

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ

**НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ**

МИНИСТЕРСТВО
РЕГИОНАЛЬНОГО
РАЗВИТИЯ
РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ОАО
«НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

5
2014



СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 1 января 1959 г.
Выходит один раз в два месяца

Учредитель: ОАО «НИЦ «Строительство»

МОСКВА. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко

5⁽²⁵⁶⁾
2014

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор
ВЕДЯКОВ И.И. проф., д.т.н.

АББАСОВ П.А.

чл.корр. РААСН, проф., д.т.н.

АЙЗЕНБЕРГ Я.М. проф., д.т.н.

АНДРЕЕВ В.И.

чл.корр. РААСН, проф., д.т.н.

БОНДАРЕНКО В.М.

акад. РААСН, проф., д.т.н.

ВАРДАНЯН Г.С. проф., д.т.н.

ГОРОДЕЦКИЙ А.С.

акад. РААСН, проф., д.т.н.

ЕГОРЫЧЕВ О.О. проф., д.т.н.

ЕРЕМЕЕВ П.Г. проф., д.т.н.

ИГНАТЬЕВ В.А. проф., д.т.н.

ИЛЬЧИЧЕВ В.А. акад. РААСН,

проф., д.т.н.

КАРПЕНКО Н.И.

акад. РААСН, проф., д.т.н.

КОЛЧУНОВ В.И.

акад. РААСН, проф., д.т.н.

КОСИЦЫН С.Б. проф., д.т.н.

КУРБАЦКИЙ Е.Н. проф., д.т.н.

ЛЯХОВИЧ Л.С.

акад. РААСН, проф., д.т.н.

МОНДРУС В.Л. проф., д.т.н.

НАЗАРОВ Ю.П. д.т.н.

НЕМЧИНОВ Ю.И. проф., д.т.н.

ОБОЗОВ В.И. проф., д.т.н.

ОДЕССКИЙ П.Д. проф., д.т.н.

ПЯТИКРЕСТОВСКИЙ К.П.

(отв. секретарь) д.т.н., с.н.с

РАЙЗЕР В.Д. проф., д.т.н.

РАСТОРГУЕВ Б.С. проф., д.т.н.

ТРАВУШ В.И. акад. РААСН, проф., д.т.н.

ФЕДОРОВ В.С. акад. РААСН, проф., д.т.н.

ХАЧИЯН Э.Е. проф., д.т.н.

ЧИРКОВ В.П. проф., д.т.н.

ШАПОШНИКОВ Н.Н.

чл.корр. РААСН, проф., д.т.н.

Редактор выпуска *Пятикрестовский К.П.*

Корректор *Козлова М.В.*

Компьютерная верстка *Севастьянова М.Г.*

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ №ФС77-19167 от 27 декабря 2004 г.

Адрес редакции:

109428, Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6, стр. 1

Тел.: 8-499-170-10-81; 8-499-174-79-93

E-mail: stroymex@list.ru, stroymexrs@gmail.com

www.stroy-mex.narod.ru

http://elibrary.ru/TITLE_ABOUT.ASP?ID=26727

Подписано в печать 12.09.2014. Формат 70×108 1/16

Бумага офсетная. Офсетная печать. Тираж 500 экз.

Заказ №

Отпечатано в

ООО «Первая оперативная типография»

115114, Москва, 2-й Кожевнический пер., д. 12

Перепечатка материалов журнала

«Строительная механика и расчет сооружений»

допускается только с письменного разрешения редакции.

При цитировании ссылка обязательна.

Представленные заказчиками готовые формы рекламных материалов не подвергаются редакторской правке и печатаются в оригинале.

А.С. ГОРОДЕЦКИЙ, д-р техн. наук, проф., М.С. БАРАБАШ, канд. техн. наук, доц.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВОЗВЕДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассматривается методика учета изменяющейся во времени конструктивной схемы в процессе возведения сооружения. Демонстрируются нелинейные эффекты этой ситуации. Рассматривается влияние процесса возведения на усилия, возникающие в элементах каркасного здания с монолитным ядром жесткости. Цель теоретических исследований состоит в установлении влияния процесса возведения на напряженно-деформированное состояние несущих систем зданий и сооружений. Приводятся примеры моделирования процесса возведения высотного здания и уникальных конструкций методом top-down.

Ключевые слова: моделирование, жизненный цикл, процесс возведения, несущая система, нелинейность.

Для современных сложных сооружений (мосты, большепролетные покрытия, высотные здания, ограждения глубоких котлованов и др.), как правило, напряженно-деформированная схема обуславливается не только эксплуатационной стадией, но и стадией возведения. В процессе возведения конструктивная схема сооружения может многократно изменяться, усилия и перемещения «замораживаться», зачастую определяя сечения элементов и конструкции узлов именно на этой стадии.

В процессе возведения случаются различные события, определяющие дальнейшую судьбу сооружения: установка или удаление элементов; введение или снятие внешних или внутренних связей; приложение или снятие нагрузок; изменение жесткостных характеристик уже установленных элементов (при возведении железобетонных конструкций, как правило, опалубка снимается значительно раньше достижения бетоном проектной прочности и бетон добирает прочность во время возведения).

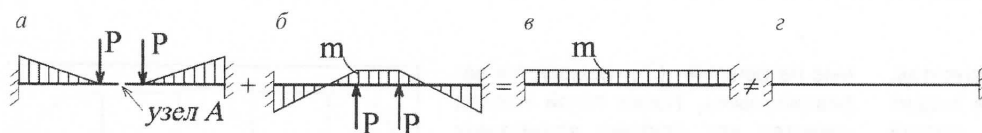


Рис. 1. Наличие дислокационных усилий в ненагруженной конструкции

Окончательная схема возведенной конструкции помнит историю возведения и, как правило, в ней имеются дислокационные усилия и напряжения, которые отсутствовали бы, если конструкция была рассчитана как для созданной одномоментно.

Простейший пример демонстрирует это явление (рис. 1).

На рис. 1, а приведена эпюра моментов для стадии возведения, когда в узле А не выполнено замыкание и приложена нагрузка P . На рис. 1, б приведена эпюра моментов, когда в узле А выполнено замыкание и приложена нагрузка P в обратном направлении (в программных комплексах удаление нагрузки и элементов реализуется приложением соответствующей нагрузки или усилия в обратном направлении). На рис. 1, в приведены дислокационные усилия в возведенной конструкции. В одномоментно возведенной конструкции эти усилия отсутствовали бы (рис. 1, г).

Знак неравенства между эпюрами усилий на рис. 1, в, г свидетельствует, что принцип суперпозиции (с некоторой натяжкой) нарушен и это первый признак нелинейной задачи. Такая нелинейность тяготеет к конструктивной нелинейности. В некоторых источниках предлагается идентифицировать ее как генетическую нелинейность, подчеркивая, что она связана с историей возведения, хотя в этом случае лучше подходит термин «родословная нелинейность».

Методика, позволяющая производить расчеты с учетом последовательности возведения, основывается на модификации и усовершенствовании метода последовательных нагружений. Метод последовательных нагружений является одной из разновидностей шагового метода.

Система нелинейных уравнений, описывающих нелинейную задачу, выглядит следующим образом:

$$Au = f, \tag{1}$$

где A – нелинейный оператор задачи; u – вектор искомых перемещений; f – вектор внешних нагрузок.

Идея шагового метода заключается в замене нелинейных уравнений (1) рекуррентной последовательностью линейных, которые на m шаге имеют вид

$$A_m \Delta u_{m+1} = \Delta t_{m+1} f; u_{m+1} = u_m + \Delta u_{m+1}, \tag{2}$$

где A_m – линейный оператор, в развернутом виде имеющий вид:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_1}{\partial u_1} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_1}{\partial u_j} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_1}{\partial u_n} |_{u_m} \\ \frac{\partial \psi_l}{\partial u_1} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_l}{\partial u_j} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_l}{\partial u_n} |_{u_m} \\ \frac{\partial \psi_n}{\partial u_1} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_n}{\partial u_j} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_n}{\partial u_n} |_{u_m} \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Здесь $\psi_l (l=1,2,...,n)$ – нелинейные операторы, т.е. l уравнение системы $Au = f$ выглядит как $\psi_l(u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_n) = P_l$; t – параметр нагрузки.

Суть модификации метода заключается в том, что параметр t вводится к нагрузке P . При $t = 0$ легко определяется начальное решение u_0 , при $t = 1$ система превращается в исходную. Последовательно изменяя t от 0 до 1, находится приближенное решение.

Вычислительная схема на каждом шаге получается из следующих соображений: введем гипотезу, что на m этапе $t = t_m$ известно решение, т.е.

$$Au_m = t_m f. \tag{4}$$

Изменим t_m на величину Δt_{m+1} так, чтобы $t_{m+1} = t_m + \Delta t_{m+1}$ была ближе к единице, чем t_m . Тогда,

$$A(u_m + \Delta u_{m+1}) = (t_m + \Delta t_{m+1}) f. \tag{5}$$

Разложим левую часть (4) в ряд Тейлора, тогда:

$$Au_m + \sum_{i=1}^k \frac{1}{i!} \left(\frac{\partial^i}{\partial u^i} A \right) |_{u_m} \Delta u_{m+1}^i + R_k = t_m f + \Delta t_{m+1} f. \tag{6}$$

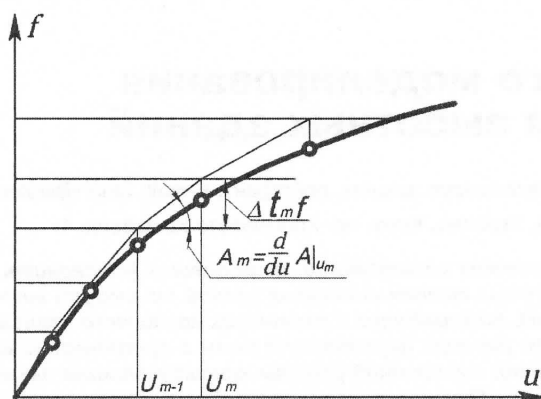


Рис. 2. Геометрическая интерпретация метода последовательных нагружений

Пренебрегая квадратами и высшими степенями Δu_{m+1} (величина Δt должна допускать эту процедуру) и с учетом (4) получим линеаризованную систему для нахождения Δu_{m+1} , т.е.

$$A_m \Delta u_{m+1} = \Delta t_{m+1} f, \quad u_{m+1} = u_m + \Delta u_{m+1}. \quad (7)$$

где A_m – линейный оператор ($1 A_m = \frac{d}{du} A|_{u_m}$).

Напряжения определяются по формуле, аналогичной (7):

$$\{\sigma\}_{m+1} = \{\sigma\}_m + \{\Delta\sigma\}_m. \quad (8)$$

В физическом смысле этот процесс можно трактовать как постепенное увеличение нагрузки, начинающееся от 0 и заканчивающееся заданным f .

Для одномерного случая возможна геометрическая интерпретация метода (рис. 2).

Линеаризованный оператор A_m соответствует касательным жесткостным характеристикам,

т.е. $A_m = \frac{d}{du} A|_{u_m}$.

При моделировании процесса возведения разрешающие уравнения составляются не только с учетом физически нелинейных свойств материала, но и с учетом изменения топологии конструкции, так как на m этапе расчета (m стадии возведения) учитывается появление новых элементов или удаление введенных на предыдущих этапах.

Характерная организация численного моделирования процесса возведения конструкций зданий реализована в программном комплексе ЛИРА–САПР. Здесь, кроме учета изменяющейся конструктивной схемы несущих конструкций, учитываются процессы снятия и установки стоек опалубки, приложения и снятия монтажных нагрузок, возможной временной пониженной прочности и жесткости бетона, обусловленной временным недобором 28-дневной прочности бетонной смеси или ее временным замерзанием.

Кроме основного метода решения задачи – метода последовательных нагружений, используется также метод компенсирующих нагрузок, если в процессе возведения необходимо учитывать эффект односторонних связей, и метод последовательных жесткостей, если эффекты ползучести в процессе возведения существенны.

Обобщенный алгоритм приведен на рис. 3. Вначале задается конструктивная схема всего объекта. В нее включаются все элементы, как основные несущие элементы объекта (колонны, балки, плиты, диафрагмы), так и временные элементы (элементы опалубки, стойки подмостей и др.). Затем, для каждого этапа возведения описываются все конструктивные элементы, которые возведены или удалены на момент данного этапа. Это могут быть временные стойки подмостей, распорки, подпорки и др. Далее определяется количество стадий возведения, и для каждой стадии возведения задаются нагрузки (собственный вес, монтажные нагрузки), которые действуют на данной стадии, а при необходимости – понижающий коэффициент прочности бетона. Затем непосредственно формируются стадии с указанием элементов, нагрузок на каждой стадии и выполняется расчет с учетом запоминания и хранения истории нагружения и НДС на каждой стадии возведения с дальнейшим выбором наиболее неблагоприятного НДС для каждого сечения элементов конструкций.

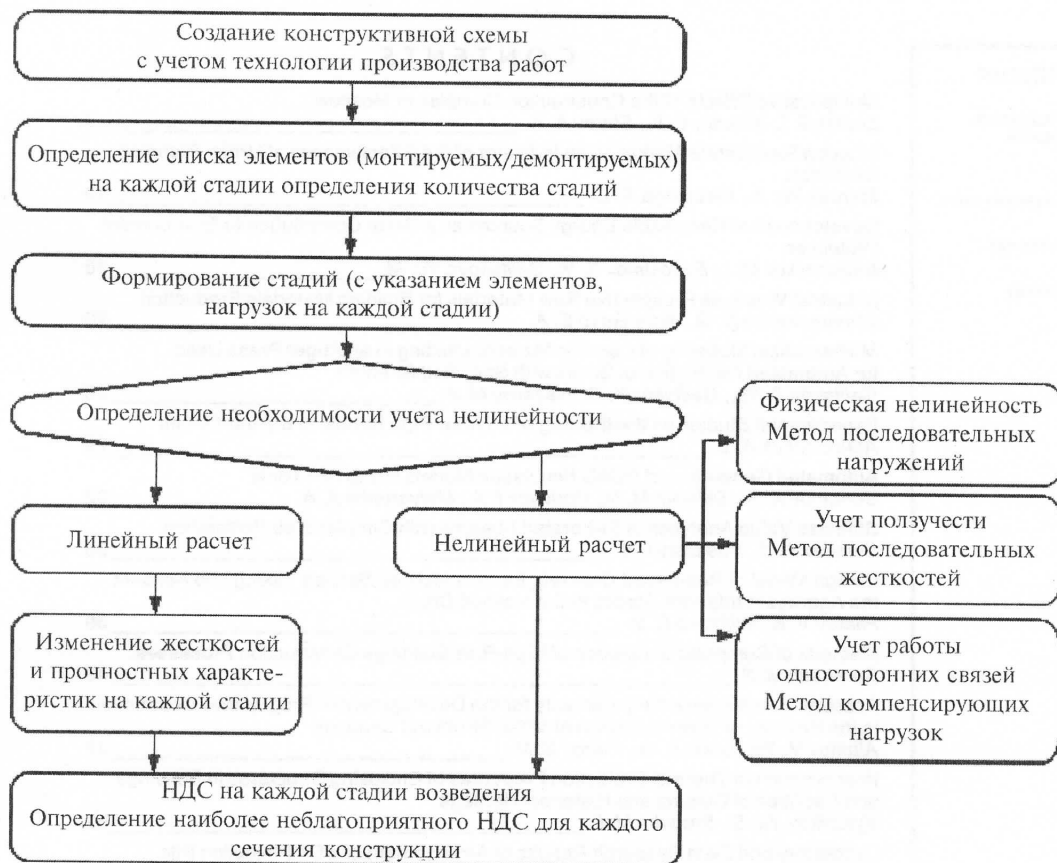


Рис. 3. Алгоритм расчета с учетом процесса возведения

Исходные данные для последнего этапа возведения соответствуют эксплуатационной стадии объекта, т.е. той стадии, когда объект полностью возведен, убраны временные опоры (стойки подмостей), набрана эксплуатационная прочность бетона, действуют эксплуатационные нагрузки (собственный вес, ветер, снег, полезные нагрузки).

На каждом этапе возведения объекта происходит расчет соответствующей конструктивной схемы на собственный вес и монтажные нагрузки с учетом имеющихся, снятых или добавленных элементов, связей, нагрузок.

Приведенная методика апробирована на ряде тестовых примеров и реальных зданий и сооружений. В [1,4] достаточно подробно описано моделирование большепролетного покрытия в виде стальной мембраны толщиной 6 мм, пролетом 210×160 м, где рассматриваются следующие этапы возведения: возведение колонн, временных распорок и бортового элемента; монтаж поперечной и продольной постели; монтаж мембраны; стягивание бортового элемента канатами, уложенными поверх мембраны.

На примере компьютерного моделирования возведения конструкций высотного здания из монолитного железобетона демонстрируются эффекты различия НДС перекрытий и вертикальных элементов для схемы созданной одномоментно и для схемы учитывающей последовательность возведения. При расчете здания по традиционной схеме, нагрузка от собственного веса конструкций прикладывается одномоментно, в результате чего напряженно-деформированное состояние несущих конструкций может не соответствовать реальной их работе. При возведении таких зданий нагрузка от собственного веса возникает постепенно, по мере возведения здания, соответственно, и прикладываться к расчетной модели эта нагрузка должна поэтапно, по стадийно, по мере ее возникновения.

Этот факт проявляется особенно в монолитных железобетонных зданиях [1—3]. Дело в том, что при возведении каждого этажа опалубка выставляется таким образом, чтобы верхняя поверхность бетонируемого перекрытия получилась горизонтальной. По существу корректируется проектная длина колонн, которые наращиваются на величину просадки уже возведенной части

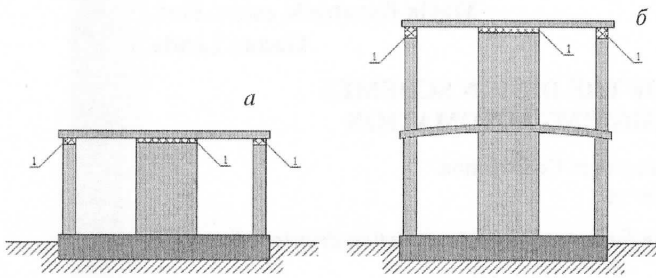
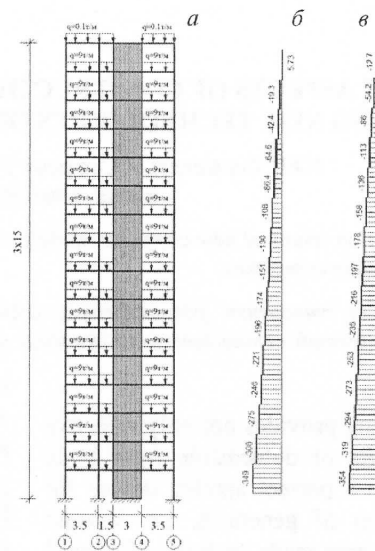


Рис. 4. Возведение монолитного здания: *a* — первая стадия монтажа; *б* — вторая стадия монтажа; *I* — наращиваемая часть колонн, диафрагмы

Рис. 5. Расчетная схема и результаты расчета многоэтажного здания по различным схемам: *a* — расчетная схема; *б* — эпюры усилий колонны по оси 2 без учета монтажа; *в* — эпюры усилий колонны по оси 2 с учетом монтажа



здания (рис. 4). Корректировка геометрии реализуется постепенно по мере возведения сооружения и передачи на него соответствующей части собственного веса. Учет процесса возведения показывает насколько меньше перемещения вертикальных элементов, что объясняется моделированием выборки зазоров.

К чему приводит учет этого обстоятельства, можно показать на примере расчета здания, расчетная схема которого показана на рис. 5. Здание имеет несимметрично расположенное ядро же-

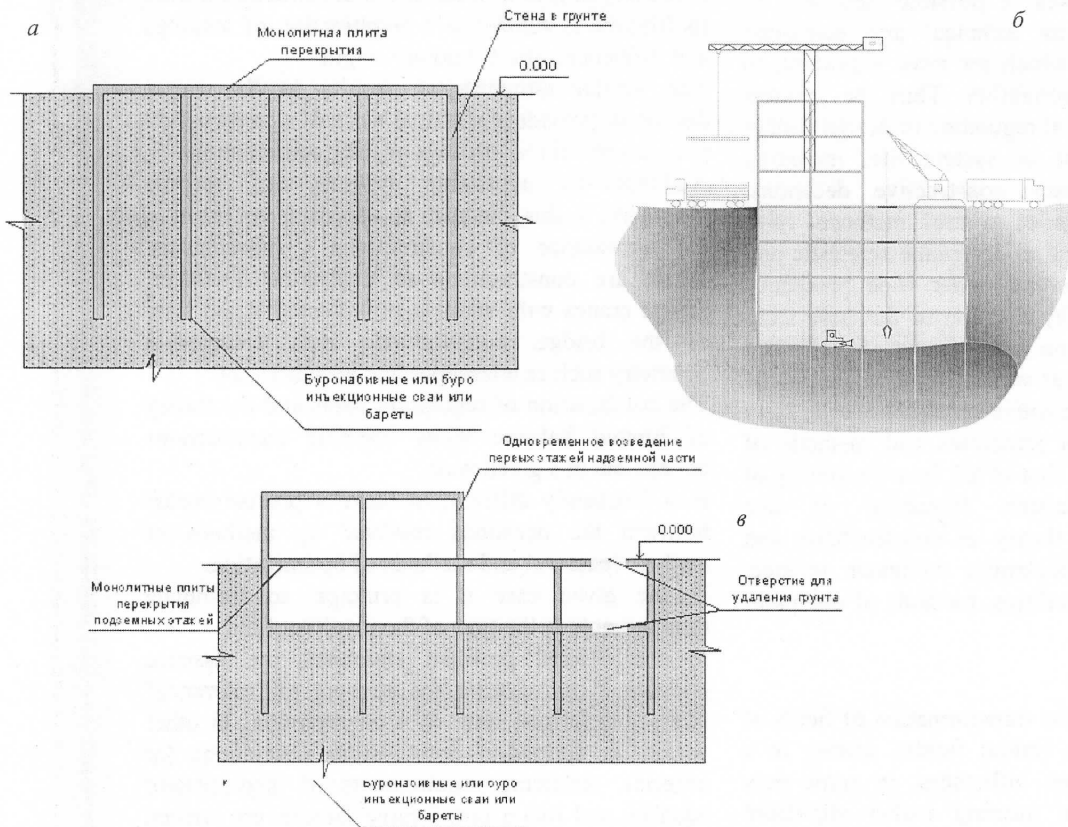


Рис. 6. Последовательность возведения здания с многоуровневой подземной частью: *a* — начальная стадия монтажа; *б* — этап последовательного возведения подземных и наземных этажей; *в* — схема возведения

сткости и диафрагменные стены в верхнем ярусе, перекрытия загружены равномерной распределенной нагрузкой. При традиционном подходе, когда нагрузки прикладываются к расчетной схеме одномоментно возникает растягивающее усилие в верхней колонне по оси 2 (эффект подвешенной колонны) (рис. 5, б). Если же вести расчет с учетом последовательности возведения и приложения нагрузок, то усилия в колонне по оси 2 получают значения, показанные на рис. 5, в. Никакого растяжения здесь нет, и картина распределения усилий представляется более адекватной. Такая разница в НДС может приводить к неправильному конструированию.

Различные способы возведения связаны с необходимостью учета различных эффектов. Так, при использовании метода top-down, что характерно для глубоких котлованов — 3-6 и более этажей последовательность возведения такова (рис. 6):

— устройство стены в грунте и свайного основания (для глубоких котлованов, как правило, применяются баретты);

— устройство плиты на отметке 0.000;

— экскавация котлована для устройства первого подземного этажа;

— устройство плиты на уровне пола первого подземного этажа

— дальнейшее последовательное возведение подземных и надземных этажей.

Такой способ возведения включает многочисленные стадии, которые влияют на НДС возводимой конструкции на протяжении всего жизненного цикла. Это, прежде всего, изменение давления грунта по мере экскавации грунта при последовательном устройстве подземных этажей; работа плит перекрытий подземных этажей на усилия сжатия, которые меняются по мере заглубления конструкции; изменение усилий в элементах по мере возведения надземной части и др.

Компьютерное моделирование процесса возведения такого уникального сооружения включает большое количество различных этапов. Начиная с предварительного этапа — определение НДС грунтового массива с включением конструкций стен в грунте и баррет, включая этапы одновременного устройства одного подземного этажа и нескольких надземных и заканчивая этапами устройства верхних этажей. Полный расчетный анализ безопасности выполняется раздельно для всех этапов строительства.

Выводы

Необходимость компьютерного моделирования процесса возведения конструкций очевидна. Моделирование процесса возведения в ряде случаев обнаруживает значительные отличия от результатов расчета в предположении, что конструкция создана одномоментно, а в ряде случаев предоставляет важную информацию для организации возведения в натуре.

Литература

1. *Городецкий А.С.* Компьютерное моделирование процесса возведения строительных конструкций. Сборник научных трудов Луганского национального университета, серия «Технические науки». —Л.: Изд-во «ЛНАУ», 2007, с. 3–9.
2. *Городецкий А.С., Городецкий Д.А., Юсипенко С.В.* Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона. — Киев: «Факт», 2004. — 105 с.
3. *Барабаш М. С.* Методы компьютерного моделирования процессов возведения высотных зданий / М. С. Барабаш // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. — М.: Изд-во «АСВ», 2012. — Vol. 8, Issue 3 — С. 58–68.
4. *Барабаш М.С.* Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: Монография / Мария Сергеевна Барабаш — К.: Изд-во «Сталь», 2014. — 301 с.