

УДК 624.01

DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-293-298

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ изменения усилий в конструкциях при учете стадийности возведения

О.В. Мкртычев, М.И. Андреев*, Д.С. Сидоров

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
Ярославское шоссе, 26, Москва, Российская Федерация, 129337

*Автор, ответственный за переписку

(поступила в редакцию: 23 марта 2018 г.; принята к публикации: 25 июня 2018 г.)

В статье приведены результаты расчетных исследований, позволивших установить зависимость параметров напряженно-деформированного состояния несущих конструкций высотного здания при расчете с учетом и без учета стадийности возведения. Процесс строительства является многоэтапным и сильно связан с последовательностью выполняемых работ на строительной площадке. Как известно, бетон набирает расчетную прочность в течение определенного времени. Также, в том или ином порядке, могут выполняться работы по установке и удалению конструктивных элементов системы, изменению состояния связей. Таким образом, эти параметры влияют на конечное напряженно-деформированное состояние несущих конструкций. При расчете без учета стадийности возведения в колоннах верхних этажей зданий и сооружений могут возникать достаточно большие растягивающие усилия, наблюдаются характерные горизонтальные отклонения оси здания от вертикали. Источниками перекосов могут являться нерегулярность жесткостей здания в плане и неравномерные деформации основания сооружения. Данное явление объясняется неучетом стадийности возведения конструкций, считается, что здание загружается одномоментно. Горизонтальные смещения этажей, расположенных ниже уровня монтажа соответствующего этажа, необходимо компенсировать, учитывая их при расчете. В связи с этим, в статье рассматривается влияние учета стадийности возведения на усилия, возникающие в элементах здания. Представлен пример расчета высотного здания в программном комплексе «ЛИРА 9.6» с учетом стадийности возведения и пошагового приложения нагрузки на расчетную модель. Моделирование процесса возведения дает возможность учитывать неравномерную осадку вертикальных элементов, смещение характерных точек (отметок) сооружения в горизонтальном направлении.

Ключевые слова: строительные конструкции, расчетная модель, стадии возведения, высотное здание, напряженно-деформированное состояние, генетическая нелинейность, нелинейные методы расчета, конструктивная схема

Введение

В настоящее время в нормативных документах не существует строгих требований к расчетам с учетом стадийности возведения. Поэтому большинство расчетов строительных конструкций, зданий и сооружений проводятся без учета стадийности возведения, что может приводить к существенным погрешностям в результатах расчетов. В соответствии с требованиями ФЗ № 384 (ст. 16) расчетные модели (в том числе расчетные схемы) строительных конструкций и оснований должны отражать действительные условия работы здания или сооружения. Таким образом, задача исследования напряженно-деформированного состояния с учетом поэтапного изменения расчетных моделей является актуальной и

требует реализации при проведении расчета несущих конструкций сооружений и зданий [1].

В случае, когда нагрузка к зданию прикладывается одномоментно, его напряженно-деформированное состояние может отличаться от ситуации, когда нагрузка прикладывается в процессе возведения. Это происходит из-за изменения расчетной схемы здания при его деформировании в ходе возведения. Если изменения расчетной модели являются существенными, то задача должна решаться в генетически нелинейной постановке. Данный вид нелинейности является разновидностью геометрической нелинейности, возникающей в процессе возведения сооружения.

Существующая практика расчетных обоснований конструктивных решений сооружений и зданий основывается на проведении статических

расчетов в рамках процедуры одноэтапного расчета. При этом жесткостные и геометрические характеристики принимаются постоянными для всего расчетного процесса. Величины и характер приложения статических нагрузок на модель принимаются неизменными при проведении расчета.

При расчете без учета стадийности возведения в колоннах верхних этажей зданий и сооружений могут возникать достаточно большие растягивающие усилия, наблюдаются характерные горизонтальные смещения этажей конструкции, т.е. отклонения от вертикали оси здания. Источниками перекосов могут являться локально расположенные жесткие узлы лестнично-лифтовых блоков (нерегулярность жесткостей здания в плане) и неравномерные деформации основания сооружения [2]. Данное явление объясняется неучетом стадийности возведения конструкций, считается, что здание загружается одномоментно, а это не верно. Горизонтальные смещения этажей, расположенных ниже уровня монтажа соответствующего этапа, необходимо компенсировать, учитывая их при расчете [3].

Процесс фактического строительства в общем случае является многоэтапным и тесно связан с последовательностью выполняемых операций на строительной площадке. При этом, в том или ином порядке, могут выполняться работы по установке и удалению некоторых элементов системы, установке и удалению дополнительных грузов, изменению состояния связей. Кроме того, бетон набирает расчетную прочность в течение определенного времени [4].

Методика расчета

Для корректного учета вышеуказанных замечаний в современных отечественных (ЛИРА [5; 6], СКАД [7]) и зарубежных (ANSYS [8], LS-DYNA [9]) программных комплексах созданы специальные модули с условным названием «Монтаж», которые позволяют провести компьютерное моделирование процесса возведения конструкции, проследив последовательное изменение конструктивной схемы, установку и снятие монтажных нагрузок. Эти модули также позволяют создавать стадии демонтажа, в рамках которых можно как демонтировать конструкции, так и убирать нагрузки.

На каждой стадии возведения производится расчет соответствующей конструктивной схемы здания, содержащей элементы, смонтированные (или демонтированные) к этому моменту. При этом может производиться учет текущих прочности и модуля деформации бетона, а также наличия

временных стоек опалубки [10]. Если проектной арматуры или проектного железобетонного сечения оказывается недостаточно, то необходима корректировка проектных решений.

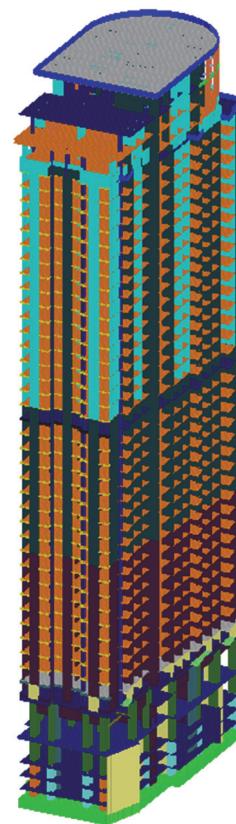


Рис. 1. Расчетная схема здания
[Figure 1. A design scheme of the building]

Рассмотрим высотный жилой дом, который представляет собой 39-этажное здание в форме трапеции, в плане с максимальными размерами по осям 1-17/A-P 30,95×52,15 м и максимальной высотой 143,3 м (рис. 1).

Каркас здания предусматривается в виде безригельного пространственного каркаса, включающего соединение фундаментов, колонн, стен, а также лестнично-лифтовых узлов, жестко связанных с монолитными перекрытиями.

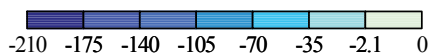
Пространственная жесткость и устойчивость здания обеспечивается совместной работой стен и колонн, стен лестнично-лифтовых блоков и плит перекрытий.

Несущие конструкции выполнены из монолитного железобетона: фундаментные плиты – бетон класса В35; наружные стены – бетон класса В40; колонны и внутренние стены – бетон класса В40; плиты перекрытий – бетон класса В35, В30; площадки лестниц и лестничные марши – бетон класса В25.

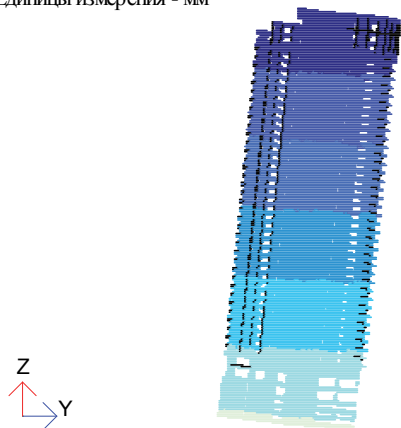
Результаты расчета

Таблица 1

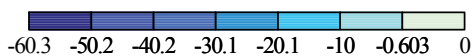
Ниже приведены конечные деформированные схемы с изополями перемещений по X без учета (рис. 2, а) и с учетом (рис. 2, б) стадийности возведения. Основные результаты расчета приведены в табл. 1.



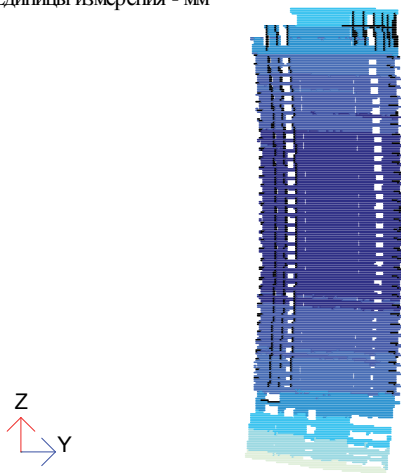
17
Изополя перемещений по X(G)
Единицы измерения - мм



a



Нелинейное нагружение 26
Изополя перемещений по X(G)
Единицы измерения - мм



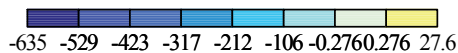
б

Рис. 2. Деформированная схема с изополями перемещений по X:
а – без учета стадийности возведения;
б – с учетом стадийности возведения
[Figure 2. Deformed scheme with isofields for X-direction:
а – without regard to the erection level;
б – taking into account the erection level]

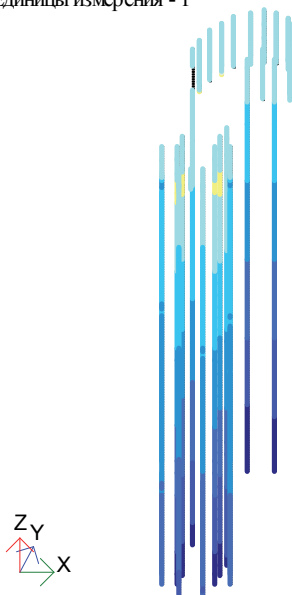
Основные результаты расчета
[Table 1. Main results of calculation]

	Без учета стадийности [Without regard to stage]	С учетом стадийности [Taking into account the stage]
Перемещения по X, мм [Displacement X, mm]	210	60,3
Перемещения по Y, мм [Displacement Y, mm]	372	102
Перемещения по Z, мм [Displacement Z, mm]	346	306
Усилия Mx, т*м/м (ФП) [Stress Mx, t*m/m (foundation)]	466(-559)	498(-547)
Усилия My, т*м/м (ФП) [Stress My, t*m/m (foundation)]	681(-685)	628(-559)
Усилия N, т (колонны) [Stress N, t (column)]	-635 (27,6)	-775

Далее приведены усилия N в колоннах без учета (рис. 3, а) и с учетом (рис. 3, б) стадийности возведения.



17
Мозаика N
Единицы измерения - т



a

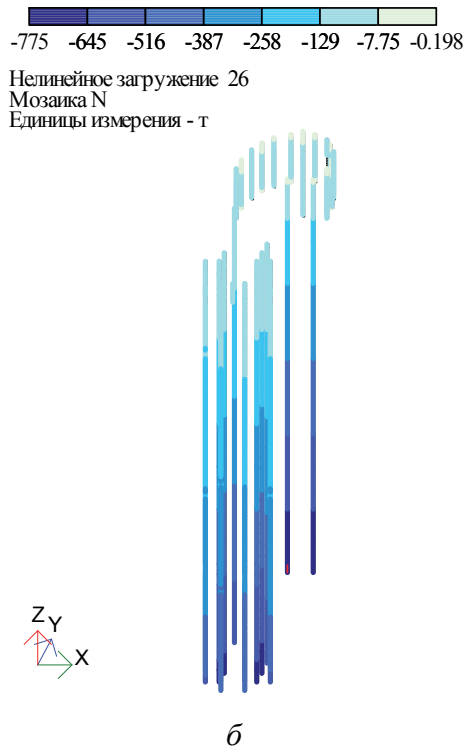


Рис. 3. Усилия N в колоннах:

a – без учета стадийности возведения;

б – с учетом стадийности возведения

[Figure 3. Efforts N in the columns:

a – without regard to the stage of construction;

б – taking into account the stage of construction]

Выводы

Сравнительный анализ перемещений показывает, что при учете стадийности возведения наблюдаются меньшие (в 7 раз) горизонтальные перемещения верха здания. Такие результаты принципиально соответствуют данным, полученным по итогам мониторинга различных многоэтажных высотных зданий.

Следует отметить, что при расчете без учета стадийности возведения возникают растягивающие усилия N до 28 тс в колоннах верхних этажей (рис. 3, *a*), что не соответствует действительности. Растягивающие усилия не наблюдаются при учете последовательности возведения (рис. 3, *б*). Из сравнительного анализа результатов также видно, что при моделировании здания с учетом стадийности возведения наблюдается более адекватная картина в части распределения напряжений и усилий (сглаженный характер) по несущим элементам каждого этажа, что приводит к экономии бетона и арматуры.

Заключение

Таким образом, вышеизложенное свидетельствует о необходимости учета стадийности воз-

ведения при проектировании высотных зданий и сооружений. Для решения таких задач необходимо выполнять расчеты в нелинейной постановке [11; 12].

© Мкртычев О.В., Андреев М.И., Сидоров Д.С., 2018



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

Список литературы

1. Андреев М.И. Расчет железобетонного здания с учетом генетической нелинейности // Строительство-формирование среды жизнедеятельности: сборник трудов 20-й Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (26–28 апреля, 2017 г., Москва). М.: МГСУ, 2017. С. 235–237.

2. Кабанцев О.В., Тамразян А.Г. Учет изменений расчетной схемы при анализе работы конструкции // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 5. С. 15–26.

3. Кабанцев О.В., Карлин А.В. Расчет несущих конструкций с учетом истории возведения и поэтапного изменения основных параметров расчетной модели // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 7. С. 33–35.

4. Шейн А.И., Завьялова О.Б. Влияние физической нелинейности бетона на напряженно-деформированное состояние элементов монолитных железобетонных рам, рассчитываемых с учетом истории нагружения // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 6. С. 29–31.

5. Барабаш М.С. Методы компьютерного моделирования процессов возведения высотных зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 3. С. 43–46.

6. Барабаш М.С. Обеспечение конструктивной безопасности при проектировании высотных зданий с использованием ПК «ЛИРА-САПР» // Сб. науч. трудов Международного научного семинара, 19–20 сентября 2013 г. Курск, 2013. С. 73–83.

7. Перельмутер А.В., Криксунов Э.З., Карпиловский В.С., Маляренко А.А. Интегрированная система для расчета и проектирования несущих конструкций зданий и сооружений SCAD Office. Новая версия, новые возможности // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 4. С. 10–12.

8. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Петряшев Н.О., Петряшев С.О., Негрозов О.А. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости несущих конструкций высотного здания с учетом фактического положения железобетонных конструкций // Вестник МГСУ. 2015. № 4. С. 50–68.

9. LS-DYNA. Keyword user's manual. Volume I. May 2007. Version 971. Livermore Software Technology Corporation (LSTC). URL: www.dynasupport.com.

10. *Кабанцев О.В.* Верификация расчетной технологии «Монтаж» программного комплекса SCAD // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2011. Vol. 7. Issue 3. P. 103–109.

11. *Mkrtychev O.V., Dzinchvelashvili G.A., Bunov A.A.* Study of lead rubber bearings operation with varying height buildings at earthquake // Procedia Engineering. 2014. Vol. 91. P. 48–53.

12. *Мкртычев О.В., Андреев М.И.* Расчет уникального высотного здания на землетрясения в нелинейной динамической постановке // Вестник МГСУ. 2016. № 6. С. 25–33.

Об авторах

Мкртычев Олег Вартанович – доктор технических наук, профессор кафедры сопротивления материалов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Опубликовал более 150 научных статей, монографий и учебных пособий. *Область научных интересов:* теория надежности строительных конструкций, вероятностные методы расчета, теория сейсмостойкости сооружений, численные методы расчета, нелинейные динамические методы расчета, математическое и численное моделирование работы зданий и сооружений. *Контактная информация:* e-mail – mkrtychev@yandex.ru. SPIN-code 9676-4986.

Андреев Михаил Иванович – аспирант кафедры сопротивления материалов, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Научный руководитель – доктор технических наук, профессор О.В. Мкртычев. *Область научных интересов:* теория надежности строительных конструкций, теория сейсмостойкости сооружений, нелинейные динамические методы расчета. *Контактная информация:* e-mail – misha-andreev_93@mail.ru. SPIN-code 1820-3744.

Сидоров Дмитрий Сергеевич – кандидат технических наук, главный конструктор Научно-исследовательской лаборатории «Надежность и сейсмостойкость сооружений» (НИЛ НСС), Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. *Область научных интересов:* теория надежности строительных конструкций, теория сейсмостойкости сооружений, проектирование и расчеты зданий и сооружений. *Контактная информация:* e-mail – dimacolt@yandex.ru. SPIN-code 6701-9629.

Для цитирования

Мкртычев О.В., Андреев М.И., Сидоров Д.С. Анализ изменения усилий в конструкциях при учете стадийности возведения // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2018. Т. 14. № 4. С. 293–298. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-293-298.

SCIENTIFIC ARTICLE

Stress changing analysis in structures with account of the erection level

Oleg V. Mkrtychev, Mikhail I. Andreev*, Dmitry S. Sidorov

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)
26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

*Corresponding author

(received: March 23, 2018; accepted: June 25, 2018)

Abstract. The article shows the results of computational studies of buildings taking into account and without taking into account the stages of erection. They make it possible to establish the dependence of the parameters of the stress-strain state of the load-bearing structures of a high-rise building during the calculation. The construction process is multi-stage and is strongly associated with the consistency of the work performed on the construction site. When calculating without taking into account the stage of construction in the columns of the upper floors of buildings and constructions, sufficiently large tensile forces may occur, there are characteristic horizontal deviations of the building's axis from the vertical. The sources of distortions may be the irregularity of the rigidities of the building in the plan and the uneven deformation of the base of the structure. This phenomenon is due to the lack of staging of the erection of structures, it is believed that the building is loaded the instantly. The horizontal displacements of the floors below the installation level of the corresponding stage must be compensated, taking them into account when calculating. In this regard, the article discusses the impact of accounting for the stages of construction on the forces arising in the elements of the building. The example of calculation of a high-rise building in the software complex LIRA 9.6 taking into account the stages of construction and step-by-step application of the load on the design model. Modeling of the erection process makes it possible to take into account the uneven precipitation of vertical elements, the displacement of characteristic points (marks) of the structure in the horizontal direction.

Keywords: building construction, calculation model, stage erection, high-rise building, the stress-strain state, genetic nonlinearity, nonlinear calculation methods, the constructive scheme

References

1. Andreev M.I. (2017). Raschet zhelezobetonogo zdaniya s uchetoм geneticheskoy nelinejnosti [Calculation of reinforced concrete building taking into account genetic nonlinearity]. *Stroitel'stvo-formirovanie sredy zhiznedeyatel'nosti. Sbornik trudov 20-j Mezhdunarodnoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii studentov, magistrantov, aspirantov i molodyh uchenyh (26–28 aprelya, Moskva)* [Building-formation of the environment of life. A collection of works of the 20th International Interuniversity Scientific and Practical Conference of students, undergraduates, graduate students and young scientists (26–28 April, Moscow)], 235–237. (In Russ.)
2. Kabancev O.V., Tamrazyan A.G. (2014). Uchet izmenenij raschetnoj skhemy pri analize raboty konstrukcii [Allowing for changes in the calculated scheme during the analysis of structural behaviour]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal [Magazine of Civil Engineering]*, (5), 15–26. (In Russ.)
3. Kabancev O.V., Karlin A.V. (2012). Raschet nesushchih konstrukcij s uchetoм istorii vozvedeniya i poehapnogo izmeneniya osnovnyh parametrov raschetnoj modeli [The calculation load-bearing structures, taking into account the history of erection and construction of phase changes in the basic parameters of the calculation model]. *Industrial and Civil Engineering*, (7), 33–35. (In Russ.)
4. Shein A.I., Zav'yalova O.B. (2012). Vliyaniye fizicheskoy nelinejnosti betona na napryazhenno-deformirovanoe sostoyaniye ehlementov monolitnyh zhelezobetonnyh ram, rasschityvaemyh s uchetoм istorii nagruzheniya [Influence of Physical Nonlinearity of Concrete on Stressed-Strained State of Elements of Monolithic Reinforced Concrete Frames Calculated with Due Regard for Loading History]. *Industrial and Civil Engineering*, (6), 29–31. (In Russ.)
5. Barabash M.S. (2014). Metody komp'yuternogo modelirovaniya processov vozvedeniya vysotnyh zdaniy [Methods of computer simulation of high-rise buildings construction processes]. *Industrial and Civil Engineering*, (3), 43–46. (In Russ.)
6. Barabash M.S. (2013). Obespecheniye konstruktivnoj bezopasnosti pri proektirovaniy vysotnyh zdaniy s ispol'zovaniem PK LIRA-SAPR [Providing constructive safety in the design of high-rise buildings using a PC LIRA-SAPR]. *Sb. nauch. trudov Mezhdunarodnogo nauchnogo seminara, 19–20 sentyabrya [Collection of proceedings of the International Scientific Seminar, September 19–20]*, 73–83. (In Russ.)
7. Perel'muter A.V., Kriksunov Eh.Z., Karpilovskij V.S., Malyarenko A.A. (2009). Integrirovannaya sistema dlya rascheta i proektirovaniya nesushchih konstrukcij zdaniy i sooruzhenij SCAD Office. Novaya versiya, novye vozmozhnosti [The integrated system for calculation and design of load-bearing structures of buildings and structures SCAD Office. New version, new features]. *Magazine of Civil Engineering*, (4), 10–12. (In Russ.)
8. Belostockij A.M., Akimov P.A., Petryashev N.O., Petryashev S.O., Negrozov O.A. (2015). Raschetnye issledovaniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya, prochnosti i ustojchivosti nesushchih konstrukcij vysotnogo zdaniya s uchetoм fakticheskogo polozheniya zhelezobetonnyh konstrukcij [Strength and Stability Analysis of Load-Bearing Structures of a High-Rise Building with Account for Actual Positions of Reinforced Concrete Structural Members]. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*, (4), 50–68. (In Russ.)
9. LS-DYNA. Keyword user's manual. Volume I. May 2007. Version 971. Livermore Software Technology Corporation (LSTC), www.dynasupport.com.
10. Kabancev O.V. (2011). Verifikaciya raschetnoj tekhnologii "Montazh" programmnoгo kompleksa SCAD [Verification of calculation technology "Mounting" from software complex SCAD]. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering (IJSCE)*, 7(3), 103–109. (In Russ.)
11. Mkrtychev O.V., Dzinchvelashvili G.A., Bunov A.A. (2014). Study of lead rubber bearings operation with varying height buildings at earthquake. *Procedia Engineering*, (91) 48–53.
12. Mkrtychev O.V., Andreev M.I. (2016). Raschet unikal'nogo vysotnogo zdaniya na zemletryaseniya v nelinejnoj dinamicheskoy postanovke [Calculation of the Unique High-Rise Building for Earthquakes in Nonlinear Dynamic Formulation]. *Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]*, (6), 25–33. (In Russ.)

About the authors

Oleg V. Mkrtychev – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Strength of Materials Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). He published more than 150 scientific articles, monographs and textbooks. *Research interests*: the theory of reliability of building structures, probabilistic methods of calculation, the theory of seismic stability of structures, numerical methods of calculation, nonlinear dynamic methods of calculation, mathematical and numerical modeling of buildings and structures. *Contact*: e-mail – mkrtychev@yandex.ru. SPIN-code 9676-4986.

Mikhail I. Andreev – Post-Graduate Student of the Strength of Materials Department, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). Scientific Supervisor – Dr Sci. (Eng.), Professor Oleg Mkrtychev. *Research interests*: the theory of reliability of building structures, the theory of seismic stability of structures, nonlinear dynamic methods of calculation. *Contact*: e-mail – misha-andreev_93@mail.ru. SPIN-code 1820-3744.

Dmitry S. Sidorov – Cand. Sci. (Eng.), Chief Designer of the Research Laboratory "Reliability and Seismic Stability of Structures", Moscow State University of Civil Engineering (National Research University). *Research interests*: the theory of reliability of building structures, the theory of seismic resistance of structures, design and calculations of buildings and structures. *Contact*: e-mail – dimacol@yandex.ru. SPIN-code 6701-9629.

For citation

Mkrtychev O.V., Andreev M.I., Sidorov D.S. (2018). Stress changing analysis in structures with account of the erection level. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 14(4), 293–298. DOI: 10.22363/1815-5235-2018-14-4-293-298. (In Russ.)