зависимость априорного расчета точности, осуществляемого при подготовке мониторинга, от типа конструкции.

Изложение основного материала. Все несущие конструкции и их элементы в период монтажа, а так же во время эксплуатации подвергаются силовым ¹⁾ и температурным воздействиям. Это основные факторы, под действием которых они могут перемещаться и деформироваться.

Как известно, под действием внешних сил незакрепленное материальное тело движется и перемещается по определенной траектории в какое-то положение на момент времени t_i .

В трехмерном пространстве свободное материальное тело, имеющее шесть степеней свободы (три поступательные и три вращательные), в целом перемещается и *под действием внешних сил не имеет дополнительных внутренних усилий и моментов*. То же самое происходит в плоскости, когда тело имеет две поступательные и одну вращательную степень свободы. С изменением температуры свободное материальное тело расширяется или сжимается (деформируется), но это не создает напряжений внутри него. То есть, свободное материальное тело под действием внешних сил и при изменении температуры не изменяет своего напряженного состояния.

Геодезический мониторинг перемещения такого тела сводится к определению координат точек с точностью, которая устанавливается наблюдателем, не связывающим ее с параметрами и характеристиками материального тела, а только лишь с некоторой необходимостью, с системой отсчета, скоростью, траекторией движения и т.п. Геодезический мониторинг деформаций так же не зависит от характеристик материального тела, под которыми понимается плотность, твердость, упругость и т.д.

Материальное тело может быть частично свободным или полностью закрепленным (преодолевающим внешнее сопротивление).

Строительная механика изучает различные типы стержневых систем, в том числе геометрически изменяемые и геометрически неизменяемые системы.

¹⁾ – за внешнюю силовую нагрузку на сооружение принимаются различные комбинации внешних сил (собственный вес, снег, вес предметов, оборудования и людей, вес машин и механизмов, инерционные силы от них, ветер и т.д.), осадки, перемещения и крены опор и фундаментов.

Какая из них представлена, зависит от геометрической структуры конструкции и условий её закрепления. Для этого делается кинематический анализ расчетной схемы [1]. Геометрически изменяемые системы (в том числе механизмы) подвержены значительным перемещениям в силу своих геометрических и кинематических особенностей. Под действием внешних сил элементы такой системы получают относительные перемещения без деформаций. Система не упругая, меняет форму без изменения длин стержней и не возвращается в исходное положение после прекращения действия силы. Примером может служить шарнирный четырехугольник. Изменение температуры, даже неодинаковое для всех элементов системы, не приведет к деформациям и не вызовет температурных напряжений. [4]. Геометрически изменяемые системы не используются в качестве несущих строительных конструкций и в основном используются в технике.

Точность геодезического мониторинга таких систем (если в этом есть практическая необходимость) также не связана с характеристиками и напряженно-деформированным состоянием элементов системы и определяется в основном требованиями допустимых перемещений для обеспечения заданной геометрии, равновесия, устойчивости системы и т.д.

Реально создаваемые строительные конструкции и сооружения являются, как правило, геометрически неизменяемыми. Это такие системы элементов, которые под действием нагрузок и из-за перепадов температур могут изменять размеры и форму в небольших пределах, в связи с деформациями ее элементов. *Это следует подчеркнуть: перемещения возможны только за счет деформации элементов.* В отличие от геометрически изменяемых систем они имеют другие геометрические структуры и способы закрепления. В одних системах деформации элементов не стеснены и сопровождаются определенными свободными перемещениями, в других, жестко закрепленных, деформации происходят без свободных перемещений, с изменением размеров и формы и со значительными напряжениями в элементах. В первом случае системы называются статически определимыми (СОС), во втором – статически неопределимыми (СНС). В статически определимых системах нет лишних связей, число степеней свободы равно нулю (необходимое кинематическое условие), а статически неопределимые системы обладают лишними связями и число степеней свободы для них меньше нуля. В таких дисциплинах как строительная механика и сопромат названия и понятия СОС и СНС обусловлены расчетом соответственно внутренних усилий и перемещений, напряжений и деформаций.

Статически определимые системы. Для нас в геодезии название статически определимые (неопределимые) системы абстрактное, данное

указанными дисциплинами, так как свойством статической определенности (неопределенности) обладает не сама система, а задача её расчёта, из решения которой специалисты в области механики априорно находят возможные усилия, перемещения и деформации (расчет НДС). Нам же в геодезическом мониторинге важно понимать, как будут вести себя те или иные конструкции и как организовать измерения, так чтобы они дали наиболее достоверные результаты, и как правильно интерпретировать эти результаты. Поэтому материал об указанных системах излагается нами не иначе, как в свете геометрии конструкции, способов соединения её элементов и закреплений, расположения и типов связей, напряжений и деформаций под действием внешних сил и изменений температуры. Рассматривая стержневые конструкции, опишем статически определенную систему именно с такой точки зрения, не вдаваясь в подробности расчета силовых и других факторов, как это представлено в материалах строительных дисциплин.

Во-первых, при отсутствии внешних нагрузок на конструкцию все внутренние усилия в ней равны нулю. Если же на конструкцию осуществляется силовое воздействие, то под действием внешней нагрузки в элементах системы возникают внутренние усилия (N ; Q ; M). Интересно, что в статически определенных системах внутренние усилия могут возникнуть не во всех элементах системы, а только в части из них (зависит от нагрузки и структурной схемы). Остальные элементы при этом не работают. С изменением величины приложенной нагрузки изменяются и внутренние усилия, но они в СОС не зависят от упругих (жесткостных или физико-механических) свойств материала, форм и площадей сечений элементов [6].

Так как статически определенная система геометрически неизменяемая система, то перемещения под нагрузкой, как было сказано, возможны в результате деформации элементов. Однако в этом плане СОС имеют некоторые особенности, когда в результате определенных воздействий перемещения и отклонения в геометрии не сопровождаются напряжениями, и когда температурные деформации происходят без напряжений в элементах. Во всех этих случаях происходят свободные (без преодоления закрепления) перемещения и изменения положения узлов и элементов, изменения размеров и формы без увеличения напряжений. Эти особенности напрямую связаны с геодезическим мониторингом и проявляются при следующих факторах: осадка или горизонтальный сдвиг опор; погрешности изготовления, строительно-монтажных и геодезических работ; изменения температуры. СОС – это очень разные конструкции (см. рис. 1), поэтому особенности их поведения проявляются в большей или меньшей степени при указанных факторах. Рассмотрим эти факторы.

Если при неизменной внешней силовой нагрузке на конструкцию происходит осадка опор (пусть даже неравномерная), то это не приводит к деформациям элементов конструкции и к напряжениям в ней, по той причине, что в конструкции есть шарнирные соединения (в специально предусмотренных местах). В результате элементы конструкции повернутся, а не деформируются. В некоторых конструкциях горизонтальные смещения опор дают те же результаты. Геодезический мониторинг заключается в измерении осадки, горизонтального смещения и крена опор.

Аналогично можно сказать о том, почему погрешности изготовления элементов конструкции, погрешности монтажа и погрешности геодезических работ не вызовут в статически определимой системе изменений внутренних усилий. Геодезические работы заключаются в контроле изготовления элементов конструкций, в обеспечении установки и выверки конструкций, осуществлении разбивочных и контрольных работ.

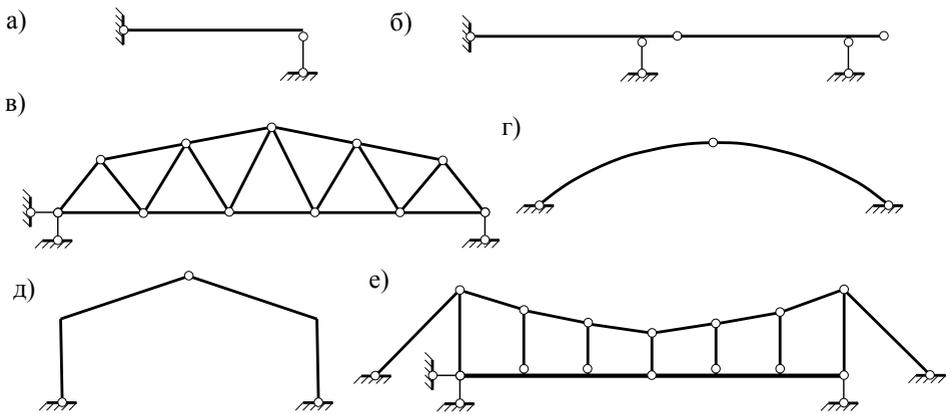


Рис. 1. Примеры статически определимых систем:
а – однопролетная балка; б – многопролетная балка; в – ферма; г – арка;
д – рама; е – комбинированная система

Изменения температуры (как равномерные, так и неравномерные) также не приводят к напряжениям, поскольку в результате температурного воздействия конструкция свободно деформируется из-за шарнирно-подвижных опор. Геодезический мониторинг заключается в наблюдении за температурными деформациями в виде удлинения (расширения или сжатия), изгиба и кручения элементов. При этом устанавливаются изменения размеров, формы и пространственного положения точек элементов конструкции.

Подводя итог, можно сказать, что геодезический мониторинг таких статически определимых систем сводится к измерениям перемещений характерных точек и к измерениям деформаций. При этом точность и методы измерений не связаны с НДС конструкции, а определяются допустимыми отклонениями в геометрии, если речь идет о свободных перемещениях и температурных деформациях. На этом подходе к расчету точности основывается точность детальных геодезических разбивочных и контрольных работ, связанных с монтажом статически определимых систем, точность измерения осадки и создания высотной основы, точность измерения крена опор и создания плановой основы, а также точность измерений изгибов и кручений опор при температурных воздействиях.

Если необходимо осуществлять геодезический мониторинг сооружений в связи с изменением характера и мест приложения внешней нагрузки, то точность и методы измерений должны быть связаны с НДС конструкции и допустимыми изменениями основных внутренних усилий (моментов) в элементах и напряжениях.

Статически неопределимые системы. Статически неопределимая система – это, как было сказано выше, геометрически неизменяемая система, в конструкции которой предусмотрены лишние (избыточные) связи для усиления её прочности, жесткости и устойчивости [7]. Лишние связи можно удалить, при этом конструкция, оставаясь геометрически неизменяемой, превратится в статически определимую. Таким образом, статически определимая система является частным случаем статически неопределимой системы.

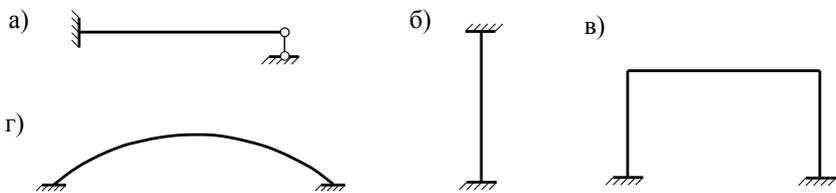


Рис. 2. Примеры статически неопределимых систем:
а – однопролетная балка; б – защемленный стержень; в – рама; г – арка

Избыточные связи создают такие условия закрепления, что если к СНС приложить внешнюю силовую нагрузку в любом её проявлении (сила, монтажные усилия, осадка и т.д.), то в ней возникнут напряжения и соответствующие им деформации (вначале упругие). При температурном воздействии возникнут температурные напряжения и деформации. В результате суммарного воздействия возникнут суммарные напряжения и деформации. Так,

например, для стержня длиной l при растяжении и изменении температуры до t градусов, общая упругая деформация составит:

$$\Delta_t l = \sigma l / E + \alpha(t - t_0)l,$$

где первое слагаемое – силовая деформация, второе – температурная [5].

Напряженно-деформированное состояние сложных, крупных статически неопределимых конструкций (сооружений) задает жесткие требования к геодезическому мониторингу таких систем в части определения перемещений и деформаций, а также к точности геодезических работ при обеспечении строительства.

В первом случае задача геодезического мониторинга за состоянием СНС состоит в отслеживании перемещений под силовой нагрузкой и температурными воздействиями, а также в измерении деформаций²⁾. В качестве примера перемещений можно привести осадку, горизонтальный сдвиг и крен опор, пространственное перемещение узлов соединения элементов, перемещения отдельных точек конструкции вследствие изменения её размеров и формы. Для определения деформации нужно измерить изменение размеров и формы деформационной точки, участка элемента или элемента в целом.

В зависимости от геометрии, условий закрепления конструкции, формы и размеров сечений, жесткостных свойств материала элементов, характера и величины внешней нагрузки и перепадов температуры в сечениях элементов могут возникать значительные суммарные напряжения даже при незначительных деформациях и перемещениях (т.е. при малых внешних проявлениях). Задача геодезического мониторинга: при нарастающем воздействии на конструкцию измерять перемещения и геометрические изменения так, с такой точностью, чтобы «видеть» изменения физического состояния конструкции. Это значит, что допустимая точность положения элементов и узлов их соединений, и точность геодезических измерений должна быть согласована с напряженно-деформированным состоянием и физическими характеристиками элементов, с геометрией конструкции и её поведением под нагрузкой.

Во втором случае речь идет о том, что создание СНС требует в теории абсолютно точных геодезических разбивочных и монтажных работ по взаимному расположению элементов и абсолютно точного изготовления элементов, чтобы при сборке они соединялись в узлах без приложения к ним усилий. Однако в случае практического осуществления, когда процесс

²⁾ – Перемещения зависят от деформации, но это не одно и то же, и не всегда перемещения характеризуют степень деформации, хотя в отдельных случаях их величины могут совпадать (например, при растяжении стержня).

реализации сопровождается соответствующими погрешностями изготовления, геодезических и монтажных работ, сборка возможна только за счет приложения определенных усилий к элементам. В результате чего в них возникают начальные (монтажные) напряжения. Назовем погрешности, вызывающие эти напряжения, начальными. Какими должны быть величины этих начальных погрешностей и предельная величина их суммарного влияния – решается на начальной стадии организации мониторинга с учетом предельно допустимых начальных напряжений.

Выводы. Все инженерные сооружения и строительные конструкции относятся к геометрически неизменяемым системам, т.е. они имеют такую геометрию и так закреплены, что перемещения элементов, изменения их формы возможны только за счет деформаций. Геометрически неизменяемые конструкции условно подразделяются на статически определимые и статически неопределимые системы, но за условностью проявляются их физические особенности, от которых зависит организация геодезического мониторинга. В частности, 1) допустимая точность (заданная исходя из НДС) положения точек относительно проектного значения (определяют положение элемента или узла); 2) точность геодезических измерений; 3) точность измерения перемещения точки относительно некоторого исходного положения; 4) точность измерения траектории точек при деформации элемента (определение плоской или пространственной фигуры деформации).

Особенностью СОС является то, что усилия в элементах возникают только от действия внешних сил (включая собственный вес). После монтажа конструкции она находится в стадии некоторого сложившегося физического состояния, которое не изменяется, если не изменяется внешняя силовая нагрузка. Причем любые погрешности её создания никак не сказываются на этом состоянии, так же, как и осадка опор. Даже температурные воздействия, которые приводят к деформациям и изменениям формы, не изменяют сложившегося состояния. Поэтому нет смысла связывать точность производства геодезических работ с НДС конструкции, кроме случая изменения силовой нагрузки.

Особенностью СНС является то, что в деформированных элементах возникают напряжения от проявления и изменения любых указанных выше воздействий: силовых, температурных, монтажных (в том числе геодезических). Напряжения и деформации в пределах упругих значений безопасны для конструкции, пока они не перешли в область текучести материала. С этого момента состояние конструкции находится под вопросом. Поэтому для СНС каждый из видов воздействия должен быть включен в программу мониторинга как самостоятельный фактор. Тогда предельно

допустимое напряжение на границе предела упругости должно быть разделено, как минимум, на три части, по каждой из которых находят допустимые значения начальных погрешностей, допустимые значения погрешностей положения точек, измерения перемещений и деформаций от силовых нагрузок и допустимые значения погрешностей положения точек, измерения перемещений и деформаций от температурных воздействий [8].

Л и т е р а т у р а

1. Баженов В.А., Иванченко Г.М., Шишов О.В., Пискунов С.О. Будівельна механіка. Розрахункові вправи. Задачі. Комп'ютерне тестування: Навч. посібник. К.: КНУБА, 2013. 584 с.

2. Киселев В.А. Строительная механика: Учебник для вузов. М.: Стройиздат, 1976. 511 с.

3. Дарков А.В., Шапошников Н.Н. Строительная механика: Учеб. для строит. спец. вузов. М.: Высшая школа, 1986. 607 с.

4. Научная библиотека избранных естественно-научных изданий. URL: <http://stu.alnam.ru/> (дата звернення: 1.06.2019).

5. Научная библиотека избранных естественно-научных изданий. URL: http://scask.ru/book_rbt.php?id=25 (дата звернення: 1.06.2019).

6. Строительная механика, часть I. Статически определимые системы (свойства, классификация): Презентация.

URL: <http://www.myshared.ru/slide/992959/> (дата звернення: 1.06.2019).

7. Строительная механика, часть II. Статически неопределимые системы (Общие сведения о СНС и их свойствах): Презентация.

URL: <http://www.myshared.ru/slide/948782/> (дата звернення: 1.06.2019).

8. Исаев А.П. Принципы измерения осадки статически неопределимых конструкций (на примере прямолинейного вертикального стержня) / А.П. Исаев, Р.В. Шульц, Ю.Ф. Гуляев, В.С. Стрилец // Инженерна геодезія: наук.-техн. зб. – К.: КНУБА, 2017. – Вип. 64. – С. 55-66.

канд. техн. наук, доцент Ісаєв О.П., доцент Гуляєв Ю.Ф., Чуланов П.О.

Київський національний університет будівництва і архітектури

ОСОБЛИВОСТІ ГЕОДЕЗИЧНОГО МОНІТОРИНГУ РІЗНИХ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

У статті оцінюються особливості роботи геометрично незмінних статично визначних та статично невизначних систем для організації геодезичного моніторингу несучих будівельних конструкцій.

Ключові слова: статично визначні системи, статично невизначні системи, стержневі конструкції, геодезичний моніторинг, переміщення, осідання, деформації, напруження, точність геодезичних вимірювань.

Ph.D., associate Professor Isayev A.P.,
associate Professor Gulayev U.F., Chulanov P.A.
Kyiv National University of Construction and Architecture

FEATURES OF GEODESIC MONITORING OF DIFFERENT CONSTRUCTION STRUCTURES

The features of the work of geometrically immutable statically definable and statically indefinable systems for the organization of geodetic monitoring of bearing building structures are evaluated.

Elements of building structures and their connections during operation can move as a result of deformations under the action of force loads and temperature effects. As a result of deformations, they also change their size and shape. Due to manufacturing, centering and installation errors, they have deviations from design values in size and mutual spatial arrangement.

Geodetic monitoring of supporting structures consists in measuring the vertical and horizontal displacements of elements and nodes of their joints, as well as in determining changes in the dimensions and shape of elements from deformations.

The errors in the manufacture and installation of elements, sediment and roll of supports, changes in size and shape as a result of thermal deformations affect the internal forces in the elements and the stresses in their sections.

In statically determinable systems, these factors do not alter the internal forces in the elements and do not create stresses in them, therefore the accuracy of the corresponding types of geodetic works depends mainly on the geometry of the structure.

In statically indefinable systems, these factors change the internal forces in the elements and create stresses in them, therefore the accuracy of the corresponding types of geodetic works depends on the stress-strain state of the structure.

Keywords: statically determinable systems, statically indefinable systems, core structures, geodesic monitoring, displacements, sediments, deformations, stresses, accuracy of geodetic measurements.

REFERENCES

1. Bazhenov V.A., Ivanchenko H.M., Shyshov O.V., Pyskunov S.O. *Budivel'na mekhanika. Rozrakhunkovi vpravy. Zadachi. Komp'yuterne testuvannya: Navch. posibnyk*. K.: KNUBA, 2013. 584 s.
2. Kiselev V.A. *Stroitel'naya mekhanika: Uchebnik dlya vuzov*. M.: Stroyizdat, 1976. 511 s.
3. Darkov A.V., Shaposhnikov N.N. *Stroitel'naya mekhanika: Ucheb. dlya stroit. spets. vuzov*. M.: Vysshaya shkola, 1986. 607 s.
4. Nauchnaya biblioteka izbrannykh yestestvenno-nauchnykh izdaniy. URL: <http://stu.alnam.ru/> (data zvernennya: 1.06.2019).
5. Nauchnaya biblioteka izbrannykh yestestvenno-nauchnykh izdaniy. URL: http://scask.ru/book_rbt.php?id=25 (data zvernennya: 1.06.2019).
6. *Stroitel'naya mekhanika, chast' Í. Statcheski opredelimyye sistemy (svoystva, klassifikatsiya): Prezentatsiya*. URL: <http://www.myshared.ru/slide/992959/> (data zvernennya: 1.06.2019).
7. *Stroitel'naya mekhanika, chast' ÍÍ. Statcheski neopredelimyye sistemy (Obshchiye svedeniya o SNS i ikh svoystvakh): Prezentatsiya*. URL: <http://www.myshared.ru/slide/948782/> (data zvernennya: 1.06.2019).
8. Isayev A.P. Printsipy izmereniya osadki staticheski neopredelimykh konstruktsiy (na primere pryamolineynogo vertikal'nogo sterzhnya) / A.P. Isayev, R.V. Shul'ts, YU.F. Gulyayev, V.S. Strilets // *Inzhenerna geodeziya: nauk.-tekhn. zb.* – K.: KNUBA, 2017. – Vip. 64. – S. 55-66.