

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING AND CONSTRUCTION

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 2. С. 69–79.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (2): 69–79.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 69.032.2

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-69-79

EDN: CLOKPS

О РАЗВИТИИ РАСЧЁТОВ КОНСТРУКЦИЙ, УСИЛИВАЕМЫХ МЕТОДОМ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Александр Александрович Коянкин

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Аннотация. *Актуальность.* Расчёты в программных комплексах, в основе которых заложен метод конечных элементов, выполняемые с учётом генетической нелинейности, т. е. с учётом процесса монтажа, для ряда строительных задач являются невыполнимыми. В частности, в зданиях и сооружениях из сборно-монолитного железобетона происходит поэтапное вовлечение в процесс деформирования и восприятия внешней нагрузки сборного и монолитного бетонов. В реконструируемых зданиях и сооружениях в процессе наращивания сечения элемента (например, устройство железобетонной «фру-башки» или металлической «обоймы») также в разное время включаются в процесс деформирования и восприятия внешней нагрузки материал усиления и усиливаемая часть элемента. В итоге в «старой» части элемента к моменту устройства и набора необходимой прочности «новой» частью присутствуют начальные напряжения и деформации. В то же время в материале усиления или монолитной части сборно-монолитного элемента напряжённо-деформированное состояние является нулевым до приложения дополнительной нагрузки.

Таким образом, при выполнении расчётов требуется изменение жёсткости конечного элемента, однако в программных комплексах, в основе которых заложен метод конечных элементов, отсутствует конечный элемент, способный менять (увеличивать) жёсткость. Обозначенное выше определяет актуальность разработки алгоритма расчёта реконструируемых и сборно-монолитных зданий и сооружений в программных комплексах с использованием метода параллельного элемента.

Цель настоящей работы – усовершенствование метода параллельного элемента и разработка на его основе алгоритма расчёта, позволяющего выполнять расчёт в программных комплексах, в основе которых заложен метод конечных элементов.

Результаты. На основании уточнённого метода параллельного элемента предложен алгоритм выполнения расчёта реконструируемых и сборно-монолитных зданий и со-

оружений в программных комплексах, в основе которых заложен метод конечных элементов. Алгоритм позволяет учесть конструктивные особенности реконструируемых и сборно-монолитных зданий и сооружений, включая поэтапное вовлечение в процесс деформирования разновозрастных материалов. С использованием предложенного алгоритма выполнен пример расчёта реконструируемой системы, в рамках которой осуществляется замена конечного элемента. При этом происходит одновременная смена шарнирного сопряжения элементов на жёсткое.

Ключевые слова: сборно-монолитные конструкции, усиление конструкций, генетическая нелинейность, поэтапность монтажа, поэтапность приложения нагрузки, метод параллельного элемента, метод конечных элементов

Для цитирования: Коянкин А.А. О развитии расчётов конструкций, усиляемых методом параллельного элемента // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 2. С. 69–79. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-69-79. EDN: CLOKPS

ORIGINAL ARTICLE

PARALLEL FEM FOR STRUCTURAL ANALYSIS OF REINFORCED SYSTEMS

Aleksandr A. Koyankin

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Abstract. Calculations in software systems based on the finite element method (FEM), performed with account for genetic nonlinearity, i.e., assembling, are not feasible for a number of construction problems. In particular, in buildings made of factory-made and cast-in-place concrete, the latter is gradually involved in deformation and external load processes. In reconstructed buildings, during the increase in the element cross-section (e.g., reinforced concrete or metal casing), the reinforcing and reinforced materials are also involved in deformation and external load processes at different time. As a result, there are initial stresses and strains in the "old" part of the element by the time its "new" part installation and strength gain. At the same time, in the reinforcing material or cast-in-place element, the stress-strain state is zero until the additional load is applied.

Thus, during the structural analysis, a change in the finite element stiffness is required. But FEM software systems have no finite element capable of changing (increasing) the stiffness. This determines the relevance of the developed algorithm for the structural analysis of factory-made and cast-in-place concrete buildings using the parallel FEM.

Purpose: The aim of this work is to improve the parallel FEM and develop a calculation algorithm based on it.

Research findings: Based on the parallel FEM, the calculation algorithm is proposed for factory-made and cast-in-place concrete buildings. The proposed algorithm accounts for the structural properties of such buildings, including the gradual involvement of different-aged materials in the deformation process. Using the proposed algorithm, the structural analysis is conducted for the reconstructed system, in which the finite element is replaced by the parallel element, and the hinge coupling of elements is simultaneously replaced by a rigid one.

Keywords: cast-in-place concrete structure, genetic nonlinearity, stage-by-stage installation, stage-by-stage load application, parallel FEM

For citation: Koyankin A.A. Parallel FEM for structural analysis of reinforced systems. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (2): 69–79. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-2-69-79. EDN: CLOKPS

Введение

Программные комплексы (ПК), основанные на методе конечных элементов (МКЭ), находятся в постоянном развитии (как обновляются до более совершенных версий существующие ПК, так и предлагаются новые) [1, 2]. Данный процесс совершенно естественен, т. к. выполнение расчётов в ПК позволяет не только сократить время разработки проектной документации, но и даёт возможность проектировщику увидеть пространственную схему деформирования здания в целом с учётом практически всех конструктивных особенностей. Кроме того, при расчёте каркаса здания в ПК важна возможность учёта генетической нелинейности (этапов монтажа и приложения нагрузки) [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. В итоге конструктивная надёжность зданий и сооружений становится выше.

Однако в теории строительных конструкций зданий и сооружений имеются строительные задачи, решение которых невыполнимо только лишь за счёт технических возможностей существующих ПК, основанных на МКЭ. Одной из таких задач является изменение жёсткости (увеличение/уменьшение) элемента в процессе его монтажа или эксплуатации. Например, в зданиях и сооружениях из сборно-монолитного железобетона происходит поэтапное включение в процесс деформирования и восприятия внешней нагрузки сборного и монолитного бетонов, т. е. сборный элемент «превращается» в сборно-монолитный большей жёсткости [4, 5, 7, 11]. До того, как монолитный бетон наберёт требуемую прочность, в сборной части формируются начальные напряжения и деформации от нагрузок собственного веса и веса монолитного бетона. В процессе усиления строительных конструкций происходит изменение жёсткости усиливаемого элемента в результате наращивания сечения (устройство железобетонной «рубашки» или металлической «обоймы»). Однако в усиливаемой конструкции присутствуют начальные напряжения и деформации, сформированные в ходе её эксплуатации, в то время как в материале усиления напряжёнno-деформированное состояние (НДС) нулевое до момента приложения дополнительной нагрузки [7, 13, 14, 15]. Обратным случаем является деградация элемента в процессе его эксплуатации, когда происходит уменьшение сечения элемента (потеря площади сечения в ходе воздействия агрессивной среды или аварийных ситуаций). Здесь необходимо учесть перераспределение усилий, происходящее между элементами конструкции каркаса.

Методы

В работе [8] обозначенные выше случаи разделены следующим образом:

– элемент приобрёл новую жесткостную характеристику, но при этом НДС системы не изменилось, а новая характеристика жёсткости проявляется лишь после изменения нагрузки;

– элемент поменял свою жесткостную характеристику, оставаясь нагруженным, т. е. то внутреннее усилие, которое в нём было до модификации, передаётся обновлённому элементу, и происходит перераспределение усилий в системе без изменения нагрузки.

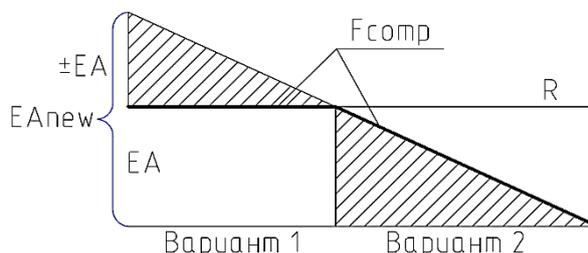
Первый случай относится к вопросам усиления строительной конструкции или к сборно-монолитным конструкциям, где в результате наращивания сечения происходит увеличение жёсткости конструкции.

Второй случай относится к вопросам деградации (ослабления) сечения строительной конструкции, где происходит уменьшение жёсткости конструкции.

В работе [8] приведен расчёт второго случая на примере шарнирно-стержневой системы, представленной в работе [9]. В качестве инструмента расчёта рассмотрен метод параллельного элемента (МПЭ) [9], где автор предлагает применить МПЭ для случая деградации элемента, расположенного в шарнирно-стержневой системе. При этом речь идёт только об уменьшении продольной жёсткости элемента (изгибная жёсткость, равно как и изгибающие моменты и поперечные силы, в системе не рассматриваются), а снижение жёсткости восполняется введением компенсирующих усилий.

Отличительной особенностью первого случая является то, что ослабление сечения сопровождается уменьшением усилий в элементе и одновременным перераспределением усилий в конструктивной системе в целом. Во втором случае изменение жёсткости не приводит к изменению усилий ни в самом элементе усиления, ни в конструктивной системе, поэтому удаление «старого» стержня меньшей жёсткостью и введение «нового» стержня большей жёсткостью не должно приводить к изменению НДС системы. Неизменение НДС системы при замене стержня возможно достичь в результате введения компенсирующих усилий, соответствующих реакции отбрасываемого элемента.

Увеличение жёсткости элемента потребует компенсирующих усилий, равных реакциям «старого» элемента. Снижение жёсткости элемента требует введения компенсирующих усилий величиной пропорционально теряемой жёсткости старого элемента (рис. 1).



EA – «старый» элемент
 EA_{new} – «новый» элемент
 ±EA – приращение жёсткости «старого» элемента
 R – реакция «старого» элемента на 1-м этапе
 F_{comp} – компенсирующее усилие

Рис. 1. Соотношение жёсткостей «нового» и «старого» элементов
 Fig. 1. Stiffness ratio between "new" and "old" elements

Алгоритм выполнения расчёта в ПК, основанном на МКЭ, с использованием МПЭ:

1. Формирование расчётной схемы i -го этапа со следующими параметрами: K_i – матрица жёсткости системы на i -м этапе; ΔF_i – вектор-столбец дополнительных приведённых узловых нагрузок системы на i -м этапе.

2. На основании уравнения

$$K_i \cdot \Delta U_i = \Delta F_i \quad (1)$$

определяются дополнительные перемещения узлов системы на i -м этапе (ΔU_i – вектор-столбец дополнительных перемещений узлов системы на i -м этапе).

3. На основании ΔU_i определяются ΔR_i – приращения реакций в узлах системы на i -м этапе с последующим определением ΔN_i , ΔQ_i и ΔM_i – приращения продольной и поперечной сил, изгибающих моментов в элементах системы на i -м этапе соответственно.

4. Полные реакции в узлах и усилия в элементах системы на i -м этапе определяются путём суммирования реакций в узлах и усилий в элементах системы на предыдущем $i-1$ -м этапе с ΔR_i , ΔN_i , ΔQ_i и ΔM_i соответственно:

$$R_i = R_{i-1} + \Delta R_i; \quad (2.1)$$

$$N_i = N_{i-1} + \Delta N_i; \quad (2.2)$$

$$Q_i = Q_{i-1} + \Delta Q_i; \quad (2.3)$$

$$M_i = M_{i-1} + \Delta M_i. \quad (2.4)$$

5. На $i+1$ -м этапе в результате увеличения жёсткости ряда элементов меняется жёсткость системы в целом, т. е. K_i преобразуется к K_{i+1} – матрица жёсткости системы на $i+1$ -м этапе. Отсутствие в ПК функции изменения жёсткости элемента (за счёт изменения геометрических характеристик сечения) приводит к необходимости замены КЭ. Добавляется новый КЭ, моделирующий сечение элемента после усиления, т. к. дополнительная нагрузка $i+1$ -м этапа в этот момент не добавляется ($\Delta F_{i+1} = 0$), то НДС системы не меняется, а в новом КЭ нулевое НДС.

6. Удаляется КЭ, моделирующий сечение до усиления. До приложения нагрузки $i+1$ -го этапа НДС системы не претерпевает изменений, для чего вводятся компенсирующие усилия $i+1$ -го этапа F_{i+1}^{comp} – вектор-столбец компенсирующих усилий системы на $i+1$ -м этапе. Значения компенсирующих усилий, прикладываемых в узлах заменяемых элементов, равны соответствующим реакциям усилий N_i , Q_i и M_i .

7. Приложение нагрузки $i+1$ -го этапа ΔF_{i+1} – вектор-столбец дополнительных приведённых узловых нагрузок системы на $i+1$ -м этапе.

8. Повторение п. 1...7 расчёта.

Результаты

В качестве примера представлен расчёт строительной конструкции, один из элементов которой усиливается путём наращивания, без снятия нагрузки (рис. 2). Кроме того, происходит замена шарнирного узла сопряжения стержней на жёсткий. Процесс усиления включает следующие этапы:

1-й этап (рис. 2, а) – формирование НДС в стадии эксплуатации;

2-й этап (рис. 2, б) – усиление одного из элементов конструкции (наращивание сечения), замена шарнирного на жёсткое сопряжение элементов 1 и 2, приложение дополнительной нагрузки.

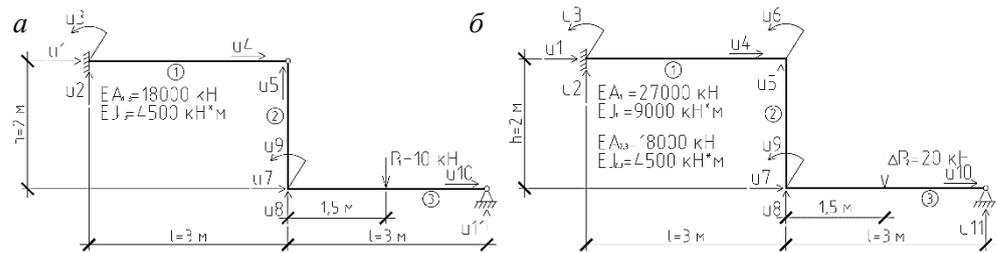


Рис. 2. Расчётная схема:

а – 1-й этап; б – 2-й этап (1, 2, 3 – номера стержней; $u_1 \dots u_{11}$ – перемещения)

Fig. 2. Schematic of calculations:

а – 1st stage; б – 2nd stage (1, 2, 3 – rod numbers; $u_1 \dots u_{11}$ – displacements)

Параметры жёсткости сечений элементов (см. п. 1 алгоритма расчёта):

– во всех элементах на 1-м этапе и в элементах 2, 3 на 2-м этапе – $EA_1 = 18000$ кН, $EI_1 = 4500$ кН·м²;

– в элементе 1 на 2-м этапе – $EA_2 = 27000$ кН, $EI_2 = 9000$ кН·м².

Исходя из граничных условий:

– на 1-м этапе – $u_1 = 0$, $u_2 = 0$, $u_3 = 0$, $u_4 \neq 0$, $u_5 \neq 0$, $u_7 \neq 0$, $u_8 \neq 0$, $u_9 \neq 0$, $u_{10} = 0$, $u_{11} = 0$. Связь в направлении u_6 отсутствует (шарнирное сопряжение, что в матрице жёсткости системы выражено нулевой строкой и нулевым столбцом);

– на 2-м этапе – $u_1 = 0$, $u_2 = 0$, $u_3 = 0$, $u_4 \neq 0$, $u_5 \neq 0$, $u_6 \neq 0$, $u_7 \neq 0$, $u_8 \neq 0$, $u_9 \neq 0$, $u_{10} = 0$, $u_{11} = 0$.

В рамках 1-го этапа матрица жёсткости системы K_1 составит

$$K_1 = \begin{bmatrix} 6000 & 0 & 0 & -6000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 500 & 1500 & 0 & -500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1500 & 4500 & 0 & -1500 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6000 & 0 & 0 & 7687,5 & 0 & 0 & -1687,5 & 0 & 3375 & 0 & 0 \\ 0 & -500 & -1500 & 0 & 9500 & 0 & 0 & -9000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1687,5 & 0 & 0 & 7687,5 & 0 & -3375 & -6000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -9000 & 0 & 0 & 9500 & 1500 & 0 & -500 \\ 0 & 0 & 0 & 3375 & 0 & 0 & -3375 & 1500 & 11250 & 0 & -1500 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6000 & 0 & 0 & 6000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -500 & -1500 & 0 & 500 \end{bmatrix}.$$

Вектор-столбец приведённых узловых нагрузок F_1 примет вид

$$F_1^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -6,875 \ -5,625 \ 0 \ -3,125].$$

Решая уравнение (1), определим перемещения свободных узлов системы (см. п. 2 алгоритма расчёта) на 1-м этапе: $u_4 = -0,27466$ мм, $u_5 = -7,80269$ мм, $u_7 = 0,27466$ мм, $u_8 = -8,23617$ мм, $u_9 = 0,76295$.

Далее (см. п. 3, 4 алгоритма расчёта), исходя из уравнения $R_1 = K_1 \cdot U_1$, на основании найденных перемещений определим реакции в узлах элемента на 1-м этапе и, складывая их с реакциями от узловой нагрузки, построим эпюры усилий в системе на 1-м этапе (рис. 3).

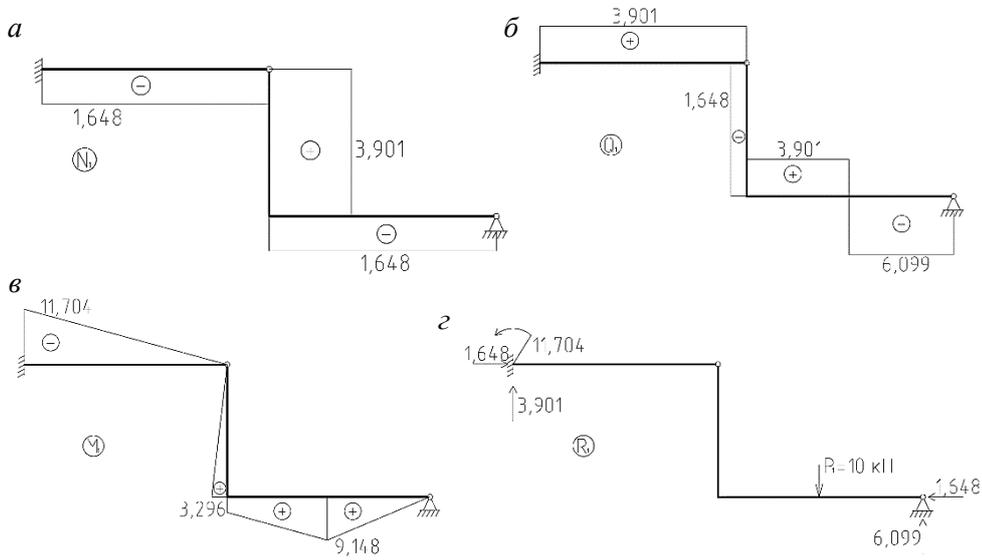


Рис. 3. Эпюры усилий и реакций на 1-м этапе загрузки:
 а – продольные силы N ; б – поперечные силы Q ; в – изгибающие моменты M ; г –
 схема нагрузок и реакций
 Fig. 3. Diagrams of forces and reactions at the 1st stage of loading:
 а – longitudinal forces N ; б – transverse forces Q ; в – bending moments M ; г –
 load and response

После набора бетоном усиления требуемой прочности шарнирное сопряжение стержней 1 и 2 становится жёстким, а матрица жёсткости системы преобразуется к виду

$$K_1 = \begin{bmatrix} 9000 & 0 & 0 & -9000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4000 & 6000 & 0 & -4000 & 6000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6000 & 12000 & 0 & -6000 & 6000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -9000 & 0 & 0 & 15750 & 0 & 6750 & -6750 & 0 & 6750 & 0 & 0 \\ 0 & -4000 & -6000 & 0 & 13000 & -6000 & 0 & -9000 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6000 & 6000 & 6750 & -6000 & 21000 & -6750 & 0 & 4500 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -6750 & 0 & -6750 & 12750 & 0 & -6750 & -6000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -9000 & 0 & 0 & 9500 & 1500 & 0 & -500 \\ 0 & 0 & 0 & 6750 & 0 & 4500 & -6750 & 1500 & 13500 & 0 & -1500 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -6000 & 0 & 0 & 6000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -500 & -1500 & 0 & 500 \end{bmatrix}.$$

После добавления в расчётную схему нового КЭ, моделирующего сечение после усиления, общая матрица жёсткости системы будет равна сумме

матрицы K_1 и локальных матриц жёсткости элементов 1 и 2 с учётом изменения условий их сопряжения и изменения жёсткости элемента 1. Однако, т. к. в этот момент дополнительная нагрузка 2-го этапа ещё не добавляется, т. е. $\Delta F_2 = 0$, то НДС системы не меняется, а в добавленном новом элементе 1 усилия и деформации равны 0 (см. п. 5 алгоритма расчёта).

Удаление КЭ, моделирующего сечение до усиления (стержень 1), приводит к матрице жёсткости K_2 . С целью сохранения НДС, как на 1-м этапе, прикладываем компенсирующие усилия 2-го этапа (см. п. 6 алгоритма расчёта):

$$F_2^{comp} = [0 \ 0 \ 0 \ 1,648 \ 3,901 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0],$$

и расчётная схема преобразуется к виду, представленному на рис. 4.

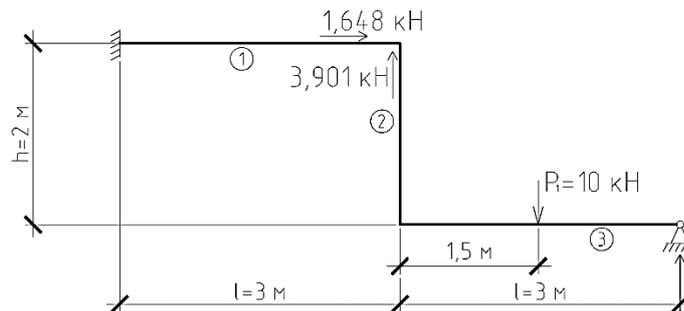


Рис. 4. Расчётная схема с приложением компенсирующих усилий на 2-м этапе
Fig. 4. Schematic of calculations using compensating forces at the 2nd stage

Эпюры усилий и перемещения узлов системы будут аналогичны этапу 1, но с тем отличием, что в заменённом элементе усилия нулевые (установлен ненапряжённый элемент). Однако, несмотря на изменение сечения элемента на 2-м этапе, напряжения и деформации от нагрузки 1-го этапа в сборной части остаются. После приложения нагрузки 2-го этапа (см. п. 7 алгоритма расчёта)

$$F_2^T = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -13,75 \ -11,25 \ 0 \ -6,25]$$

дополнительные перемещения узлов системы на 2-м этапе составят: $\Delta u_4 = 0,55431$ мм, $\Delta u_5 = -5,58457$ мм, $\Delta u_6 = -2,01816$, $\Delta u_7 = -0,83147$ мм, $\Delta u_8 = -6,72117$ мм, $\Delta u_9 = -0,10671$.

После определения дополнительных приращений реакций в узлах системы, приращения усилий в элементах системы на 2-м этапе (рис. 5, а) и сложения их с реакциями и усилиями в элементах системы на 1-м этапе получим полные реакции и усилия системы (см. п. 8 алгоритма расчёта) на 2-м этапе (рис. 5, б).

После определения усилий в рамках каждого этапа осуществляется расчёт и конструирование элементов на основании требований норм и правил. При этом необходимо учитывать поэтапное вовлечение в процесс деформирования и восприятия нагрузки усиливаемой части элемента и материала усиления, а усилия 1-го этапа полностью сосредотачиваются в усиливаемой части.

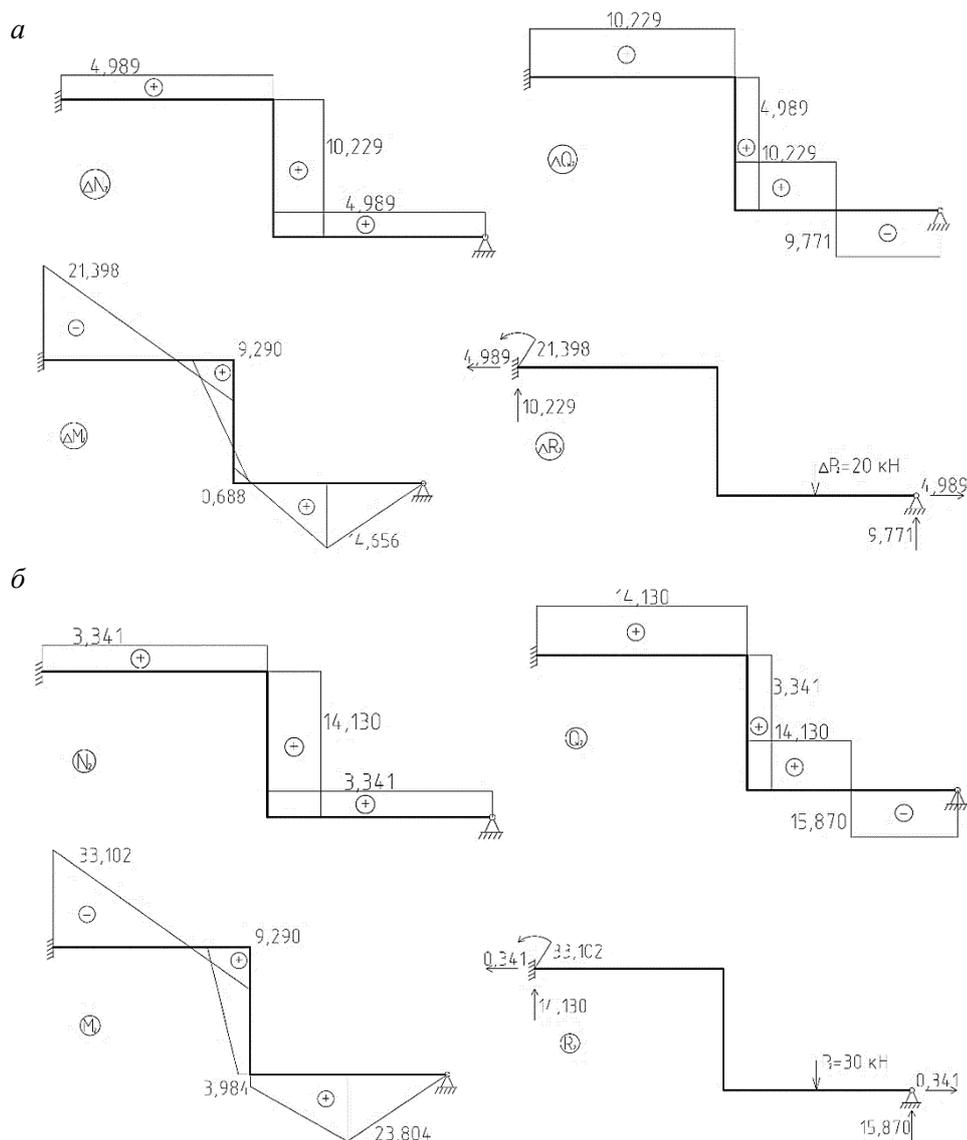


Рис. 5. Эпюры усилий и реакций на 2-м этапе:
 а – дополнительные приращения; б – полные значения
 Fig. 5. Diagrams of forces and reactions at the 2nd stage of loading:
 a – additional increments; b – full values

Предложенный алгоритм расчёта удобен при выполнении расчёта в ПК реконструируемых зданий и сооружений, а также зданий, выполняемых из сборно-монолитного железобетона.

Выводы

1. Применение МПЭ возможно при условии введения усилий, компенсирующих реакции отбрасываемого элемента.

2. Предложенный алгоритм предназначен для выполнения расчёта реконструируемых и сборно-монолитных зданий и сооружений в ПК, в основе которых заложен МКЭ. При этом учитываются конструктивные особенности, свойственные зданиям в процессе реконструкции и сборно-монолитным зданиям, – включение в процесс деформирования и восприятия нагрузки отдельных частей элементов поэтапно.

3. Выполняя расчёт, необходимо учитывать этапы монтажа, которые оказывают существенное влияние на формирование НДС зданий и сооружений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Перельмутер А.В.* Беседы о строительной механике. Москва : SCAD Soft : Изд-во АСВ, 2014. 250 с.
2. *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.
3. *Кабанцев О.В., Тамразян А.Г.* Учёт изменений расчётной схемы при анализе работы конструкции // *Инженерно-строительный журнал*. 2014. № 5. С. 15–26.
4. *Koyankin A.A., Mitasov V.M.* Stress-strain state of the precast monolithic bent element = Напряжённо-деформированное состояние сборно-монолитного изгибаемого элемента // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. № 97 (5).
5. *Семенюк С.Д., Москалькова Ю.Г.* Прочность и деформативность изгибаемых элементов, усиленных наращиванием сжатой зоны, при статическом и малоцикловом нагружении. Могилёв : Белорус.-Рос. ун-т, 2017. 274 с.
6. *Лазовский Д.Н.* Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. Новополоцк : ПГУ, 1998. 240 с.
7. *Коянкин А.А., Митасов В.М.* Напряжённо-деформированное состояние сборно-монолитного элемента с учётом загрузки сборной части // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021. Т. 23. № 3. С. 129–142.
8. *Кабанцев О.В., Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Перельмутер А.В.* Технология расчётного прогноза напряжённо-деформированного состояния конструкций с учётом истории возведения, нагружения и деформирования // *International scientific journal International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2011. № 7(3). С. 110–117.
9. *Перельмутер А.В., Кабанцев О.В.* Учёт изменения жёсткостей элементов в процессе монтажа и эксплуатации // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. № 1. С. 6–14.
10. *Мажид К.И.* Оптимальное проектирование конструкций. Москва : Высшая школа, 1979. 239 с.
11. *Коянкин А.А., Митасов В.М.* Оценка напряжённо-деформированного состояния сборно-монолитных конструкций с учётом процесса монтажа // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2016. № 4. С. 101–107.
12. *Nedviga E., Beresneva N., Gravit M., Blagodatskaya A.* Fire Resistance of Prefabricated Monolithic Reinforced Concrete Slabs of «Marko» Technology // *International scientific conference energy management of municipal transportation facilities and transport EMMFT 2017. Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018. V. 692. P. 739–749.
13. *Ефреюшин С.В., Макаров А.С.* Расчётный анализ эффективности усиления строительных конструкций, учитывающий стадийность включения дополнительных конструктивных элементов // *Строительная механика и конструкции*. 2020. № 4 (27). С. 26–37.
14. *Полоз М.А., Яссер Гариб Сами, Шевченко А.В.* Применение шагово-итерационного метода при расчёте изгибаемых предварительно напряжённых сборно-монолитных элементов с учётом физической нелинейности // *Строительные материалы и изделия*. 2019. Т. 2. № 3. С. 12–27.
15. *Сикорская О.В., Хегай А.О.* Сравнение эффективности усиления внецентренно сжатых железобетонных колонн при помощи сталефибробетона и железобетона методом двустороннего наращивания // *Вопросы науки и образования*. 2018. № 8 (20). С. 24–29.

REFERENCES

1. *Perelmuter A.V.* Conversations about structural mechanics. Moscow: SCAD. 2014. 250 p. (In Russian)
2. *Mkrtychev O.V., Andreev M.I., Sidorov D.S.* Analysis of forces in structures at construction stages. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksii i sooruzhenii*. 2018; 14 (4): 293–298. (In Russian)
3. *Kabantsev O.V., Tamrazyan A.G.* Changes in design scheme in analyzing structural operation. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal*. 2014; (5): 15–26. (In Russian)
4. *Koyankin A.A., Mitasov V.M.* Stress-strain state of the precast monolithic bent element. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 97 (5).
5. *Semenyuk S.D., Moskalkova Yu.G.* Strength and deformability of bent elements reinforced by compressed zone expansion under static low-cycle loads. Mogilev: Byelorussian-Russian University, 2017. 274 p. (In Russian)
6. *Lazovsky D.N.* Reinforcement of reinforced concrete structures of operating buildings. Novopolotsk, 1998. 240 p. (In Russian)
7. *Koyankin A.A., Mitasov V.M.* Stress-strain state of cast-in-place and precast structure with loaded cast-in-place element. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2021; 23 (3): 129–142. (In Russian)
8. *Kabantsev O.V., Karpilovsky V.S., Kriksunov E.Z., Perelmuter A.V.* Computational prediction of stress-strain state of structures with regard to erection, loading and deformation. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2011; 7 (3): 110–117.
9. *Perelmuter A.V., Kabantsev O.V.* Consideration of changes in the stiffness of elements during installation and operation. *Civil Engineering magazine*. 2015; (1): 6–14. (In Russian)
10. *Mazhid K.I.* Optimum structural design. Moscow: Vysshaya shkola, 1979. 237 p. (In Russian)
11. *Koyankin A.A., Mitasov V.M.* Stress-strain state of prefabricated monolithic structures during installation process. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo*. 2016; (4): 101–107. (In Russian)
12. *Nedviga E., Beresneva N., Gravit M., Blagodatskaya A.* Fire resistance of prefabricated monolithic reinforced concrete slabs of "Marko" technology. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2018; 692: 739–749.
13. *Efryushin S.V., Makarov A.S.* Computational analysis of building reinforcement effectiveness at stage-by-stage loading of additional structural elements. *Magazine of Civil Engineering*. 2020; 4 (27): 26–37. (In Russian)
14. *Poloz M.A., Yasser Garib Sami, Shevchenko A.V.* Step-iterative method in calculating bent prestressed cast-in-situ elements at physical nonlinearity. *Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2019; 2 (3): 12–27. (In Russian)
15. *Sikorskaya O.V., Hegai A.O.* Reinforcement efficiency of eccentrically loaded columns using steel-fiber concrete and reinforced concrete assessed by bilateral expansion method. *Voprosy nauki i obrazovaniya*. 2018; 8 (20): 24–29. (In Russian)

Сведения об авторе

Коянкин Александр Александрович, канд. техн. наук, доцент, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, KoyankinAA@mail.ru

Authors Details

Aleksandr A. Koyankin, PhD, A/Professor, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, KoyankinAA@mail.ru

Статья поступила в редакцию 17.01.2024
Одобрена после рецензирования 19.02.2024
Принята к публикации 01.03.2024

Submitted for publication 17.01.2024
Approved after review 19.02.2024
Accepted for publication 01.03.2024