

Влияние температуры замыкания при возведении на напряжения в несущих конструкциях

Инженер ГОУ СПбГПУ А.И. Снегирев,
д.т.н., профессор, декан ИСФ ГОУ СПбГПУ А.И. Альхименко*

В современных условиях потребность в зданиях и инженерных сооружениях различного назначения постоянно возрастает. Весьма востребованными оказываются монолитные сооружения. При этом бетон и железобетон остаются основными материалами жилищно-культурного, промышленного, энергетического, дорожно-транспортного, сельскохозяйственного и других видов строительства.

Железобетон представляет собой строительный материал, в котором выгодно сочетается совместная работа бетона и стали.

Идея сочетания в железобетоне этих двух крайне отличающихся механическими свойствами материалов базируются на следующем. Бетон, как и всякий каменный материал, хорошо сопротивляется сжимающим нагрузкам, но слабо противодействует растягивающим напряжениям: прочность бетона при растяжении примерно в 10-15 раз меньше прочности при сжатии.

Для создания более комфортных условий для проживания в ряде случаев используются экологически чистые материалы, таких как, например, кирпич. Благодаря применению в качестве материала наружных несущих стен кирпича появляется возможность в достаточно значительной степени повысить экологичность будущего жилья. При этом мы имеем дело с рядом других факторов, которые свидетельствуют как о конструктивной целесообразности, так и об экономической эффективности при строительстве. Конструктивно появляется возможность уйти от использования в качестве наружного вертикального несущего элемента колонн, тем самым обеспечивается возможность получить внутреннюю поверхность стен без выступов. Это приводит к увеличению полезной площади и возможности более свободной планировки. Как следствие, строительная компания при той же площади застройки получает увеличение площади жилого здания.

Вопросы расчета зданий и сооружений на температурные воздействия рассматривали такие ученые, как Н.Н. Пантелеев, А.Л. Свиначук, В.В. Кажарский, Н.В. Новицкий, В.Л. Береснев, Г.В. Несветаев, И.А. Зинов, Л.Н. Белобородова, Н.А. Сложеникина, М.И. Зборовская, Э. Ямб, в том числе и профессор ГОУ СПбГПУ В.Д. Кузнецов. В кандидатской диссертации А.Л. Свиначука акцент сделан на проектирование самонесущих стен из каменной кладки с учетом температурного перепада от воздействия солнечной радиации. Несколькими годами ранее И.А. Зинов в кандидатской диссертации обратил внимание на проблему стойкости и деформаций высокопрочного бетона при циклических температурных воздействиях.

СНиП 2.03.04-84 не учитывает в полной мере температурные воздействия на возводимое здание. Основной задачей приведенного нормативного документа является формулировка методики расчета зданий только в условиях высоких температур. Нашей задачей было совершенствование методики расчета на основе установленных новых закономерностей. Это позволило разработать рекомендации по данному методу расчета и учесть влияние знакопеременных температурных воздействий на железобетонный каркас многоэтажного здания в процессе его строительства, учитывающее технологию строительства.

Температурные воздействия на строительные конструкции могут иметь самое разнообразное происхождение, но чаще всего рассматриваются климатические температурные воздействия и технологические температурные воздействия.

Нагрев или охлаждение конструктивного элемента создает в нем некоторое температурное поле, которое представляет собой функцию координат рассматриваемой точки. Это поле в поперечном сечении удобно представлять в виде четырех составляющих [9]:

- 1) средней температуры t , равномерно распределенной по сечению, создающей общее удлинение/укорочение элемента, которому соответствует продольная сила N ;
- 2) температуры, меняющейся по линейному закону относительно оси z , имеющей в пределах сечения перепад температур и искривляющей стержень, причем роль соответствующей ей обобщенной силы играет момент M_z ;
- 3) то же, но относительно оси y , с моментом M_y ;
- 4) нелинейного самоуравновешенного «остатка».

К температурным воздействиям, используемым в прочностных расчетах, относятся только первые три компоненты, поскольку самоуравновешенное поле температур вызывает в стержне лишь бимоменты высоких порядков, которые обычно не учитываются.

Снегирев А.И., Альхименко А.И. Влияние температуры замыкания при возведении на напряжения в несущих конструкциях

При определении поля температур обычно используется упрощение о том, что это поле не зависит от напряженно-деформированного состояния конструкции, хотя в отдельных случаях это предположение может и не выполняться, поскольку теплопроводность некоторых материалов зависит от их напряженного состояния.

Конструкции, напряженное и деформированное состояние которых определяется главным образом осевыми температурными деформациями элементов (например, каркас здания), рассчитываются на Δt – изменение во времени средней по сечению температуры конструкции по отношению к начальной температуре t_0 .

Конструкции, в которых, кроме того, важна оценка напряжений и деформаций, возникающих вследствие неравномерного распределения температуры по сечению (например, стены здания), в ряде случаев рассчитываются на u – перепад температуры по сечению.

Для определения Δt и u устанавливаются два неблагоприятных значения средних температур конструкций и перепадов температуры по сечению в наиболее теплый (июль) и наиболее холодный (январь) месяцы года, а также начальная температура t_0 .

Температура замыкания

Температурные усилия возникают только в статически неопределимых конструкциях. Для систем с одной лишней связью эти усилия возникают после превращения конструкции в статически неопределимую (после замыкания системы), которое реализуется при некоторой температуре t_0 (температуре замыкания системы). Тогда температурные воздействия, возникающие после замыкания конструкций, определяются разностью между экстремальными температурами воздуха и температурой замыкания:

$$\begin{cases} \Delta t_+ = t_{\max} - t_0 \\ \Delta t_- = t_{\min} - t_0 \end{cases} \quad (1)$$

Однако большинство конструкций относится к системам с несколькими лишними связями, замыкание которых распределяется по времени. Для конструкций этого типа не существует температуры замыкания, выраженной каким-либо одним числом, которой соответствовали бы нулевые начальные усилия. Уже в процессе монтажа возникают температурные деформации и усилия, зависящие как от температурных условий, так и от последовательности монтажа.

Характерный пример рассмотрен в работе [1], где приведены результаты расчетов усилий, возникающих при монтаже регулярной многопролетной рамы в предположении, что сборка производится в направлении слева направо с постоянной скоростью, так, что моменты замыкания отдельных пролетов разделены равными интервалами времени.

На рис. 1 показаны эпюры моментов в стойках рамы и значения N_{\max} , максимального по пролетам усилия в ригеле, который считается бесконечно жестким. Как видно, усилия меняются достаточно сложным образом, что связано с изменением расчетной схемы сооружения во времени, изменениями знаков моментов, а также с тем, что максимальные моменты не обязательно возникают в крайних колоннах.

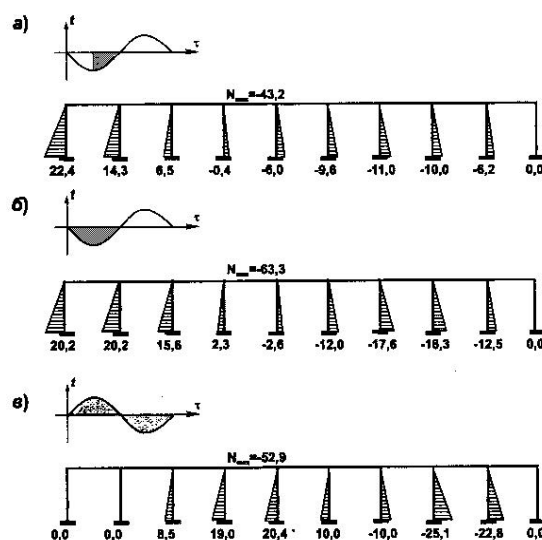


Рисунок 1. Начальные усилия, возникающие при окончании замыкания рамы в апреле при длительности монтажа 3, 6, 12 месяцев

Поскольку начальные усилия, возникающие в процессе монтажа, имеют обычно меньшие значения, чем температурные усилия после полного замыкания системы, и поскольку при многоступенчатом процессе замыкания происходит сглаживание кратковременных всплесков температуры, то допустимо приближенно принимать в качестве температуры замыкания некоторое значение, являющееся средним за период строительства. На стадии проектирования сооружения фактическая продолжительность возведения и условия его замыкания обычно неизвестны, поэтому в качестве средней температуры конца замыкания часто принимают среднегодовую температуру.

В СНиП 2.01.07-85* используется предположение, что можно пренебречь колебаниями температуры с суточным периодом и колебаниями среднесуточных температур.

Считая, что среднегодовая температура примерно равна полусумме температур января и июля, t_I и t_{VII} , в [9] получены следующие температуры замыкания:

$$\begin{cases} t_0^T = \frac{t_{VII} + t_I}{2} + \frac{t_{VII} - t_I}{\pi} \approx 0,8t_{VII} + 0,2t_I \\ t_0^X = \frac{t_{VII} + t_I}{2} - \frac{t_{VII} - t_I}{\pi} \approx 0,2t_{VII} - 0,8t_I \end{cases} \quad (2)$$

Так, для Санкт-Петербурга эти значения соответственно равны: $t_0^T = 12,68^\circ C$, $t_0^X = 9,8^\circ C$.

В расчетах конструкций необходимо учитывать длительность действия временных температурных нагрузок, если продолжительность их действия достаточна для проявления влияния на прочностные и деформационные свойства материалов, на образование трещин и их раскрытие, на снижение долговечности конструкций. Так, расчет железобетонных и бетонных конструкций по прочности, по деформациям и по раскрытию трещин производится с учетом влияния длительного действия нагрузок. При этом усилия определяются с учетом неупругих деформаций бетона, арматуры и наличия трещин. Учет всех этих факторов обязателен при определении усилий, возникающих от изменения температуры.

Температурные климатические воздействия обусловлены изменениями температуры воздуха, в которых имеются вполне закономерные периодические колебания с годовым и суточным периодом. На периодические колебания накладываются случайные колебания, связанные с изменением погоды на небольших отрезках времени (несколько дней). Колебания температуры с суточным периодом и случайные погодные колебания можно отнести к кратковременным. Исключить их можно сглаживанием. Сглаженная функция изменения температуры воздуха с годовым периодом близка к гармоническому закону и в наиболее неблагоприятные периоды изменяется плавно. Заметная разница значений температуры в эти периоды ощущается в интервалах в два-три месяца. Этот интервал будет в дальнейшем учтен при постановке расчетных задач.

Сглаженная функция изменения температуры воздуха, построенная по многолетним среднемесячным данным, применяется в качестве длительного процесса в расчетах. Этот же принцип положен в основу редакции СНиП «Нагрузки и воздействия» [3].

Расчет конструкций выполнялся с помощью проектно-вычислительного комплекса SCAD.

При расчете конструкции на климатические температурные воздействия было произведено моделирование расчетных ситуаций, меняющихся в процессе возведения здания. Так были учтены сезонные перепады температур, и в качестве температур замыкания конструкций отдельных этажей принималось значение, вычисленное как среднее за три месяца строительства, при этом была задана скорость строительства – один этаж в месяц. Каждая модель отражает изменение в работе конструкций с шагом в три месяца, за исключением первой и последней моделей. Таким образом, были созданы пять расчетных задач, для которых назначены собственные полезные нагрузки, температурное воздействие, прочие нагрузки.

При моделировании была учтено технологическое исполнение перекрытий как сборных: каждая плита смоделирована отдельным конечным элементом и учтен шов между плитами.

Построение расчётной схемы осуществлялось с помощью алгоритмов комплекса SCAD Office. Среди особенностей расчётной схемы, помимо прочих, можно выделить следующие.

1. Присутствие в конструктивной схеме здания ядер диафрагм жёсткости.
2. Все задачи решались без учёта нелинейности.
3. При расчете не учитывалась анизотропность кирпичной кладки. Расчет жесткости кирпичной кладки произведен на основании СНиП [4].
4. Не учитывалась релаксация кирпичной кладки, то есть перераспределение напряжения в ней в результате ползучести и других физико-механических процессов.

К прочим можно отнести все пренебрежения и упрощения, присущие МКЭ и алгоритмам программы SCAD, являющиеся одинаковыми для любой подобной задачи.

В расчетной схеме применены следующие типовые элементы: стержни (10 – универсальный стержень с шестью степенями свободы), оболочки (42, 44 – с шестью степенями свободы), связи конечной жесткости (51), упругие связи (55) – согласно наименованиям, принятым в ПК SCAD.

В рамках данного исследования были произведены расчеты пяти схем на пространственное действие температурного воздействия (по всему полю стенового ограждения). В задачах исследуются внутренние усилия в наружных кирпичных стенах. Для удобства сравнения выбраны две стены, принципиально различающиеся по наличию оконных проемов, то есть с оконными проемами и «глухая» стена. При этом следует отметить, что сравнение наиболее показательно при изучении фрагментов схемы, расположенных в нижних этажах, так как они присутствуют во всех расчетных схемах.

Принцип построения расчетных схем заключается в предположении равномерной скорости возведения зданий. При этом начало строительство условно намечено на декабрь. Средняя скорость возведения одного этажа – 1 месяц.

Расчет температурного воздействия

В данной задаче температурная нагрузка действует по всему полю. Таким образом, произведен расчет на пространственное действие температурного воздействия. При задании численных значений воздействия учитывались следующие факторы.

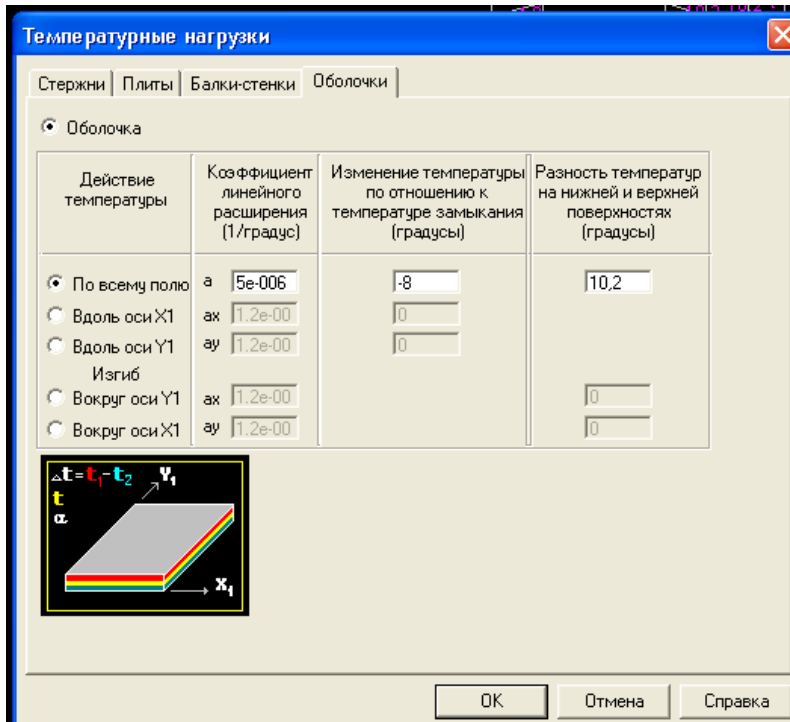
- Период возведения каждого из расчетных участков схемы. Расчетный участок – в общем случае 3 этажа здания. При этом за температуру замыкания участка принята средняя за период его возведения температура воздуха, принятая по СНиП.
- Коэффициент линейного расширения принят по нормативным данным и равен для кирпичной кладки $\alpha_t = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$.
- За температуру расчета принята температура замыкания следующего участка. Данное допущение принято на основании скорости возведения и сезонного изменения температуры окружающей среды.

Значения заданных нагрузок приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения температурных нагрузок, заданных в ПК SCAD для расчета конструкции

1	Расчетное время	Температура замыкания	Разность температуры расчета и температуры в помещении	Разность температуры расчета и температуры замыкания				
				этажей 1-4	этажей 5-7	этажей 8-10	этажей 11-13	этажей 14-17
2	3	4	5	6	7	8	9	
РЗ-1 4 этажа	Весна. Апрель. Температура апреля +3,1°C	Температура замыкания этажей 1-3 январь -7,8°C	0°C	+10,9°C	-	-	-	-
РЗ-2 7 этажей	Лето. Июль. Температура июля +17,8°C	Температура замыкания этажей 4-6 апрель +3,1°C	0°C	+25,6°C	+14,7°C	-	-	-
РЗ-3 10 этажей	Осень. Октябрь Температура октября +4,9°C	Температура замыкания этажей 7-9 июль +17,8°C	0°C	+12,7°C	+1,8°C	-12,9°C	-	-
РЗ-4 13 этажей	Зима. Январь Температура января -7,8°C	Температура замыкания этажей 10-12 октябрь +4,9°C	0°C	0°C	-10,9°C	-25,6°C	-12,7°C	-
РЗ-5 17 этажей	Весна. Май Температура мая +9,8°C	Температура замыкания этажей 13-16 февраль -7,8°C	+10,2°C (температура в помещении +20 °C)	+17,6°C	+6,7°C	-8,0°C	+4,9°C	+17,6°C

2.а



2.б

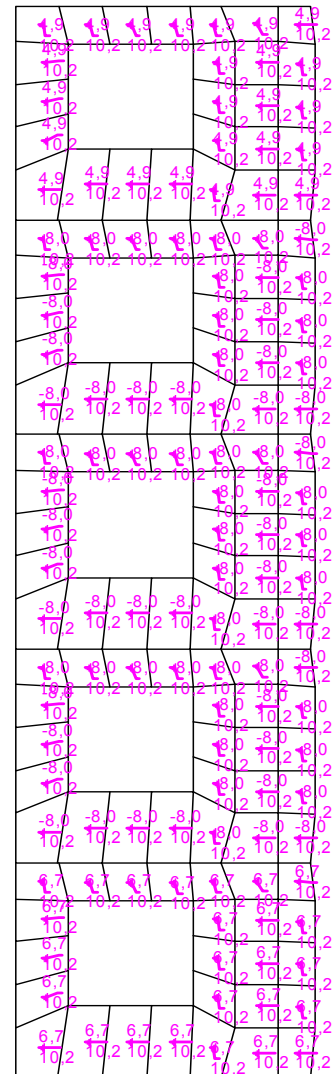


Рисунок 2. Пример задания температурной нагрузки: 2.а – задание численных параметров, 2.б – отображение на расчетной схеме

Влияние температурной нагрузки на общее напряженное состояние конструкции

Для иллюстрации вклада температурного воздействия в общее напряженно-деформированное состояние конструкции выбрано отображение полей напряжений в исследуемых стенах. В табл. 2 представлены экстремальные значения напряжений в кирпичных стенах для каждой из принятых расчетных схем. Как видно из результатов, максимальные значения не всегда проявляются в расчетной схеме, соответствующей окончанию строительства. В некоторых случаях экстремумы имеют место и в середине строительства конструкции. Для более наглядного отображения результатов представлены графики (рис. 3, 4).

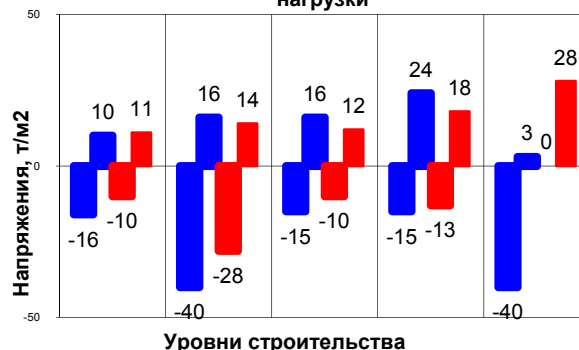
Таблица 2. Максимальные напряжения в кирпичных стенах, вызванные температурным воздействием

1	Значения напряжений, T / M^2 ($\frac{\text{минимальные}}{\text{максимальные}}$)							
	Перфорированная стена толщиной 640мм				Сплошная кирпичная стена толщиной 640мм			
	$S_{y-верх}$	$S_{y-низ}$	$S_{x-верх}$	$S_{x-низ}$	$S_{y-верх}$	$S_{y-низ}$	$S_{x-верх}$	$S_{x-низ}$
РЗ-1 3 этажа	-17 8	-5 12	-8 7	-4 6	-10 11	-16 10	-11 9	-18 16
РЗ-2 6 этажей	-11 16	-12 22	-6 7	-14 8	-28 14	-40 16	-17 12	-12 46
РЗ-3 9 этажей	-15 23	-6 9	-3 5	-7 7	-10 12	-15 16	-7 10	-20 12
РЗ-4 12 этажей	-4 10	-12 10	-4 9	-9 13	-13 18	-15 24	-7 5	-15 7
РЗ-5 16 этажей	-8 27	-23 3	-3 20	-23 2	0 28	-40 3	6 21	-31 6
Экстремальные значения	-17 27	-23 22	-8 20	-23 13	-28 28	-40 24	-17 21	-31 46

Экстремальные напряжения за расчетный период возведения в простенках кирпичной стены толщиной 640мм от температурной нагрузки



Экстремальные напряжения за расчетный период возведения в сплошной кирпичной стене толщиной 640мм от температурной нагрузки

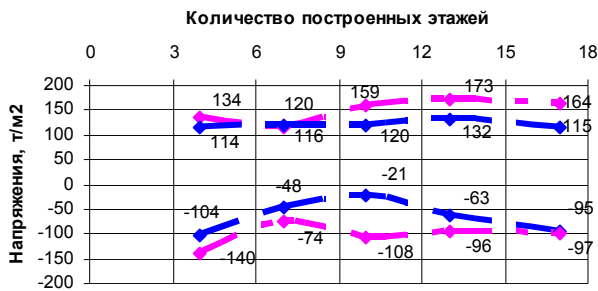


- $S_{y-низ-}$ -
- $S_{y-низ+}$ +
- $S_{y-верх-}$ -
- $S_{y-верх+}$ +

- отрицательные значения продольных напряжений на внутренней грани стены,
- положительные значения продольных напряжений на внутренней грани стены,
- отрицательные значения продольных напряжений на наружной грани стены,
- положительные значения продольных напряжений на наружной грани стены

Рисунок 3. Экстремальные напряжения за расчетный период возведения в кирпичных стенах толщиной 640мм на различных уровнях строительства от температурной нагрузки.

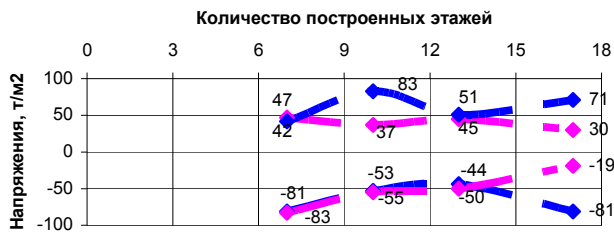
Экстремальные напряжения в простенках кирпичной стены толщиной 640мм на 1-4 этажах (уровень 1)



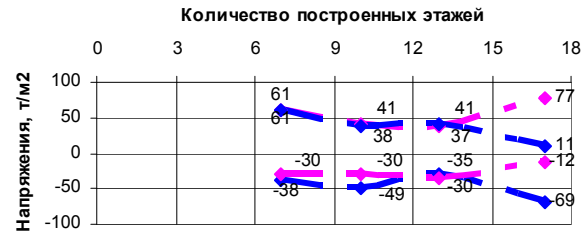
Экстремальные напряжения в сплошной кирпичной стене толщиной 640мм на 1-4 этажах (уровень 1)



Экстремальные напряжения в простенках кирпичной стены толщиной 640мм на 5-7 этажах (уровень 2)



Экстремальные напряжения в сплошной кирпичной стене толщиной 640мм на 5-7 этажах (уровень 2)



Экстремальные напряжения в простенках кирпичной стены толщиной 640мм на 8-10 этажах (уровень 3)



Экстремальные напряжения в сплошной кирпичной стене толщиной 640мм на 8-10 этажах (уровень 3)



→ $\sigma_{y-низ}$ - значения продольных напряжений на внутренней грани стены,
→ $\sigma_{y-верх}$ - значения продольных напряжений на внутренней грани стены

Рисунок 4. Экстремальные напряжения в зависимости от количества построенных этажей (учитывает динамику процесса)

Вклад температурной нагрузки в общее напряженное состояние конструкции

Для наглядности результатов ниже представлена таблица (табл. 3), отражающая количественное влияние температурного воздействия на общую картину напряженного состояния конструкции.

Таблица 3. Доля напряжений, вызванных температурной нагрузкой, от суммарных напряжений при расчетной комбинации загружений

	Доля напряжений, % ($\frac{\text{минимальные}}{\text{максимальные}}$)							
	Перфорированная стена толщиной 640мм				Сплошная кирпичная стена толщиной 640мм			
	$S_{y-верх}$	$S_{y-низ}$	$S_{x-верх}$	$S_{x-низ}$	$S_{y-верх}$	$S_{y-низ}$	$S_{x-верх}$	$S_{x-низ}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	12,14%	19,49%	4,15%	14,94%	18,06%	33,61%	4,53%	6,75%
	15,61%	16,67%	26,32%	18,84%	25,69%	24,74%	56,76%	79,31%
Экстремальные значения	15,61%	19,49%	26,32%	18,84%	25,69%	33,61%	56,76%	79,31%

Анализ полученных результатов

Полученные результаты показали, что в случае возведения зданий в сложных климатических условиях, при которых происходит регулярное изменение среднемесячных температур с переходом через отметку 0°C, обязательно вести проектирование и расчеты конструкций в строгом соответствии с проектом организации строительства (ПОС). В данных условиях становится возможным качественно построить расчетную схему с заданием сезонных температурных воздействий и вариациями моделей с делением на необходимое количество уровней по высоте, участков по длине и ширине.

Как следует из таблиц результатов, максимальные значения силовых факторов не обязательно соответствуют схеме, отвечающей полному окончанию строительства. Это вызвано, прежде всего, наличием локальных «прыжков» напряжений в пределах какого-либо уровня строительства при его возведении, которые впоследствии сглаживаются, но не всегда значительно. Так, максимальная растягивающая температурная нагрузка приходится на второй уровень из пяти для перфорированной стены и на четвертый для сплошной. При этом следует отметить, что максимальный перепад напряжений по сечению стены имеет место на последнем уровне строительства. Однако это обстоятельство в большей степени свидетельствует о необходимости учитывать релаксацию кирпичной кладки, что не было учтено в данном исследовании. Данные обстоятельства обязывают составлять расчетные схемы и выполнять расчет на различных стадиях готовности сооружения при оптимальном соблюдении технологии строительства и физических процессов.

Также установлено, что при расчете зданий с неполным каркасом на любые воздействия, необходимо качественно моделировать узел сопряжения перекрытий как с несущими наружными стенами, так и между собой и ригелями. Расчет количественных значений жесткостей элементов может быть выполнен по рекомендациям [2, 3].

Максимальный вклад температурной нагрузки в общее НДС конструкции составляет 25-30%. В связи с этим становится понятным полученное армирование кладки. Сортамент арматуры Вр-I не всегда способен обеспечить требуемое армирование (максимальный диаметр по сортаменту 5мм). При выборе прочих классов арматуры расчетное сопротивление существенно ниже в рамках решаемой проблемы. Поэтому наиболее рациональным способом перехвата напряжений может явиться введение специальных конструктивных элементов, например, монолитных поясов, воспринимающих значительную часть горизонтальных напряжений возникающих от температурного воздействия во время возведения здания и при его эксплуатации.

В настоящее время завершается строительство жилого комплекса на ул. Беринга, г. Санкт-Петербург. Архитектурный раздел проекта выполнен ООО «Архитектурная мастерская Арзиманова И.Б.», конструктивный раздел – ООО «Коллаж Студия». На данном объекте при расчете конструкций и проектировании были максимально учтены температурные нагрузки на несущие элементы здания с учетом результатов данного исследования и получено более точное напряженно-деформированное состояние конструкции.

В области решаемой технической и научной задачи свои исследования и разработки ведут следующие российские организации, осуществляющие проектную, конструкторскую, внедренческую деятельность: ООО «Коллаж Студия», ПНИПКУ «Венчур», ООО «Строительный Трест», ООО «Архитектурная мастерская Арзиманова И.Б.».

Литература

1. Болотин В.В.. Статистические методы в строительной механике. М.: Стройиздат, 1965.
2. Дроздов П.Ф.. Конструирование и расчет несущих систем многоэтажных зданий и их элементов. Учебное пособие для вузов. М.: Стройиздат, 1977.-223с.
3. Пособие по расчету крупнопанельных зданий. Вып. 1. Характеристики жесткости стен, элементов и соединений крупнопанельных зданий. М.: Стройиздат, 1974.-40с.
4. СНиП 2.03.01-84*. Бетонные и железобетонные конструкции. М.: Госстрой СССР.
5. СНиП 2.03.04-84. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. М.:Госстрой СССР.
6. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. М.:Госстрой СССР.
7. СНиП II-22-81. Каменные и армокаменные конструкции. М.: Госстрой СССР.
8. СНиП 23-01-99. Строительная климатология. М.: Госстрой России.
9. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика. М.: Госстрой СССР.
10. Гордеев В.Н., Лантух-Лященко А.И., Пашинский В.А., Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / Под общей ред. А.В.Перельмутера. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006.-482с.

* *Алексей Иванович Снегирев, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет*

Тел. раб. 552-76-10

Эл. почта snegirevaleksey@mail.ru