

ИТС ПРОМЫШЛЕННОЕ И ГРАЖДАНСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

3/2014



**САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ**



www.samgasu.ru

СОУЧРЕДИТЕЛИ:
Российское общество инженеров строительства, Российская инженерная академия

СОДЕРЖАНИЕ

СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС МОСКВЫ

- Мультипликативные эффекты строительного комплекса города Москвы
Левкин С. И., Киевский Л. В., Широков А. А. _____ 3
- Рынок недвижимости Москвы как индикатор эффективности градостроительных решений
Марева Ю. А., Киевская Р. Л. _____ 10

ЭКОЛОГИЯ СРЕДЫ ОБИТАНИЯ

- Развитие возобновляемой энергетики – важный вклад в обеспечение защиты окружающей среды
Бальзаников М. И., Баджикиев С. В., Галицкова Ю. М. _____ 16
- Промышленные отходы – перспективное сырье для производства строительных материалов
Чумаченко Н. Г., Коренькова Е. А. _____ 20

СТРОИТЕЛЬНАЯ НАУКА

- Математическое моделирование формирования керамической массы в шнековом прессе как объекта автоматизации производства кирпича
Галицков С. Я., Галицков К. С., Назаров М. А. _____ 25
- Экспериментальные исследования по обдувке пакета из трех труб в аэродинамической трубе
Атаманчук А. В. _____ 29

В ПОМОЩЬ ПРОЕКТИРОВЩИКУ

- Автоматизированное создание расчетных моделей SCAD при помощи средств API
Самёнов А. А., Сафиуллин М. Н., Подьяев И. А., Маляренко А. А. _____ 32
- Анализ жесткостных характеристик перфорированных балок с круглой перфорацией стенки
Соловьев А. В., Васюков И. А. _____ 36
- Расчетная модель наклонного сечения железобетонной балки с учетом сил зацепления в наклонной трещине
Филатов В. Б., Блинкова Е. В. _____ 39
- Методы компьютерного моделирования процессов введения высотных зданий
Барабаш М. С. _____ 43

БЕЗОПАСНОСТЬ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

- Учет требований устойчивости к развитию прогрессирующего разрушения при оптимальном проектировании металлических структурных покрытий
Алталов В. Ю., Лукин А. О., Петров С. М. _____ 47

ЭНЕРГОРЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

- Повышение теплозащитных характеристик строительных ограждающих конструкций зданий и сооружений культурного и исторического наследия
Вытчиков Ю. С., Сапарёв М. Е. _____ 52

РЕКОНСТРУКЦИЯ. РЕСТАВРАЦИЯ. КАПИТАЛЬНЫЙ РЕМОНТ

- Результаты лабораторных и полевых исследований изготовления буроналивной сваи с контролируемым уширением
Пронозин Я. А., Самохвалов М. А., Рачков Д. В. _____ 56
- Применение свариваемой стали с повышенными эксплуатационными свойствами при реконструкции подкрановых конструкций
Горицкий В. М., Шнейдеров Г. Р., Калашников Г. В., Мейтин В. И. _____ 61

ФАКУЛЬТЕТ ПГС – СТРОИТЕЛЯМ

- Особенности теплоизоляционных конструкций труб и оборудования при строительстве трубопроводов на участках многолетнемерзлых грунтов
Сапсай А. Н., Суриков В. И., Коргин А. В., Фридлянд И. Я. _____ 67
- Конструктивные и планировочные решения многоэтажных производственных зданий при обеспечении в них естественного освещения через световые колодцы
Стецкий С. В., Чэнь Гуанлун _____ 70

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ТЕХНИКА, МАТЕРИАЛЫ

- Об использовании ориентированно-стружечной плиты в составе кровли из мягкой черепицы
Гордеева Т. Е., Безгина Л. Н. _____ 73
- Безобжиговый пенодиатомитовый теплоизоляционный материал на местном природном кремнистом сырье
Тотурбиев А. Б., Абдулаев А. М., Черкашин В. И., Тотурбиев Б. Д. _____ 76

ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

- Обзор диаграмм деформирования бетона при сжатии в отечественных и зарубежных нормативных документах
Панфилов Д. А., Пищулев А. А., Гимадетдинов К. И. _____ 80

СПОНСОРЫ И ПАРТНЕРЫ

Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы, РААСН, Комитет Торгово-промышленной палаты РФ по предпринимательству в сфере строительства, Министерство строительного комплекса и жилищно-коммунального хозяйства Московской области, МГСУ, МНИИТЭП, Моспроект-2 им. М. В. Посохина, ПНИИИС, ЦНИИПромзданий, ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. Д. ДЁМИНОВ, главный редактор,
академик Российской инженерной
академии

М. И. БОГДАНОВ
кандидат геолого-минералогических наук

Т. БОК
доктор технических наук (Германия)

М. БОЛТРИК
доктор технических наук (Польша)

М. П. БУРОВ
доктор экономических наук

И. И. ВЕДЯКОВ
доктор технических наук

А. А. ВОЛКОВ
доктор технических наук,
член-корреспондент РААСН

И. Е. ГОРЯЧЕВ
кандидат технических наук

В. В. ГРАНЁВ
доктор технических наук

Ю. П. ГРИГОРЬЕВ
академик РААСН

Б. В. ГУСЕВ
доктор технических наук,
член-корреспондент РАН

А. Н. ДМИТРИЕВ
доктор технических наук

А. А. КУСАИНОВ
доктор технических наук
(Республика Казахстан)

В. В. ЛАРИОНОВ
доктор технических наук

С. И. ЛЁВКИН
доктор менеджмента

И. Г. ЛУКМАНОВА
доктор экономических наук

С. Д. МИТЯГИН
доктор архитектуры

А. Я. НАЙЧУК
доктор технических наук
(Республика Беларусь)

В. А. НОВОСЁЛОВ
советник РААСН

П. П. ОЛЕЙНИК
доктор технических наук

М. М. ПОСОХИН
академик Международной академии
архитектуры, член-корреспондент РААСН

П. И. ПОСПЕЛОВ
доктор технических наук

В. И. РЕСИН
доктор экономических наук,
академик РААСН

Н. И. СЕНИН
кандидат технических наук

В. И. ТЕЛИЧЕНКО
доктор технических наук,
академик РААСН

О. И. ФЕДОСЕЕВА
заместитель главного редактора

Редактор отдела **Т. Я. НИЖНИК**
Редакторы-операторы:
Е. А. ПРОКОФЬЕВА, А. С. СВЕЧКИНА
Художник **Н. Н. ОКУНЕВА**
Верстка **С. И. СМЫКОВ**

Подписано в печать 24.03.2014 г.
Бумага мелованная. Формат 60×88 1/8
Печать офсетная. Усл. печ. л. 11
Тираж 1720 экз. Цена 890 р. Заказ № 155

Адрес редакции: 127006 Москва,
ул. Долгоруковская, 23а, стр. 1, оф. 208
E-mail: pgs@inbox.ru, pgs1923@yandex.ru
www: pgs1923.ru

Телефоны: 8 (499) 978-66-82, 978-26-00

Журнал зарегистрирован в Мининформпечати
РФ. Рег. № 01061

C O N T E N T S

Multiplicative Effects of the Construction Complex of Moscow <i>Levkin S. I., Kievsky L. V., Shirov A. A.</i>	3
Moscow Real Estate Market as an Indicator of the Effectiveness of Urban Planning Decisions <i>Mareev Yu. A., Kievskaya R. L.</i>	10
Development of Renewable Energy Sources as a Great Contribution to Environment Protection <i>Balzannikov M. I., Evdokimov S. V., Galitskova Yu. M.</i>	16
Industrial Waste as Prospective Raw Materials for Building Materials Production <i>Chumachenko N. G., Korenkova E. A.</i>	20
Mathematical Modeling of Ceramic Material Molding in an Auger Press Used for Automated Production of Bricks with Specified Strength <i>Galitskov S. Ya., Galitskov K. S., Nazarov M. A.</i>	25
Experimental Studies on the Blowing of a Three-Pipe Bundle in a Wind Tunnel <i>Atamanchuk A. V.</i>	29
Automated Generation of SCAD Simulation Models Using API Tools <i>Semenov A. A., Safiullin M. N., Porivaev I. A., Malyarenko A. A.</i>	32
Stiffness Value Analyses of Perforated I-beams with Circular Web Perforation <i>Solovev A. V., Vasiukov I. A.</i>	36
Design Model of Reinforced Concrete Beam's Inclined Section Taking into Account the Aggregate Interlock Forces in the Inclined Crack <i>Filatov V. B., Blinkova E. V.</i>	39
Methods of Computer Simulation of High-Rise Buildings Construction Processes <i>Barabash M. S.</i>	43
Account of Resistance Requirements for the Development of Progressive Destruction in the Process of Optimal Design of Metal Structural Coatings <i>Alpatov V. Yu., Lukin A. O., Petrov S. M.</i>	47
Improvement of Thermal Protection Properties of Enclosing Structures in Buildings and Facilities of Cultural and Historical Heritage <i>Vytchikov Yu. S., Saparev M. E.</i>	52
Laboratory and Field Research Results of Arrangement of a Drill-Injection Pile with Controlled Broadening <i>Pronozin Ya. A., Samohvalov M. A., Rachkov D. V.</i>	56
The Use of Weld Steel with Improved Operational Properties when Reconstructing Crane Substructures <i>Goritsky V. M., Shneyderov G. R., Kalashnikov G. V., Meytin V. I.</i>	61
Features of Thermal-Insulating Constructions of Pipes and Equipment for Building of Pipelines in Multi-Year Frozen Ground Areas <i>Sapsay A. N., Surikov V. I., Korgin A. V., Fridlyand I. Y.</i>	67
Structural and Planning Decisions of Multi-Story Industrial Buildings with Natural Light Supply through the Light Wells <i>Stetsky S. V., Chen Guanglong</i>	70
On the Use of Oriented Chipboards in Soft Tile Roofs <i>Gordeeva T. Y., Bezgina L. N.</i>	73
Unburned Foam-Diatomaceous Heat-Insulating Material on the Local Natural Siliceous Raw Materials <i>Toturbiev A. B., Abdulaev A. M., Cherkashin V. I., Toturbiev B. D.</i>	76
Review of Diagrams of Concrete Deformation under Compression in National and Foreign Concrete Codes <i>Panfilov D. A., Pischulev A. A., Gimadetdinov K. I.</i>	80

**Индекс журнала в объединенном каталоге
«Пресса России» – 91622.**

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

АВТОРЫ ПУБЛИКОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НЕСУТ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА ПОДБОР И ТОЧНОСТЬ ПРИВЕДЕННЫХ ФАКТОВ, ЦИТАТ, СОБСТВЕННЫХ ИМЕН И ПРОЧИХ СВЕДЕНИЙ.
РЕДАКЦИЯ МОЖЕТ ПУБЛИКОВАТЬ СТАТЬИ, НЕ РАЗДЕЛЯЯ ТОЧКУ ЗРЕНИЯ АВТОРА.
ЗА СОДЕРЖАНИЕ РЕКЛАМНЫХ ОБЪЯВЛЕНИЙ РЕДАКЦИЯ ОТВЕТСТВЕННОСТИ НЕ НЕСЕТ.
ПЕРЕПЕЧАТКА МАТЕРИАЛОВ ЖУРНАЛА БЕЗ ПИСЬМЕННОГО СОГЛАСИЯ РЕДАКЦИИ НЕ ДОПУСКАЕТСЯ.

УДК 004:624.016:721.011.27

Методы компьютерного моделирования процессов возведения высотных зданий

Мария Сергеевна БАРАБАШ, кандидат технических наук, доцент, докторант, e-mail: bmari@liraland.com.ua

Национальный авиационный университет, 03058, Украина, Киев, пр. Космонавта Комарова, 1

Аннотация. Приведены результаты теоретических исследований, позволивших установить зависимость напряженно-деформированного состояния несущих систем высотных зданий от стадии возведения. Рассмотрено влияние этого процесса на усилия, возникающие в элементах каркасного здания с монолитным ядром жесткости. Показан пример поэтапного расчета двухэтажной рамы в программном комплексе ЛИРА-САПР с учетом постадийности возведения, нелинейной работы конструктивных элементов и пошагового приложения нагрузки на деформированную схему. Отмечена интересная форма демонстрации генетической нелинейности. Моделирование процесса возведения дает возможность учитывать неравномерную осадку вертикальных элементов, включение конструкции в работу до набора бетоном расчетной прочности, а также существенное изменение конструктивной схемы здания на этапах возведения вследствие установки и удаления временных стоек. В процессе исследований установлено, что существенное влияние на напряженно-деформированное состояние здания оказывает учет нелинейной работы конструкций.

Ключевые слова: моделирование, жизненный цикл, процесс возведения, несущая система, информационные технологии, шаговый метод, нелинейная работа конструкций, история нагружения.

METHODS OF COMPUTER SIMULATION OF HIGH-RISE BUILDINGS CONSTRUCTION PROCESSES

Maria S. BARABASH, e-mail: bmari@liraland.com.ua, National Aviation University of Ukraine (Kiev)

Abstract. The article examines the influence of construction process on forces that arise in the elements of a frame building with a cast-in-situ stiffening core. The purpose of theoretical research is to establish the influence of the erection process on the stress-strain state of the bearing systems of high-rise buildings. An example of the step-by-step calculation of the two-story frame with the program complex LIRA-SAPR with due regard for stage-by-stage erection, non-linear operation of structural elements and step-by-step load applying to the deformed scheme is presented. Very interesting form of demonstrating the genetic non-linearity is noted. Simulation of the erection process makes it possible to take into account the relative settlement of vertical elements, engaging the structure into operation before gain in designed strength of concrete as well as significant changing the structural scheme of the building at erection stages due to temporary posts putting and removing. During the research, it was found that a significant effect on the stress-strain state of the building as a whole has a non-linear working of structures of multistory buildings.

Key words: modeling, life cycle, erection process, bearing system, information technologies, step method, nonlinear work of construction, loading history.

Существует определенный разрыв между действующими нормами, регламентирующими деятельность проектировщиков и строительную практику, и возможностями уточненных расчетов конструкций зданий и сооружений, основанных на современных методах, использующих более точную постановку практических задач и их программную реализацию.

Информация об объекте и НДС несущей системы на каждой из стадий жизненного цикла претерпевает значительные изменения, причины которых могут быть различны. Эти изменения часто начинаются уже на стадии проектирования, когда при расчете по классической модели определяются внутренние усилия, возникающие в конструктивных эле-

ментах. На стадии возведения внутренние усилия меняются в зависимости от технологических особенностей строительного производства, конструктивной и расчетной схем здания, от поэтапно прикладываемых к нему постоянных нагрузок.

В настоящее время проводятся теоретические и экспериментальные исследования для определения влияния процесса возведения здания на НДС его несущих систем. Формирование НДС несущих систем в процессе возведения исследовали Н. И. Карпенко, А. С. Городецкий, Е. А. Невский, А. И. Шеин и другие ученые [1–4]. В этих работах отмечается влияние изменения расчетной схемы и величины вертикальной нагрузки в процессе монтажа на формирование конечных внутренних

усилий в элементах несущих систем многоэтажных зданий. Это подтверждает значимость данных параметров при математическом моделировании процесса возведения.

Расчеты, основанные на классических численных методах, не всегда позволяют полностью обеспечить выполнение данных требований. В связи с этим создаются методы расчета, максимально приближенные к реальным условиям. Поэтому большое значение приобретает выбор математических моделей, адекватно описывающих пространственную работу несущих систем высотных и многоэтажных зданий.

Расчетная схема таких зданий содержит информацию о топологии (взаиморасположении конструктивных элементов), геометрии системы,

сечениях и материале элементов, нагрузках. В задачу расчета входит определение перемещений, усилий (напряжений) в элементах на основе этой информации. Решение данной задачи основывается на имеющихся дифференциальных уравнениях, связывающих перемещения или усилия с нагрузкой [1].

На практике для расчета сложных конструкций на различные виды воздействий, в том числе динамических, с учетом нестандартных граничных сложных грунтовых условий применяют численные методы. Идея любого численного метода заключается в нахождении искомых параметров напряженного состояния (усилий, напряжений, перемещений) в конечном количестве точек. Как правило, это узлы сетки, нанесенной на рассчитываемую область. Значения искомых параметров между узлами находят на основе простой или сложной интерполяции (рис. 1). После того как для каждого узла сетки будут составлены конечно-разностные аналоги дифференциальных операторов, дифференциальные уравнения можно представить в виде системы линейных алгебраических уравнений. По найденным значениям перемещений в узлах сетки можно определить другие параметры НДС.

Все задачи строительной механики являются вариационными. Это значит, что, например, для изгибаемого стержня решение дифференциального уравнения

$$EI = \frac{\partial^4 W}{\partial x^4} = p(x) \quad (1)$$

можно заменить поиском минимума функционала

$$\int_0^l \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} EI \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} dx - p(x)w(x) = 0, \quad (2)$$

где E — модуль упругости материала; I — момент инерции (одна из характеристик сечения элемента); $p(x)$ — функция нагрузки; $w(x)$ — функция искомых перемещений.

В строительной механике стержневых систем это выражение известно как принцип равенства работ внутренних и внешних сил. Поиск минимума этого функционала осуществляется вариацией возможных перемещений. Поэтому методы, основан-

ные на решении (2), называются вариационными. Также такой подход известен как принцип возможных перемещений. Как правило, задача в постановке (2) решается численными методами, т. е. производные заменяются разностными аналогами.

Метод конечных элементов (МКЭ) [5, 6] основан на дискретизации самого объекта, который моделируется в виде отдельных конечных элементов. Каждый конечный элемент имеет свои размеры, жесткостные характеристики, нагрузки, законы интерполяции узловых значений параметров НДС. В этом основное отличие конечно-элементной сетки, которая представляет собой конструкцию в виде набора конечных элементов от абстрактной разностной сетки, служащей для замены дифференциальных операторов разностными аналогами. В настоящее время используется метод конечных элементов в перемещениях, т. е. в узлах сетки сначала находят перемещения, а затем — остальные параметры НДС.

Идеализация модели основывается на равенстве энергии деформации конструкции. Последовательность численного решения задач методом конечных элементов описана в работе [7].

При возведении объекта его конструктивная схема может многократно меняться, усилия и перемещения «замораживаются», определяя сечения элементов и конструкции узлов именно на этой стадии.

Реализация математической модели в программном комплексе дает возможность многократно и в широком диапазоне изменять входные параметры и условия функционирования сложных систем, заменяя исследования численным экспериментом.

Автором настоящей статьи проведены исследования каркасно-монолитных зданий. В расчетах колонны ригели моделировали пространственными стержнями с жесткими узлами, перегородки — универсальными конечными элементами плоской задачи теории упругости, перекрытия — конечными элементами плиты, работающими в двух плоскостях.

В основе алгоритма нелинейного

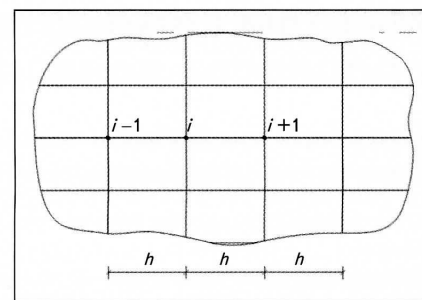


Рис. 1. Интерполяционная сетка некоторой области

расчета этого ПК лежит итерационный процесс, чередующий этапы статического расчета систем при фиксированных значениях жесткости с этапами их уточнения по найденным на предыдущей итерации усилиям и деформациям. Этот метод эффективно применяется при расчете зданий с проектными и конструктивными решениями, малоэтажных зданий без диафрагм жесткости, многоэтажных зданий с зальными помещениями, рамного каркаса с упругопластичными стыками.

Вне зависимости от конструктивных решений процесс возведения заключается в том, что собственная масса здания растет по мере монтажа, с возведением нового этажа изменяется высота здания, погонная жесткость вертикальных элементов и нагрузка на каждом новом этапе прикладываются к новой расчетной схеме.

Наибольшее влияние процесс возведения оказывает на НДС несущих систем высотных и многоэтажных зданий с ядром жесткости. В процессе возведения здания неравномерная осадка опор уже происходит от собственного веса (50–70 % всей нагрузки), и к моменту формирования монолита верхних этажей она в значительной степени оказывается выбранной. В течение эксплуатации эффект может усугубиться за счет деформаций ползучести, которые в наиболее нагруженных элементах (колонны и пилоны) протекают более интенсивно, и плиты перекрытий будут «зависать» на диафрагмах.

Если специалисту не удастся выявить осадку на основе компьютерного моделирования процесса возведения здания, а потом эксплуата-

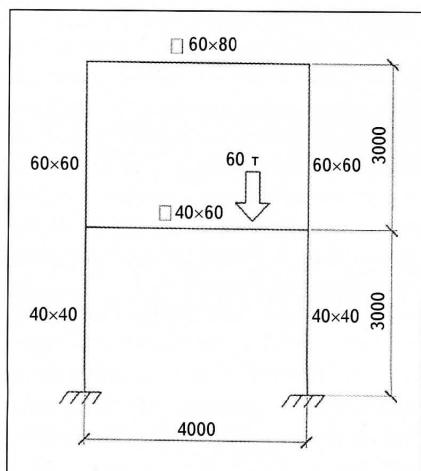


Рис. 2. Расчетная схема двухэтажной рамы

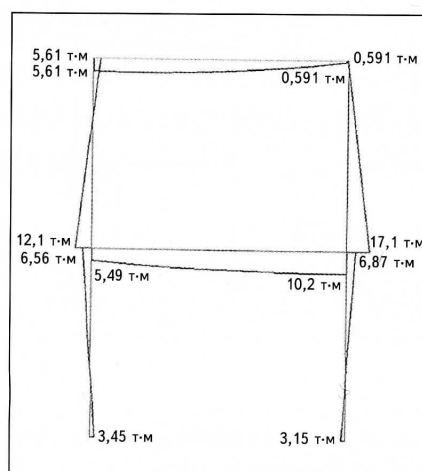


Рис. 3. НДС возведенной конструкции

ционных стадий, на которых отслеживаются деформации ползучести, он должен оценить возможную действительную неравномерность осадки опор и затем скорректировать расчет плиты перекрытия. Можно рекомендовать такой приближенный подход к проектированию: вначале определить перемещения опор из общей схемы здания, а далее рассчитать плиту и на местную нагрузку, и на величины осадок, составляющих 15–20 % осадки, определенной для общей схемы. Таким образом, плита с большим количеством опор различного типа имеет значительное число вариантов приспособления к нагрузкам и всегда «выбирает» наилучший.

Несущие вертикальные элементы и несущие стены деформируются по мере увеличения нагрузки в процессе возведения уже в составе всей несущей системы, поскольку при этом происходит их соединение с ядром жесткости. Обычно монолитное ядро жесткости выполняют с опережением по отношению к ограждающим конструкциям, поэтому основная часть его деформаций происходит до монтажа ограждающих конструкций. Колонны каркаса, напротив, укорачиваются по мере их сооружения и возрастания нагрузки. Разность продольных деформаций колонн и ядра приводит к соответствующему деформированию перекрытий. Каждое новое перекрытие возводится в строго горизонтальном положении после того, как колонны уже укоротились от всех нижераспо-

ложенных перекрытий. Поэтому каждое перекрытие будет деформироваться только от действия нагрузки, создаваемой массой вышерасположенных этажей.

Рассмотрим поэтапно возводимую двухэтажную раму (рис. 2). На первом этапе к ригелю первого этажа прикладывается монтажная нагрузка $P = 60$ кПа. После того как возведен второй этаж рамы, эту нагрузку убирают. Для корректности численного эксперимента нагрузку от собственного веса не учитывали. НДС возведенной ненагруженной конструкции приведено на рис. 3, т. е. в конструкции присутствуют усилия после того, как удалена приложенная нагрузка. Это свидетельствует о сохранении конструкцией истории возведения. Учет процесса возведения показан на рис. 4, на котором схематично отмечено, что суперпозиция отсутствует. А это первый признак нелинейности.

Для сопоставления результатов расчета по двум математическим моделям несущую систему рассчитывали на действие только вертикальной нагрузки без учета и с учетом возведения.

При решении нелинейных задач, как правило, применяются шаговые методы, математический аналог которых — методы дифференцирования по параметру (методы продолжения). Они использовались для доказательства существования решения нелинейных уравнений еще в XX в. [10].

Математическая модель метода

такова. Представим систему уравнений, описывающих нелинейную задачу, следующим образом

$$Au = f, \quad (3)$$

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

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

$$A_m \Delta u_{m+1} = \Delta \beta_{m+1} f; \quad (4)$$

$$u_{m+1} = u_m + \Delta u_{m+1},$$

где A_m — линейный оператор, равный

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial \psi_1}{\partial u_1} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_1}{\partial u_j} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_1}{\partial u_n} |_{u_m} \\ \frac{\partial \psi_j}{\partial u_1} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_j}{\partial u_j} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_j}{\partial u_n} |_{u_m} \\ \frac{\partial \psi_n}{\partial u_1} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_n}{\partial u_j} |_{u_m} & \frac{\partial \psi_n}{\partial u_n} |_{u_m} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$\psi_l (l = 1, 2, \dots, n)$ — нелинейные операторы, т. е. уравнения системы $Au = f$ выглядят как $\psi_l(u_1, u_2, \dots, u_j, \dots, u_n) = P_l$; β — параметр нагрузки, при $\beta = 0$ легко определяется начальное решение u_0 , при $\beta = 1$ система превращается в исходную.

Последовательно изменяя β от 0 до 1, находим приближенное решение. На $m+1$ итерации уравнение метода конечных элементов имеет вид:

$$K_m \Delta u_{m+1} = \beta_{m+1} f; \quad (6)$$

$$\sum_{z \in l_1} K_{l_1, r}^{(m)} \Delta u_{l_1, m+1} + \dots + \quad (7)$$

$$+ \sum_{z \in l_j} K_{l_j}^{(m)} \Delta u_{j, m+1} + \dots +$$

$$+ \sum_{z \in l_n} K_{l_n, r}^{(m)} \Delta u_{l_n, m+1} = \Delta \beta_{m+1} P_l.$$

Перемещения u_m и усилия S_m для ранее возведенной конструкции (для этапов 1, 2, ..., $m-1$) определяются по формулам:

$$u_m = u_{m-1} + \Delta u_m; S_m = S_{m-1} + \Delta S_m,$$

а для конструкции, возведенной на этапе m ,

$$u_m = \Delta u_m; S_m = \Delta S_m.$$

В отличие от формулы (6) в выражении (7) K_m составляются с учетом не только физических нелинейных свойств материала, но и с учетом изменения топологии конструкции, так как на этапе m расчета учитывается появление новых элементов. При учете физической и геометрической не-

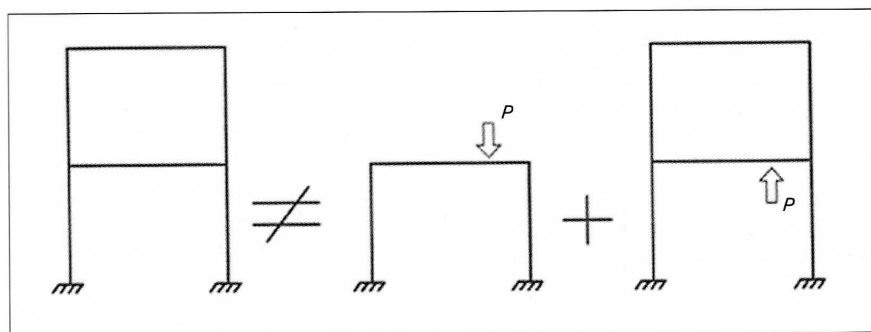


Рис. 4. Учет процесса возведения

линейности решение системы (7) требует дополнительных шагов типа (6).

В процессе исследований установлено следующее:

- монтаж элементов несущей системы приводит к изменению расчетной схемы здания, приложение увеличивающейся вертикальной нагрузки к измененной расчетной схеме здания влияет на величину внутренних усилий;
- формирование НДС несущей системы

в значительной степени зависит от способа монтажа;

- существенное влияние на НДС здания в целом оказывает учет нелинейной работы конструкций;
- НДС элементов несущей системы многоэтажного здания изменяется в процессе возведения, что объясняется постепенным формированием расчетной схемы здания и приложением нагрузки на деформированную схему.

Вывод

Моделирование процесса возведения, имеющее большое значение для конструкций высотных зданий из монолитного железобетона, позволяет учитывать:

- неравномерную осадку вертикальных элементов (колонны и пилоны имеют большие деформации, чем стены и диафрагмы);
- включение конструкции в работу до набора бетоном расчетной прочности (распалубка производится значительно раньше, чем бетон наберет расчетную 28-дневную прочность);
- существенное изменение конструктивной схемы здания на этапах возведения вследствие установки и удаления временных стоек.

Для решения этих задач необходимо рассчитывать конструкции в нелинейной постановке, причем в этих случаях наиболее приемлемы шаговые методы решения нелинейных задач.

ЛИТЕРАТУРА

1. Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкций. М.: АСВ, 2009. 360 с.
2. Немчинов Ю. И. Расчет пространственных конструкций методом конечных элементов. Киев: Будівельник, 1980. 231 с.
3. Волков А. А. Компьютерное моделирование развития и результатов кризисных ситуаций в САПР объектов строительства: дис. ... канд. техн. наук. М., 1999. 184 с.
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. Бате К., Вилсон Э. Численные методы анализа и метод конечных элементов / пер. с англ. М.: Стройиздат, 1982. 448 с.
6. Вайнберг Д. В., Городецкий А. С., Киричевский В. В., Сахаров А. С. Метод конечного элемента в механике деформируемых тел // Прикладная механика. 1972. Т. 8. № 8. С. 3–28.
7. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов / пер. с англ. М.: Мир. 1981. 304 с.
8. Ficken F. A. The continuation method for functional equation. *Commun. Pure Appl. Math.*, 1951, vol. 4, pp. 435–456.
9. Волков А. А. Современные и перспективные информационные технологии в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 9. С. 5–6.

REFERENCES

1. Gorodetskiy A. S., Evzerov I. D. *Komp'yuternye modeli konstruksiy* [Computer models of structures]. Moscow, ASV Publ., 2009. 360 p. (In Russian).
2. Nemchinov Yu. I. *Raschet prostranstvennykh konstruksiy metodom konechnykh elementov* [Calculation of spatial structures using finite element]. Kiev, Budivel'nik Publ., 1980. 231 p. (In Russian).
3. Volkov A. A. *Komp'yuternoe modelirovanie razvitiya i rezultatov krizisnykh situatsiy v SAPR obektov stroitel'stva* [Computer simulation results and development crises in CAD construction projects]. Diss. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, 1999. 184 p. (In Russian).
4. Shein A. I., Zav'yalova O. B. Influence of physical nonlinearity of concrete on the stress-strain state of the elements of monolithic reinforced concrete frames, calculated taking into account the loading history. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2012, no. 6, pp. 29–31. (In Russian).
5. Bate K., Wilson E. *Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov* [Numerical methods of analysis and finite element method]. Moscow, Sroyizdat Publ., 1982. 448 p. (In Russian).
6. Vaynberg D. V., Gorodetskiy A. S., Kirichevskiy V. V., Sakharov A. S. Finite element method in the mechanics of deformable bodies. *Prikladnaya mekhanika*, 1972, vol. 8, no. 8, pp. 3–28. (In Russian).
7. Norri D., Friz Zh. *Vvedenie v metod konechnykh elementov* [Introduction to finite element method]. Moscow, Mir Publ., 1981. 304 p. (In Russian).
8. Ficken F. A. The continuation method for functional equation. *Commun. Pure Appl. Math.*, 1951, vol. 4, pp. 435–456.
9. Volkov A. A. Current and future information technology in construction. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2012, no. 9, pp. 5–6. (In Russian). ■