

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА КОНСТРУКЦИЙ ВЫСОТНЫХ И УНИКАЛЬНЫХ ЗДАНИЙ

Барабаш М.С.

**Введение.** Несущие конструкции зданий и сооружений возводятся и эксплуатируются в непрерывно меняющихся условиях. Целью доклада является рассмотрение проблемы конструкционной безопасности зданий и сооружений на основе создания комплекса научно-обоснованных методов численного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций с учетом стадий их жизненного цикла и развития методов расчета конструкций с учетом нелинейного деформирования. Проблема особенно актуальна при проектировании и расчете высотных и уникальных зданий.

Численное моделирование временных процессов (процессы нагружения и возведения, реологические процессы, приспособляемость конструкций) позволяют определить напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкций близкое к реальному/фактическому и на всех стадиях жизненного цикла строительного объекта.

При компьютерном моделировании высотных зданий разного уровня сложности есть возможность учитывать следующие аспекты [1-3]:

- пространственная работа здания (совместная работа всех несущих конструкций);
- учет работы системы «здание – фундамент – основание»;
- учет процесса возведения;
- приспособляемость конструкции для восприятия запроектных воздействий (прогрессирующее разрушение).

Одним из основных направлений проектирования конструкций зданий и сооружений, соответствующих современным требованиям повышения уровня надежности, безопасности, живучести при снижении материалоемкости, является численное моделирование. Причем, важное значение принимает именно численное моделирование процессов жизненного цикла, связанных с изменением напряженно-деформированного состояния (НДС) на всех стадиях существования строительного объекта.

Необходимость полноценного численного анализа зданий и сооружений диктуется: усложнением конструктивных решений и условий эксплуатации (многомерность, комплексность и многофункциональность зданий и сооружений, их внушительные габариты, исключительная сложность мониторинга по текущему техническому состоянию, невозможность их ремонта без полного исключения нагрузок, склонность к изменению объемно - планировочных решений и режимов нагрузки в ходе эксплуатации); уникальностью (грунтовые, климатические и другие внешние условия, неповторимая сложность и продолжительность возведения и эксплуатации, повышенная роль «человеческого фактора» на всех стадиях жизненного цикла); а также неполнотой и неопределенностью исходных данных (по геометрии, жесткости, предельным и начальным условиям, нагрузкам и воздействиям)

Между тем, все перечисленные факторы не в полной мере учитываются в существующих нормативных документах и в практике проектирования и строительства, что приводит либо к недостаточной надежности конструкций, либо к излишнему расходу материалов.

**Учет изменения напряженно-деформированного состояния конструкций (НДС) на всех стадиях жизненного цикла.** Существующие подходы при проектировании и мониторинге существующих зданий, как правило, ориентированы на определенную стадию жизненного цикла и не учитывают истории, связывающей все стадии жизненного цикла. Таким образом, создание технологии моделирования, отслеживающей изменение НДС конструкций на всех стадиях жизненного цикла, и учитывающей на каждой последующей стадии состояние конструкции на предыдущей стадии является актуальной задачей.

Целью исследований является решение проблемы конструкционной безопасности зданий и сооружений на основе создания комплекса научно-обоснованных методов численного моделирования напряженно-деформированного состояния конструкций с учетом стадий их жизненного цикла и развития методов расчета конструкций с учетом нелинейного деформирования. Численное моделирование процессов жизненного цикла позволяет поставить и решить задачи, которые невозможно решить физическим экспериментом.

Внедрение в практику проектирования конструкций учета процессов изменения НДС на всех этапах жизненного цикла дает возможность уже на стадии проектирования выполнить достоверную оценку НДС, и провести многовариантные численные эксперименты.

На рис.1 приведена схема жизненного цикла строительного объекта.



**Рисунок1 – Схема жизненного цикла строительного объекта**

На этой схеме отдельно выделена стадия анализа напряженно-деформированного состояния конструкции (область наших интересов, как разработчиков программного обеспечения (ПО) для расчета). Однако, стоит отметить, что оценка НДС сооружения и расчет несущих конструкций производится и на других

стадиях (или с учетом других стадий). Причем, основные стадии жизненного цикла строительного объекта, такие как проектирование, возведение, эксплуатация и утилизация, подразделяются, в свою очередь, на этапы, на каждом из которых могут происходить проектные изменения, приводящие к изменению НДС.

1 – на стадии «Эскизный проект» выполняется проверка и сравнение архитектурных и конструктивных решений – выбор рационального варианта;

2 – на стадии «Проект» выполняется многократный учет вносимых в проект изменений (например – перенос несущих элементов, прорезание отверстий и т.п.);

3 – на стадии «Создание рабочей документации», выполняется подбор и проверка площади арматуры и стальных сечений в соответствии с действующими нормами;

4, 5, 6 – стадии изготовления, транспортировки и монтажа, на которых выполняется проверка несущей способности конструктивных элементов и конструктивной системы в целом;

7 – стадия эксплуатации является наиболее длительной стадией жизненного цикла строительного объекта. На этой стадии могут возникать различные ситуации, в том числе и не предусмотренные проектом, например изменение функционального назначения помещений, локальные перепланировки, аварийные ситуации, старение материалов и т.п.;

8 – реконструкция объекта, как начало его второй жизни, переносит нас в начало цикла, но уже с необходимостью оценки остаточного ресурса несущей способности и накопленных напряжений и перемещений:

9 – утилизация. Важная стадия, поскольку при принятии решения о невозможности дальнейшей эксплуатации строительного объекта и невозможности его реконструкции или реновации, необходимо выполнить утилизацию с исключением повреждения близлежащих объектов. Для этого, безусловно, необходимо оценить остаточную несущую способность конструкций и принять решение по технологии демонтажа конструкций.

Таким образом, анализ работы несущих конструкций охватывает всё время существования строительного объекта.

Подход к определению НДС на каждой стадии может быть разным, например:

- на стадии эскиза выполняются расчеты по упрощенным моделям для быстрого получения общего представления о работе конструкции (основные: осадки, усилия, частотные характеристики);

- на стадии детального анализа, проектирования с целью выдачи проектной документации выполняется учет всех возможных воздействий и факторов, влияющих на НДС конструкции на всех стадиях жизненного цикла, т.е. учет процесса возведения, учет возможных ситуаций на стадии эксплуатации, учет недопущения прогрессирующего разрушения и т.п.

Предлагаются разработанные численные методы, позволяющие осуществлять моделирование процесса всего жизненного цикла зданий и сооружений, включая стадии возведения, реологические процессы на стадии эксплуатации, процесс приспособляемости конструктивной системы к изменяющимся нагрузкам в случае форс-мажорных ситуаций.

Структурно-логическая схема жизненного цикла строительного объекта с точки зрения анализа НДС несущей системы представлена на рис.2.

Расчёт здания в рамках проектирования представляет собой многоуровневый процесс принятия решений, его обычно проводят по следующей схеме [2,4]:

- анализ конструктивной схемы здания с целью выявления взаимосвязи элементов конструкции и выбора расчётных моделей, наиболее адекватно отображающих работу здания в известном интервале вариации нагрузок;

- выбор упрощенной расчетной схемы и расчёты в соответствии с этой расчётной схемой с целью предварительного определения напряженно-деформированного состояния конструктивной системы в целом;

- уточнение принятой на предыдущем этапе расчётной модели надземной части здания, а также фундамента, определение упрощенных расчетных моделей грунтового основания;

- расчёт здания по уточненной расчетной модели на статические нагрузки, а также ветровые воздействия с учётом пульсации ветра. В расчёте учитывается влияние податливости основания на собственные частоты колебаний здания, последние влияют на результаты расчётов на ветровые нагрузки с учётом пульсаций.

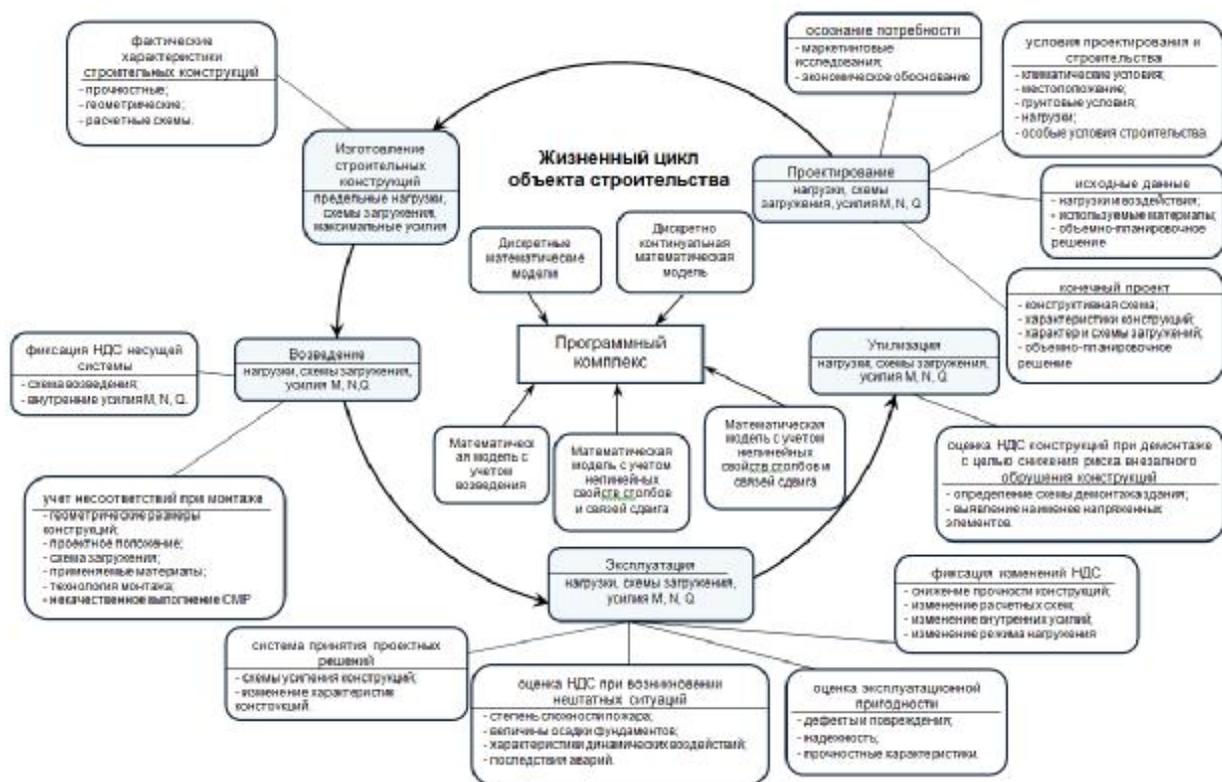
- окончательная корректировка по результатам расчётов геометрических и прочностных характеристик элементов здания (колонн, балок, диафрагм жёсткости, ядер жёсткости, фундамента);

- определение осадок и крена фундамента с учетом физической нелинейности, неоднородности и реологических свойств грунтов основания. Это наиболее ответственная часть оценки принятых на предыдущих этапах конструктивных решений. Говоря о крене здания, следует отметить, что предельные горизонтальные перемещения верхней части здания (с учётом крена фундамента) при расчёте по недеформированной схеме в зависимости от высоты здания  $h$  не должны превышать следующих величин [2,3]: при высотах здания до  $h = 150$  м -  $1/500$ ; при высотах до  $h = 400$  м -  $1/1000$ .

- расчет устойчивости здания на опрокидывание и сдвиг. При расчете устойчивости здания на опрокидывание и сдвиг его конструктивную схему можно рассматривать как жесткое недеформируемое тело, опирающееся на грунтовое основание.

Стадией, формирующей НДС, является стадия возведения. Конструктивная схема строительного объекта изменяется в зависимости от последовательности возведения, что обуславливает изменение конструктивной и расчетной схемы здания, и его НДС во времени. В процессе возведения конструктивная схема сооружения может многократно изменяться, усилия и перемещения «замораживаться», определяя сечения элементов и конструкции узлов именно на этой стадии.

При возведении монолитных железобетонных конструкций важным эффектом, который необходимо учитывать при численном моделировании, являются нелинейные свойства бетона, т.е. изменение жесткостных характеристик в процессе нагружения (ползучесть, трещины) [2,3,4].



**Рисунок 2 – Структурно-логическая схема жизненного цикла строительного объекта с точки зрения оценки несущей способности сооружения и её отдельных элементов**

Кроме того, в процессе монтажа переход к новой стадии часто осуществляется, когда возведенная на предыдущих стадиях конструкция еще не набрала проектной 28-дневной прочности. Это также обуславливает необходимость учета нелинейных эффектов, так как от стадии к стадии меняется жесткость возводимых элементов, в соответствии с временем их возведения. Численное моделирование процесса возведения представляется нелинейной задачей, даже если не учитывать эффекты, связанные с нелинейными свойствами бетона. В процессе возведения проявляется генетическая нелинейность, обусловленная изменением конструктивной схемы. Такая нелинейность вызвана тем, что НДС мгновенно возведенной конструкции не эквивалентно НДС конструкции, полученной на основе учета всей истории возведения (изменение расчетной схемы, возникновение и снятие монтажных опор и т.д.)

Кроме того, в процессе монтажа переход к новой стадии часто осуществляется, когда возведенная на предыдущих стадиях конструкция еще не набрала проектной 28-дневной прочности. Это также обуславливает необходимость учета нелинейных эффектов, так как от стадии к стадии меняется жесткость возводимых элементов, в соответствии с временем их возведения. Численное моделирование процесса возведения представляется нелинейной задачей, даже если не учитывать эффекты, связанные с нелинейными свойствами бетона. В процессе возведения проявляется генетическая нелинейность, обусловленная изменением конструктивной схемы. Такая нелинейность вызвана тем, что НДС мгновенно возведенной конструкции не эквивалентно НДС конструкции, полученной на основе учета всей истории возведения (изменение расчетной схемы, возникновение и снятие монтажных опор и т.д.)

Предлагается следующий алгоритм учета стадий последовательного возведения. Разбивается сооружение на  $n$  стадий (этажей), согласно используемой технологии возведения. Первоначально считается возведенным первая стадия (этаж), производится расчет его напряженно-деформированного состояния в линейно-упругой постановке с начальным модулем  $E_0$ . Далее предполагаем возведенными две стадии. Снова рассчитываем напряженно-деформированное состояние, но теперь учитываем нагрузки, возникшие во второй стадии. При этом, формируя матрицу жесткости второй стадии, воспользуемся значениями касательных модулей упругости, полученными из расчета методом последовательных нагружений для предыдущего этапа возведения сооружений  $E_s$  и  $\nu_s$ , а для первой стадии (ранее возведенной) – значениями  $E_0$  и  $\nu_0$ . При этом, в возведенной стадии вычисляются касательные модули упругости и коэффициенты Пуассона. Аналогично поступаем, когда считаем возведенными 3, 4, ...,  $n$  стадии, до тех пор, пока расчет не будет охватывать всего сооружения. Компоненты напряжений и перемещений, полученные от воздействия нагрузок на каждой стадии, суммируются.

Описанные методики реализованы в программном комплексе ЛИР А-САПР.

К процессам жизненного цикла, происходящим в эксплуатационной стадии, прежде всего относятся реологические процессы изменения НДС конструкции при длительной нагрузке, связанные с ползучестью и изменением свойств бетона во времени.

Технология расчета конструкций с учетом ползучести бетона выглядит следующим образом:

- выполняется расчет в линейной постановке на все виды нагружений (статические, силовые, статические деформационные, динамические);
- определяются расчетные сочетания усилий или расчетные сочетания нагружений;
- выполняется подбор арматуры в сечениях стержневых или пластинчатых элементов;
- производится унификация армирования элементов;
- по результатам армирования формируются новые жесткостные характеристики конструктивных элементов для последующего нелинейного расчета;
- задаются параметры ползучести бетона, учитывающие влажность и усадку бетона;
- назначается нагружение, на которое будет производиться расчет с учетом ползучести бетона;
- выполняется расчет для заданных промежутков времени. На каждом этапе расчета для каждого элемента определяется новая жесткость, которая зависит от напряжения бетона в этом элементе и заданных параметров ползучести. Новые переменные жесткости получаются в точках интегрирования как по сечению, так и по конечному элементу, в соответствии с заданной диаграммой деформирования. На каждом этапе определяются усилия, перемещения и новые жесткости по касательному модулю деформации для заданного промежутка времени.

Моделирование процесса старения бетона, по сути, является нелинейной задачей, обусловленной учетом свойств материала (физическая нелинейность). Решение этой задачи в ПК ЛИРА САПР основана на основных методах теории прочности бетона, которые в физическом смысле представляют собой реализацию законов нелинейного деформирования материалов по различным теориям.

В физически нелинейных задачах отсутствует линейная зависимость между напряжениями и деформациями [1,5,6]. Материал конструкции подчиняется нелинейному закону деформирования (нелинейная упругость). Моделирование физической нелинейности (нелинейной упругости) материалов конструкций производится с помощью физически нелинейных конечных элементов, воспринимающих информацию из развитой библиотеки законов деформирования материалов (зависимостей  $\sigma$ – $\epsilon$ ). Библиотека законов деформирования позволяет учитывать практически любые нелинейные свойства материала. Существует несколько методов для решения нелинейных задач различных типов: шаговый метод, метод секущих, итерационный метод.

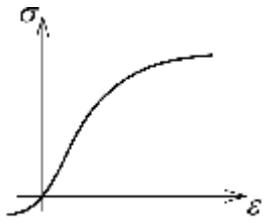
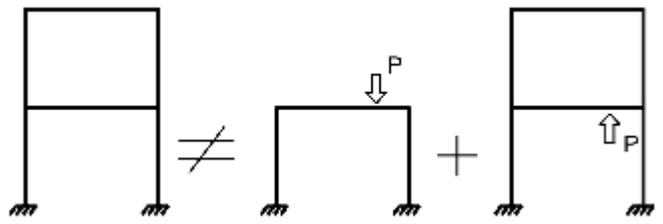
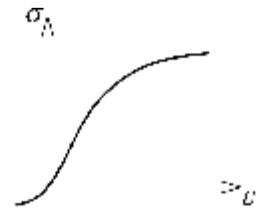
Приведена классификация процессов (табл. 1), влияющих на формирование (изменение) НДС конструкций зданий и сооружений на протяжении его жизненного цикла и обосновывается применение методов теории упругости, позволяющих их учесть на основополагающей стадии – стадии проектирования.

Таблица 1

Процессы жизненного цикла	Описание	Тип нелинейности
Процесс нагружения	Для железобетонных конструкций имеется возможность проследить начальные стадии линейно-упругой работы конструкции, стадии последовательного развития трещин в бетоне и растянутой арматуре, стадии, непосредственно предшествующие разрушению	Физическая, геометрическая, конструктивная
Процесс возведения	НДС определяется для всех последовательно сменяющихся конструктивных схем, соответствующих этапам возведения и модель сводной конструкции «хранит память» об истории возведения	Генетическая, физическая, конструктивная
Процессы эксплуатационной стадии	Моделирование реологических процессов изменения НДС конструкции при длительной нагрузке, связанных с ползучестью и изменением свойств во времени	Физическая, геометрическая
Процессы за проектных воздействий	Моделирование процессов «приспособляемости» конструкции при «форс-мажорных» аварийных ситуациях, когда при внезапном выходе из строя одного или нескольких элементов конструкция пытается приспособиться к новой ситуации, изменив (иногда за счет потери эксплуатационных качеств) свою первоначальную конструктивную схему, не допустив обрушения всего сооружения	Физическая, геометрическая
Процессы динамических воздействий	Моделирование во времени динамического воздействия (на основе метода прямого интегрирования) дает возможность проследить включение и выключение односторонних связей, открытия и закрытия трещин, и многие другие эффекты	Нелинейная динамика

Важной особенностью реальных материалов является нелинейный характер зависимости между напряжением и деформацией. Таким образом, действительное поведение материала под нагрузкой существенно отличается от схематизированных представлений закона Гука. И хотя во многих случаях такая схематизация дает приемлемые для практики расчетов результаты, имеется целый ряд примеров, когда игнорирование указанной особенности в расчетах приводило к существенным расхождениям с натурой. Учет особенностей деформирования материалов конструкций позволяет приблизить теоретические прогнозы к реальному их поведению.

Таблица 2

Тип нелинейности	Графическая интерпретация	Методы решения
Физическая нелинейность		метод последовательных нагружений; метод переменных жесткостей; метод последовательных жесткостей
Геометрическая нелинейность		метод последовательных нагружений
Конструктивная нелинейность		метод компенсирующих нагрузок
Генетическая нелинейность		метод последовательных нагружений по измененным расчетным схемам
Инженерная нелинейность		метод переменных жесткостей

Рассмотрим виды нелинейности в теории расчета конструкций и проведем классификацию методов, применяемых для учета различных видов нелинейностей.

При расчете конструкций различают физическую, геометрическую и конструктивную нелинейности.

Физическая нелинейность обусловлена учетом в расчете нелинейной зависимости между компонентами обобщенных напряжений и деформаций  $s_i = f(e_i)$

(см. табл. 2) и характеризует работу материала конструкции в упругопластической области.

Геометрическая нелинейность имеет место, когда перемещения конструкции вызывают значительное изменение ее геометрии, так что уравнения равновесия приходится составлять с учетом изменения формы и размеров конструкции, т. е. по деформированной схеме.

Конструктивная нелинейность возникает вследствие конструктивных особенностей системы, вызывающих изменение расчетной схемы в процессе ее деформирования (изменяются условия закрепления: выпадают или образуются новые связи, выключаются из ран боты или включаются в нее те или иные элементы конструкции и т. д.).

**ВЫВОДЫ.** Для современных сложных сооружений (мосты, большепролетные покрытия, высотные здания и др.), как правило, конструктивная схема обуславливается не только упругим расчетом, но и процессами изменения напряженно-деформированного состояния во времени. В процессе жизненного цикла конструктивная схема сооружения многократно изменяется, усилия и перемещения перераспределяются, значительно повышая вероятность трещинообразования и возникновения аварийной ситуации.

Реализация математической модели на компьютере дает возможность многократно и в широком диапазоне изменять входные параметры и условия функционирования сложных систем, заменяя, таким образом, экспериментальные исследования численным экспериментом. Кроме того, при решении ряда сложных конструкторских задач необходимо применение вариантного проектирования.

#### **СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Городецкий, А.С. Компьютерное моделирование в задачах строительной механики: Учебное пособие / А.С. Городецкий, М.С. Барабаш, В.Н. Сидоров – М.: Издательство АСВ, 2016. – 338 с.
2. Барабаш, М.С. Численное моделирование процессов жизненного цикла зданий и сооружений / Мария Сергеевна Барабаш // Наука та будівництва – 2015. – №4 – С. 24-28
3. Городецкий, А. С. Компьютерные модели конструкций / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – [2-е изд., доп.]. – К. : «ФАКТ», 2007. – 394 с.
4. Барабаш, М. С. Методы компьютерного моделирования процессов возведения высотных зданий / Мария Сергеевна Барабаш // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – М.: Изд-во «АСВ», 2012. – Vol. 8, Issue 3 – С. 58 - 68.
5. Барабаш, М. С. Компьютерное моделирование процессов жизненного цикла объектов строительства: Монография / Мария Сергеевна Барабаш – К.: Изд-во «Сталь», 2014. – 301 с.
6. Барабаш, М. С. Численное моделирование НДС конструкций с учетом стадий жизненного цикла зданий и сооружений / М. С. Барабаш // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – М.: Изд-во «АСВ», 2015. – Vol. 11, Issue 1 – С. 80 - 90.
7. Бате, К. Численные методы анализа и метод конечных элементов; [пер. с англ.] / К. Бате, Э. Вилсон. – М.: Стройиздат, 1982. – 448 с.