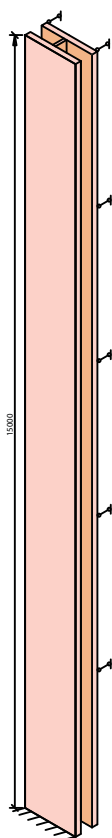


ГЛАВА СЕДЬМАЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КЛАДКИ С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ДИАФРАГМАМИ НА ПК С УЧЕТОМ ПОЭТАПНОСТИ И ДЛИТЕЛЬНОСТИ ВОЗВЕДЕНИЯ

7.1. Исследование напряженно-деформированного состояния кладки пространственных фрагментов без учета поэтапности возведения

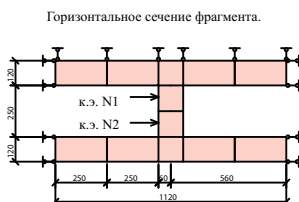
7.1.1. Методика проведения исследований



Целью проведенных исследований являлось:

- оценка влияния граничных условий;
- разработка на основе анализа полученных данных рекомендации по выбору расчетных схем многослойных стен при расчете численными методами или по упрощенным инженерным методам;
- оценка степени влияния температурно-влажностных воздействий, вертикальной и ветровой нагрузок;

Особенности напряженно-деформируемого состояния кладки многослойных стен изучались по результатам расчетов на ЭВМ методом конечных элементов различных фрагментов стен. Возможность применения метода конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния кирпичной кладки была показана во многих зарубежных и отечественных работах [7.1].



Рассчитывались пятиэтажные симметричные фрагменты трехслойной стены с вертикальными диафрагмами (рис. 7.1.1). Слои кладки образуют в плане двутавр. Полками двутавра служат наружный и внутренний слой толщиной 12 см, а стенкой — вертикальная диафрагма толщиной 12 см. Расстояние в све-

Рис. 7.1.1. Расчетная схема фрагмента стены из трехслойной кладки с вертикальными диафрагмами

ту между слоями кладки составляет 31 см. По границам рассчитываемого фрагмента назначались связи, ограничивающие горизонтальные перемещения в плоскости стен.

С целью учета влияния внецентренного приложения нагрузки кладка наружного и внутреннего слоев и вертикальной диафрагмы аппроксимировалась объемными конечными элементами.

Размеры по высоте конечных элементов в различных фрагментах принимались от 0,2 до 3,0 м.

Модули упругости принимались постоянными и переменными по высоте.

Фрагменты рассчитывались на следующие нагрузки:

- вертикальную от перекрытий;
- от собственного веса кладки;
- температурные.

Расчеты на вертикальные и горизонтальные нагрузки, температурно-влажностные воздействия выполнялись отдельно. В каждом случае принимался свой модуль деформаций кладки в зависимости от вида воздействия.

7.1.2. Анализ результатов расчетов

На рис. 7.1.2 в качестве примера показаны эпюры касательных напряжений, возникающих в диафрагме фрагментов с высотой конечных элементов 0,25 и 1,5 м. Прикладывалась нагрузка от собственного веса стен и перекрытий. Принимался длительный модуль деформаций кладки (с учетом ползучести кладки). Для кладки наружного слоя и диафрагмы из керамического кирпича

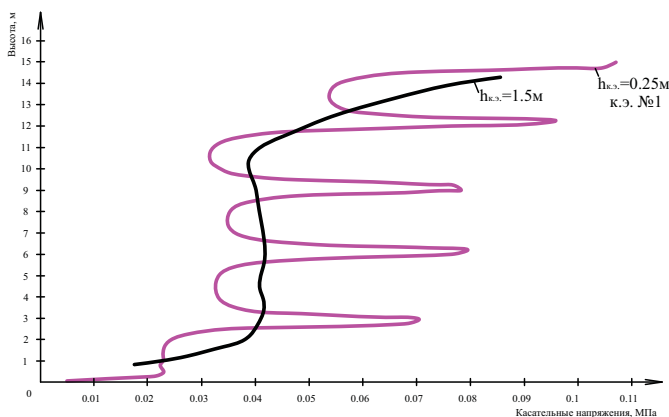


Рис. 7.1.2. Эпюры касательных напряжений в диафрагме от вертикальной нагрузки

модуль деформаций равен 5110 МПа, для кладки внутреннего слоя из кирпича полусухого прессования – 1430 МПа.

Анализ расчетов этого и других фрагментов показал следующее. Касательные напряжения по высоте стены в диафрагме значительно отличаются. При приложении нагрузки в уровне перекрытий напряжения также значительно отличаются по высоте стены в пределах одного этажа. В уровне нижних и средних этажей напряжения под перекрытиями примерно в два раза выше, чем в середине этажа.

Характер эпюр фрагментов с мелкой разбивкой на конечные элементы и фрагментов с конечными элементами высотой на пол-этажа в целом совпадает при самонесущих стенах. При приложении нагрузки от перекрытий, эпюра касательных напряжений при разбивке на пол-этажа получается сглаженной в уровне средних этажей. Там напряжения отличаются от максимальных значений при мелкой разбивке в нижнем и средних этажах примерно на 70%.

На рис. 7.1.3. показаны эпюры касательных напряжений, возникающих в диафрагме от действия температуры, приложенной к наружному слою. Температурные напряжения, полученные при мелкой и крупной разбивке на конечные элементы, в уровне нижних и средних этажей незначительны. В уровне верхнего этажа при мелкой разбивке напряжения в 1,6 раза выше, чем при высоте элементов на пол-этажа.

Из сравнения эпюр на рис. 7.1.2 и 7.1.3 видно, что максимальные касательные напряжения в обоих случаях развиваются

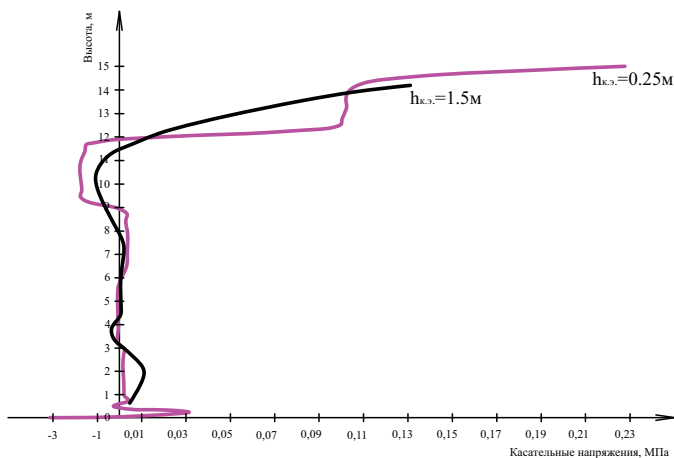


Рис. 7.1.3. Эпюры касательных напряжений в диафрагме от температуры

в уровне верхнего этажа. Величины напряжений в обоих случаях сопоставимы по величине.

При расчете по упрощенным инженерным методикам учет неравномерности касательных напряжений может осуществляться путем введения соответствующих поправочных коэффициентов.

7.2. Исследование напряженно-деформированного состояния кладки пространственных фрагментов с учетом поэтапности возведения

7.2.1. Методика проведения исследований

В процессе строительства происходит непрерывное изменение расчетной схемы стен и всего здания в целом за счет возведения новых этажей, а также вертикальной нагрузки на здание, которая постоянно увеличивается. В течение всего периода строительства, а также в первые несколько лет эксплуатации происходит заметное увеличение модуля упругости кладки за счет твердения раствора в швах.

Проводимые ранее исследования [7.2] показали важность учета поэтапности и длительности возведения зданий при определении напряженно-деформированного состояния кирпичных стен.

Целью настоящих исследований являлось:

- установить влияние на изменение напряженно-деформированного состояния многослойных стен с вертикальными диафрагмами таких факторов, как учет поэтапности и длительности возведения, ползучести и старения кладки;
- на основе анализа полученных данных разработать рекомендации по выбору расчетных схем многослойных стен при расчете численными методами или по упрощенным методикам.

7.2.2. Расчетные схемы фрагмента, рассчитываемого на вертикальные нагрузки с учетом поэтапности возведения

В качестве примера рассчитывался пятиэтажный симметричный фрагмент трехслойной стены с вертикальными диафрагмами. Слои кладки образуют в плане двутавр. Полками двутавра служат наружный и внутренний слои толщиной 12 см, а стенкой — вертикальная диафрагма толщиной 12 см. Расстояние в свету между слоями кладки составляет 31 см. Благодаря симметрии фрагмента рассчитывался фрагмент с П-образным в плане сечением, состав-

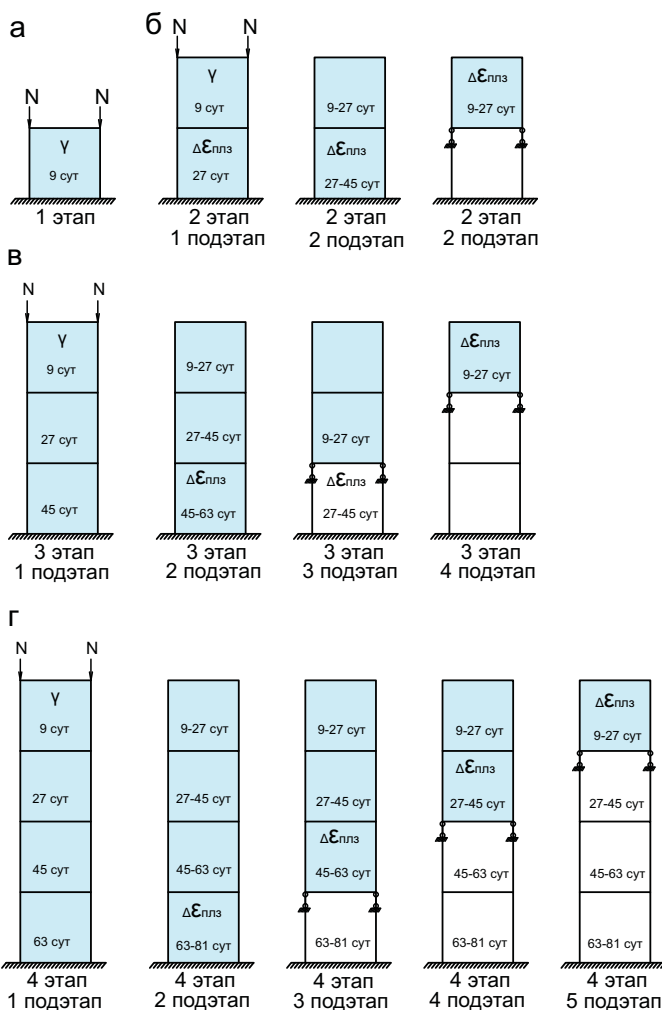


Рис. 7.2.1. Этапы расчета пятиэтажного фрагмента стены из многослойной кладки с вертикальными диафрагмами: а – 1-й этап; б – 2-й этап; в – 3-й этап; г – 4-й этап

ляющим половину от всего фрагмента. По границам рассчитываемого фрагмента назначались связи, ограничивающие горизонтальные перемещения в плоскости стен, а также вращение вокруг горизонтальных осей симметрии фрагмента. В уровне перекрытий ограничивались перемещения внутреннего слоя из его плоскости [7.3].

Расчет производился на ПК методом конечных элементов в несколько этапов. Были приняты следующие допущения:

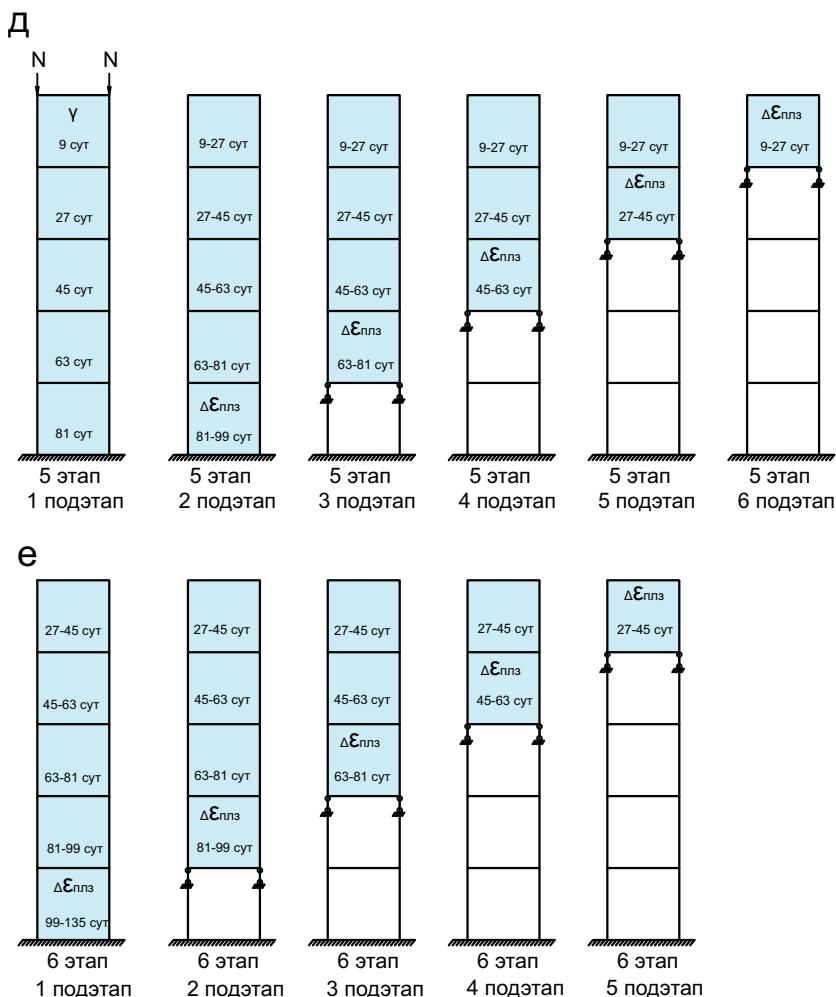


Рис. 7.2.1 (продолжение). Этапы расчета пятиэтажного фрагмента стены из многослойной кладки с вертикальными диафрагмами: д – 5-й этап; е – 6-й этап

- упругие деформации от веса стен и перекрытий одного этажа протекают к моменту его окончания;
- деформации ползучести кладки вновь возведенного этажа начинают развиваться с момента окончания его возведения;
- на напряженно-деформированное состояние кладки какого-либо этажа влияют также деформации ползучести нижележащих этажей;
- после окончания возведения стены на напряженно-деформи-

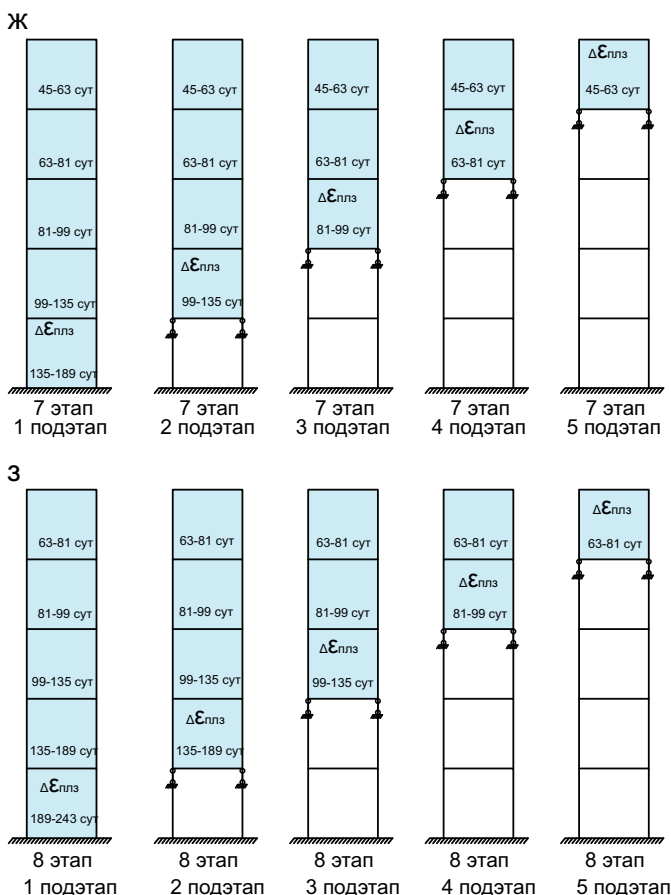


Рис. 7.2.1 (продолжение). Этапы расчета пятиэтажного фрагмента стены из многослойной кладки с вертикальными диафрагмами: ж – 7-й этап; з – 8-й этап

рованное состояние кладки какого-либо этажа влияют только деформации ползучести кладки рассматриваемого и нижележащих этажей.

Возведению каждого этажа соответствовал один этап расчета. Каждый этап разбивался на подэтапы. Количество подэтапов равнялось количеству возведенных к моменту окончания этапа этажей. После окончания возведения стены расчет производился на несколько этапов, соответствующих разным периодам времени после окончания возведения стены. На каждом из этих этапов принималось по пять подэтапов соответственно количеству этажей возведенной стены. Схема разбивки расчета на этапы приведена на рис. 7.2.1.

Слои кладки аппроксимировались объемными восьмиузловыми конечными элементами, а вертикальной диафрагмы – конечными элементами плоской оболочки.

Время строительства одного этажа принималось равным 18 суткам.

7.2.3. Нагрузки

На 1-м подэтапе первых пяти этапов к внутреннему слою верхнего этажа прикладывалась нагрузка от собственного веса кладки $N_{i,вн}^o$ и перекрытия над ним $N_{i,вн,пер}^o$. К наружному слою кладки на 1-м подэтапе первых пяти этапов прикладывалась нагрузка от собственного веса кладки $N_{i,нар}^o$. На втором подэтапе прикладывались эквивалентные температурные нагрузки $\Delta T_z^{ЭК}$ и $\Delta T_x^{ЭК}$, вызывающие в этаже, к которому они приложены, деформации $\Delta \varepsilon_z^{nлз}$ и $\Delta \varepsilon^{nлз}$. Эти деформации равны деформациям ползучести кладки за период возведения верхнего для данного этапа расчета этажа от напряжений, действующих в кладке к началу этапа:

$$\left. \begin{aligned} \Delta T_{xi}^{ЭК} &= \Delta \varepsilon_{xi}^{nлз} / \alpha_t \\ \Delta T_{zi}^{ЭК} &= \Delta \varepsilon_{zi}^{nлз} / \alpha_t \end{aligned} \right\}, \quad (7.2.1)$$

где $\Delta \varepsilon_{xi}^{nлз}$, $\Delta \varepsilon_{zi}^{nлз}$ – деформации ползучести кладки i -го этажа на рассматриваемом этапе за период возведения верхнего на данном этапе расчета этажа; α_t – коэффициент линейного расширения кладки.

Объемная масса кладки из полнотелого кирпича внутреннего слоя принималась равной $1,8 \text{ т/м}^3$, наружного слоя и диафрагмы из пустотелых камней – $1,4 \text{ т/м}^3$. Нагрузка от перекрытий прикладывалась к объемным элементам внутреннего слоя с учетом неравномерности распределения напряжений под плитой перекрытия. Суммарное усилие, прикладываемое к внутреннему слою от перекрытия одного этажа, равнялось $0,25 \text{ МН}$.

7.2.4. Методика определения напряженно-деформированного состояния стен, вызванного нагрузкой на стены и деформациями ползучести

Напряженное состояние в кладке i -го этажа на m -ом этапе складывалось из напряжений от нагрузки N_m^o , прикладываемой к верхнему этажу, и напряжений, вызванных деформациями ползучести:

$$(\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz})_{i,m} = (\sigma_x^N, \sigma_z^N, \tau_{xz}^N)_{i,m} + \sum_{j=1}^{i-1} (\sigma_x^j, \sigma_z^j, \tau_{xz}^j)_{i,m}, \quad (7.2.2)$$

где $\sigma_x^N, \sigma_z^N, \tau_{xz}^N$ — напряжения в кладке i -го этажа от нагрузки N_m^0 на слой верхнего на m -ом этапе расчета этажа; $\sigma_x^j, \sigma_z^j, \tau_{xz}^j$ — напряжения в кладке i -го этажа от деформаций ползучести j -го этажа ($i \geq j$) на m -ом этапе.

Полные напряжения в стенах i -го этажа после m этапов равны сумме напряжений, полученных для каждого из этапов расчета:

$$(\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz})_i = \sum_{k=1}^m (\sigma_x, \sigma_z, \tau_{xz})_{i,k}. \quad (7.2.3)$$

Аналогично могут определяться вертикальные и горизонтальные деформации кладки слоев стены и диафрагмы после m этапов расчета:

$$(\varepsilon_x, \varepsilon_z)_i = \sum_{k=1}^m (\varepsilon_x, \varepsilon_z)_{i,k}. \quad (7.2.4)$$

7.2.5. Деформационные характеристики кладки

Модуль упругости кладки на каждом этапе принимался с учетом ее возраста по формуле С.В. Полякова [6.2]:

$$E_{дл} = \varphi_{D,28} \cdot m_{расч} \cdot E_{28}^0, \quad (7.2.5)$$

где $\varphi_{D,28} = [250 + 147\sqrt{(D R_{2,28})} - 7,5 D R_{2,28}] / [250 + 120\sqrt{(R_{2,28})} - 5 D R_{2,28}]$;

D — коэффициент, зависящий от длительности твердения раствора:

$$D = 2 - e^{-0,1t^{0,67}} - e^{-0,0045t^{0,67}};$$

$R_{2,28}$ — предел прочности раствора в возрасте 28 суток;

$$E_{28}^0 = \alpha \cdot R_u - \text{модуль упругости кладки в возрасте 28 суток};$$

$$m_{расч} = R_u / R_{28};$$

$$R_t = \nu A R_j;$$

R_j — предел прочности кирпича на сжатие;

$$\nu = (0,35 + 4,87 D R_{2,28} / R_j) / (1,35 + 4,87 D R_{2,28} / R_j);$$

α — упругая характеристика кладки;

R_u — временное сопротивление кладки сжатию, определяемое по [1.5].

7.2.6. Методика определения деформаций ползучести кладки

За период строительства верхнего на m -ом этапе расчета этажа деформации ползучести кладки i -го этажа определялась на каждом подэтапе по формуле:

$$\Delta \varepsilon_{i,m}^{плз} = \varepsilon_{i,m}^{плз} - \varepsilon_{i,m-1}^{плз}, \quad (7.2.6)$$

где $\varepsilon_{i,m}^{плз}$ и $\varepsilon_{i,m-1}^{плз}$ — деформации ползучести кладки i -го этажа соответственно на m -ом и $(m-1)$ — м этажах, определяемые по формуле (6.2.1) при коэффициенте p , зависящем от соотношения между вертикальными и горизонтальными напряжениями и согласно [6.1] равно:

$$p = 7 \text{ при } \frac{\sigma_z}{\sigma_x} < 0,5 \text{ и } p = 3 \text{ при } \frac{\sigma_z}{\sigma_x} < 0,5. \quad (7.2.7)$$

7.2.7. Напряженное состояние в слоях фрагмента от вертикальной нагрузки

По описанной выше методике были определены напряжения в слоях и диафрагме фрагмента на каждом подэтапе расчета, а также суммарные их величины после каждого этапа расчета. По этим значениям построены эпюры вертикальных усилий N_z , действующих после каждого из пяти этапов. На рис. 7.2.2, кроме этих эпюр, приведены эпюры усилий N_z^0 , построенные в предположении раздельной работы слоев. Из сравнения этих эпюр видно, что внутренний слой, являющийся более загруженным и выполненным из более деформируемого материала, разгружается.

В значительной степени перераспределению усилий между слоями стены способствуют деформации ползучести кладки. Выравнивание эпюр вертикальных напряжений σ_z продолжается и после окончания строительства, когда все изменение напряженного состояния обусловлено в нашем случае ползучестью кладки.

Таким образом, **деформации ползучести способствуют разгрузке более деформируемого и загрузке менее деформируемого слоя стены.**

Величины усилий ΔN , перераспределяемых между слоями, равны разности между усилиями N^0 , подсчитанными в предположении раздельной работы слоев, и фактическими усилиями N . Эпюра усилий ΔN является практически прямолинейной. В рассчитываемом примере **величины усилий $\Delta N^{ок}$, перераспределившие-**

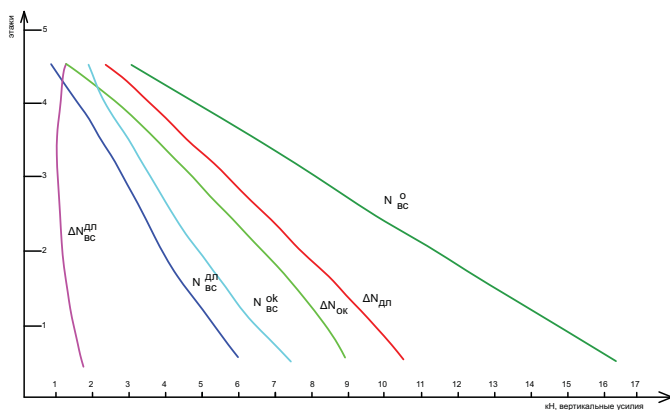


Рис. 7.2.2. Эпюры вертикальных усилий во внутреннем слое стены от вертикальной нагрузки. Пятиэтажный фрагмент. Расчеты на ПК с учетом поэтапности возведения

ся между слоями на момент окончания возведения стены, составляют 45% от усилий, подсчитанных в предположении раздельной работы слоев. После окончания возведения стены перераспределение усилий между слоями существенно меньше. Величины перераспределяемых усилий мало отличаются между собой по высоте стены. Однако, если в нижнем этаже усилия $\Delta N^{OK-ДЛ}$ составляют только 20% от усилий ΔN^{OK} , то в верхнем этаже они сопоставимы по величине.

Следует отметить, что влияние деформаций ползучести на перераспределение усилий во многом зависит от длины стен. В работе [7.2] приведен пример расчета двух протяженных, пересекающихся между собой стен. Там выравнивание вертикальных напряжений во многом произошло за счет деформаций ползучести уже после окончания возведения стен. В приведенном там примере в середине пятого этажа 2/3 вертикальных усилий возникли вследствие ползучести кладки нижних этажей, развившихся с момента окончания строительства здания.

Касательные напряжения в отдельно стоящих стенах очень незначительны и поэтому в нашем случае возникают в основном вследствие совместной работы слоев. *Эпюры касательных напряжений, подсчитанных с учетом и без учета поэтапности возведения стены, значительно различаются между собой.* На рис. 7.2.3 изображены эпюры касательных напряжений τ , действующих в серединах этажей в процессе возведения стены, а также спустя месяц после окончания строительства.

С момента окончания строительства в наибольшей мере воз-

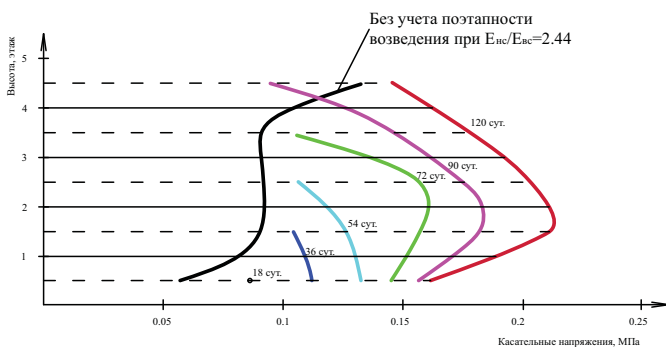


Рис. 7.2.3. Эпюры касательных напряжений в диафрагме в уровне середины этажей, построенные с учетом поэтапности и длительности возведения

росли напряжения в верхнем этаже (в 1,5 раза). В нижнем этаже касательные напряжения выросли незначительно. Максимальные касательные напряжения развились в уровне второго этажа и выросли на 17% с момента окончания возведения стены.

Интересно отметить, что **срез лицевого слоя кирпичной кладки многослойных стен часто происходит в уровне первого—второго этажей, т.е. там, где касательные напряжения в ряде случаев оказываются наибольшими.**

На том же рисунке изображены эпюры напряжений τ , подсчитанных на момент окончания строительства без учета поэтапности возведения стены. Характер эпюр очень разный. В уровне второго этажа напряжения в 2,3 раза меньше полученных с учетом поэтапности возведения.

Выводы

1. Характер эпюр касательных напряжений в вертикальных диафрагмах фрагментов с мелкой разбивкой на конечные элементы и фрагментов с конечными элементами высотой на пол этажа в целом совпадает при самонесущих стенах. В случае приложения нагрузки от перекрытий эпюра касательных напряжений при разбивке на пол этажа получается сглаженной в уровне средних этажей.

2. При расчете по упрощенным инженерным методикам учет неравномерности касательных напряжений может осуществляться путем введения соответствующих поправочных коэффициентов.

3. Деформации ползучести способствуют разгрузке более деформируемого и загрузке менее деформируемого слоя стены.

4. Величины вертикальных усилий $\Delta N^{ок}$, перераспределившиеся между слоями на момент окончания возведения стены, составляют 45% от усилий, подсчитанных в предположении раздельной работы слоев. После окончания возведения стены перераспределение усилий между слоями существенно меньше. Величины перераспределяемых усилий мало отличаются между собой по высоте стены. Однако, если в нижнем этаже усилия $\Delta N^{ок-дл}$ составляют только 20% от усилий $\Delta N^{ок}$, то в верхнем этаже они сопоставимы по величине.

5. В средних этажах касательные напряжения, подсчитанные с учетом поэтапности возведения стен, могут в 2,5 раза превысить напряжения, подсчитанные без такого учета. В верхнем этаже величины этих напряжений отличаются незначительно.

6. С момента окончания строительства в наибольшей мере возросли напряжения в верхнем этаже (в 1,5 раза). В нижнем этаже касательные напряжения выросли незначительно. Максимальные касательные напряжения развились в уровне второго этажа и выросли на 17% с момента окончания возведения стены.