

УДК 693.5

А.А. Афанасьев
ФГБОУ ВПО «МГСУ»

ТЕХНОЛОГИИ ВОЗВЕДЕНИЯ СБОРНО-МОНОЛИТНЫХ КАРКАСНЫХ ЗДАНИЙ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Приведены технологические особенности возведения каркасных зданий при отрицательных температурах. Даны конструктивно-технологические особенности сборных элементов каркаса, технологии заводского производства многоярусных колонн, преднатяженных ригелей, балок и многопустотных панелей настила.

Показано, что каркасные системы позволяют возводить промышленные, жилые и административные здания различной этажности и гибкости планировочных решений. Приведены технологические особенности монтажа конструктивных элементов, их временного и окончательного крепления.

Приводятся основные требования к технологии омоноличивания стыков колонн с ригелями и многопустотных плит-перекрытий для создания рамно-связевого каркаса. Дано аналитическое решение уравнения теплопроводности при отогреве стыкуемых элементов, что позволяет численными методами определить глубину отогрева ригелей и колонн в зависимости от наружной температуры и продолжительности теплового воздействия.

Проведен анализ технологии омоноличивания стыков сборных конструкций в условиях отрицательных температур с предварительным отогревом стыкуемых элементов и прогревом бетонной смеси греющими проводами. Установлен диапазон рациональных режимов отогрева и прогрева конструктивных узлов в зависимости от параметров отрицательной температуры.

Ключевые слова: многоэтажные колонны, ригели, многопустотные плиты, теплогенератор, отогрев, греющие провода, модифицированная бетонная смесь, теплоизоляция, теплопотери, режим прогрева, набор прочности.

Аналогом сборно-монолитной системы «Рекон» является каркас французской фирмы «Сарет», которая была адаптирована к условиям Российской Федерации и впервые произведена на Чебоксарском ДСК [1]. Машиностроительное предприятие ЗАО «Рекон» в короткие сроки разработало и освоило выпуск отечественных технологических линий по производству элементов сборно-монолитного каркаса. В их состав входят колонны, преднатяженные ригели, балки, плиты перекрытий безпалубочного формирования.

Комплект оборудования позволяет изготавливать колонны длиной до 17 м. Их сечение может меняться за счет перестановки борта опалубки.

Для сопряжения колонн с ригелями и балками в них на уровне перекрытия предусматриваются участки с оголенной арматурой.

Ригели в зоне сопряжения кроме выпускников арматуры имеют полуцилиндрические углубления для размещения двух-трех стержней арматуры диаметром от 12 до 28 мм, которые пересекают сечение колонны.

Расчетным сечением ригеля является тавр, полкой которого служат элементы перекрытия с дополнительным армированием. Все элементы сопряжений омоноличиваются бетоном класса В30...В40. Используются модифицированные бетоны с подвижностью П3...П4.

Пространственная устойчивость каркаса обеспечивается совместной работой колонн, ригелей и перекрытий. При высоте здания более 5 этажей используются диаграммы жесткости.

Наращивание колонн осуществляется путем устройства штепсельного стыка. В малоэтажных зданиях (до 5 этажей) используются бесстыковые колонны.

Технология изготовления элементов каркаса позволяет применять железобетонные элементы типового спектра длины и поперечного сечения, что дает возможность возводить жилые здания с шагом колонн до 7,2 м и высотой до 25 этажей.

При возведении зданий высотой 16...17 этажей используются три типа сечения колонн: нижний ярус 400x400 мм; средний ярус 300x300 мм; верхний ярус 250x250 мм.

Сборно-монолитная система не требует сложной оснастки для монтажа, исключает применение сварочных соединений, является быстромонтируемой и малотрудоемкой. Удельный расход железобетона составляет $0,12 \dots 0,15 \text{ м}^3/\text{м}^2$ площади, что существенно ниже известных каркасных систем.

Наиболее ответственным технологическим этапом является омоноличивание стыков при отрицательных температурах. От степени монолитности сопряжений зависит эксплуатационная надежность и долговечность зданий.

Известно, что при контакте прогреваемой бетонной смеси с поверхностями сборных конструкций наблюдается эффект термодиффузии, который состоит в миграции влаги из бетонной смеси по направлению потока тепла [2]. Результатом такого процесса является миграция жидкой фазы к поверхностям омоноличиваемых конструкций, что приводит к снижению или полному исключению адгезии. По окончании прогрева и набора прочности бетоном между поверхностями сборных конструкций и участками омоноличивания образуется прослойка жидкой фазы, которая препятствует монолитности конструкций, снижая несущую способность.

Таким образом, для получения равнопрочных стыков сборных конструкций и участков омоноличивания необходимо произвести отогревстыкуемых элементов.

Требуемая глубина отогрева зависит от температуры окружающей среды и продолжительности работ, связанных с последующими операциями по установке опалубки, размещению теплоизоляции и других процессов. До укладки бетонной смеси требуется отогреть: участки колонны выше перекрытия и ниже положения ригелей; ригели и элементы многопустотного настила.

Рассмотрим процесс отогрева ригеля. В силу того, что его сечение значительно меньше длины, в качестве модели можно принять бесконечный стержень и считать, что его концы при отрицательных температурах окружающей среды не оказывают взаимного влияния друг на друга.

Передача тепловой энергии осуществляется через торец стержня. Необходимо определить распределение температур по участку стержня.

Пусть $U(x, t)$ — температура в точке x на расстоянии x от торца стержня в момент t .

Эта зависимость удовлетворяет уравнению теплопроводности [3]

$$c\rho \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = K \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - \frac{hp}{F} u, \quad (1)$$

где K — теплопроводность; c — теплоемкость; ρ — плотность; p — периметр стержня; F — площадь поперечного сечения; h — коэффициент внешней теплопроводности.

Будем считать, что температура внешней среды постоянна, так что в качестве начального условия берем соотношение

$$U(x, 0) = T_0, x \geq 0. \quad (2)$$

Торец стержня нагревается до температуры T_1 . Тогда можно записать

$$U(t, 0) = T_0 + T_1(1 - e^{-\mu t}) = \mu(t). \quad (3)$$

Зависимость (3) показывает экспоненциальный характер распределения температуры по длине стержня.

Эта функция учитывает то обстоятельство, что торец стержня доводится до необходимой температуры не мгновенно. Поэтому функция $\mu(t)$ является непрерывной и можно применить теорию параболических уравнений для краевой задачи [3].

Перейдя к новой функции $\vartheta(x, t) = U(x, t)e^{bt}$, где $b = \frac{hp}{Fc\rho}$.

Получим уравнение теплопроводности следующего вида

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}, \quad (4)$$

с начальным условием

$$\vartheta(x, 0) = T_0 \text{ и } \vartheta(0, t) = \mu(t) e^{-bt} = \mu_1(t). \quad (5)$$

Используя зависимость $\vartheta(x, t) = \vartheta_1(x, t) + \vartheta_2(x, t)$,

$$\text{где } \vartheta_1(x, t) = \frac{T_0}{2\sqrt{\pi}} \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{a^2 t}} \left[e^{-\frac{(x-y)^2}{4a^2 t}} - e^{-\frac{(x+y)^2}{4a^2 t}} \right] dy \quad (6)$$

$$\text{и } \vartheta_2(x, t) = \frac{a^2}{2\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{x}{[a^2(t-y)]^{3/2}} e^{\frac{-x^2}{4a^2(t-y)}} \mu_1(y) dy. \quad (7)$$

Чтобы получить функцию $U(x, t)$ необходимо умножить $\vartheta(x, t)$ на e^{-bt} . $U(x, t)$ принимает следующий вид:

$$U(x, t) = e^{-bt} [\vartheta_1(x, t) + \vartheta_2(x, t)]. \quad (8)$$

Путем преобразования выражения для $\vartheta_1(x, t)$, а также используя функцию Лагранжа

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-z^2/2} dz \text{ и ее свойства } 1 - \Phi(x) = \Phi(-x), \text{ получим для } t + \delta.$$

При $t > \delta$ получим

$$U(x, t) = 2T_0 \left[1 - 2\Phi\left(\frac{-x}{R\sqrt{2t}}\right) \right] e^{-bt} + \frac{ax(T_0 + T_1)}{\sqrt{\pi}} \int_\delta^t y^{-\frac{3}{2}} e^{-\left(\frac{x^2}{4a^2 y} + by\right)} dy. \quad (9)$$

Первое слагаемое оценивает влияние начальных условий, а второе — прогревание конца стержня, т.е. граничных условий.

При $t \rightarrow \infty$ первый член (9) стремится к нулю, и для достаточно больших t будем иметь

$$U(x, t) \sim \frac{ax(T_0 + T_1)}{\sqrt{\pi}} \int_\delta^t y^{-\frac{3}{2}} e^{-\left(\frac{x^2}{4a^2 y} + by\right)} dy. \quad (10)$$

Используя зависимость (10) для каждого x , можно найти численными методами время, за которое достигается требуемая положительная температура.

Полученная зависимость позволяет получать несколько приближенные данные, так как не учитываются теплопотери через открытые поверхностистыкуемых элементов.

В реальных условиях необходим отогрев не только торцевых элементов ригелей, но и колонн, а также узлов размещения плит перекрытий с опорами на ригели. Это требует более сложной модели исследований. Практический прием отогрева конструктивных элементов стыков состоит в устройстве теплоизолирующих штор на пролет здания с конвективным прогревом теплогенераторами. При этом процесс отогрева должен осуществляться на стадии полностью смонтированных элементов, дополнительного армирования и установки систем электропрогрева.

Такое решение позволяет в одном технологическом цикле осуществить отогрев и укладку бетонной смеси с теплоизоляцией открытых поверхностей и прогревом до получения критической прочности бетона.

Наиболее рациональным является отогрев конструкций после проведения работ по дополнительному армированию и укладки греющих проводов. Как правило, для каркасных систем продолжительность отогрева составляет 6...12 ч и зависит от температуры наружного воздуха и средств теплового воздействия (теплогенераторы, инфракрасные излучатели, тэнны и др.) [4].

С минимальным перерывом производится укладка и уплотнение бетонной смеси с теплогидроизоляцией открытых поверхностей.

Высокий модуль поверхности и малые объемы бетона омоноличивания требуют использования технологий, обеспечивающих плавный разогрев смесей со скоростью до $10^{\circ}\text{C}/\text{ч}$, поддержание изотермического прогрева до получения $70\% R_{\delta}$ и остывания, исключающих возникновение деструктивных процессов монолитных участков.

Наиболее технологичным является прогрев бетонной смеси греющими проводами, при котором передача тепла происходит кондуктивно и все тепло, выделяемое нагревателями, передается бетонной смеси.

В качестве нагревательных проводов используются стальные жилы с термостойким покрытием, выдерживающим температуру прямого воздействия до 100°C . В последнее время нашли практическое применение неметаллические полимерные провода. Токопроводящая жила из полимерного композита закатывается в специальное полимерное покрытие с термостойкостью до 130°C . Это позволяет отогреватьстыкуемые элементы без опасения расплавления защитной полимерной оболочки и потери свойств изоляции [6].

Электрический расчет сводится к определению рабочего напряжения при минимально допустимой длине нагревателя и максимально допустимой для него мощности. Так, для прогрева бетонной смеси стыка колонн с ригелями сечением 30×30 см расчетная мощность составляет около $25 \text{ кВт}/\text{м}^3$, что соответствует шагу проводов $4 \dots 5$ см с погонной нагрузкой 40 Вт.

Использование понижающих трансформаторов со ступенями от 40 до 127 В позволяет регулировать тепловую мощность проводов при изменении температуры среды.

Принципиальные схемы размещения греющих проводов, отогрева стыков сборных элементов с использованием теплогенераторов, а также продолжительность набора прочности бетона при температурах изотермического прогрева при $40, 50$ и 58°C приведены на рис.

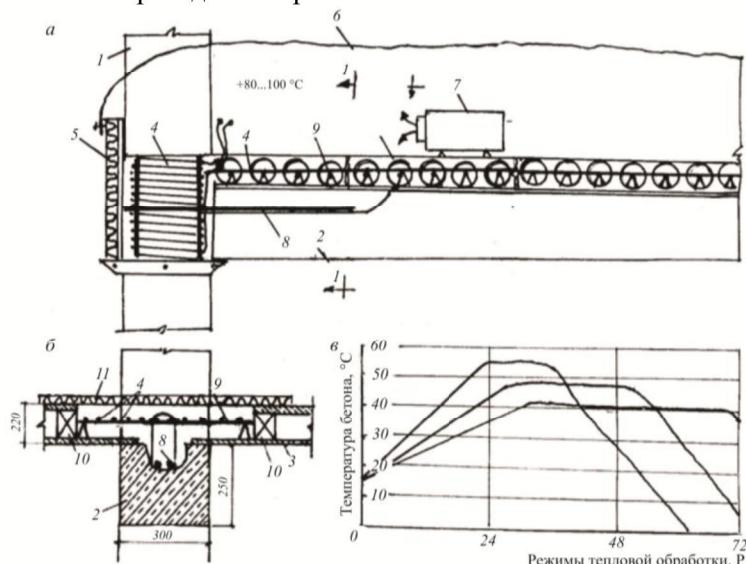


Схема размещения греющих проводов в стыках колонн с ригелями и ригеля с многопустотным настилом с последующим отогревом сборных элементов (а), прогрев бетона стыков с теплоизоляцией открытых поверхностей (б), графики набора 70 % прочности бетоном В40 в зависимости от температуры и продолжительности изотермического прогрева (в): 1 — колонна; 2 — ригель; 3 — многопустотный настил; 4 — греющие провода; 5 — утепленный элемент опалубки; 6 — теплоизоляционная штора; 7 — теплогенератор; 8 — дополнительное армирование стыка колонн с ригелем; 9 — армирование пространства между многопустотным настилом и ригелем; 10 — вкладыш; 11 — утепление открытых поверхностей этажоном после укладки бетонной смеси

Показано, что при температуре прогрева 58 °С продолжительность набора 70 %-й прочности составляет 24...26 ч, при 50 °С — 46...48 ч и при 42 °С — 64...68 ч.

Для омоноличивания стыков целесообразно использовать модифицированные высокоподвижные бетонные смеси на мелком заполнителе. Это обеспечивает хорошую заполняемость стыков и не требует интенсивного вибрационного воздействия.

При выполнении работ на захватке или секции жилого дома разрабатываются технологические карты на омоноличивание стыков, где указывается технологическая последовательность производства работ, устанавливается трудоемкость процессов, производится расчет режимов отогрева и прогрева, исходя из прогнозируемой температуры, определяются средства тепловой защиты, температурный контроль и оценка физико-механических свойств твердеющего бетона неразрушающими методами. Результаты регистрации заносятся в журнал работ и учитываются при составлении актов на скрытые работы [5].

Расчетными и экспериментальными данными установлено, что продолжительность работ по отогреву сборных конструкций узлов, бетонированию и прогреву смесей до получения критической прочности при температурах ниже -5 °С увеличивает время монтажа каркасов на 40...60 %. При этом в 1,5...2 раза возрастает себестоимость работ. В этих условиях целесообразно смещать монтажный цикл на период с температурами, близкими к положительным, что позволяет организовать непрерывные поточные циклы монтажа и омоноличивания, исключив вероятность получения бракованных стыков.

Библиографический список

1. Щембаков В.Г. Сборно-монолитное каркасное строительство. Чебоксары, 2004. 96 с.
2. Афанасьев А.А., Минаков Ю.А. Оценка тепловых полей при ускоренных методах твердения бетона в монолитном домостроении // Сб. тр. Теоретические основы строительства. М., 1999. С. 16—22.
3. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. М. : Наука, 1966. 724 с.
4. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. М. : С.К., 1975. 700 с.
5. Афанасьев А.А., Селищев К.С. Технологии омоноличивания стыков при возведении каркасных зданий // Вестник МГСУ. 2010. № 4. С. 34—38.
6. Гмыря А.И., Коробков С.В. Технология бетонных работ в зимних условиях. Томск : Изд-во ТГАСУ, 2011. 411 с.

Поступила в редакцию в марте 2012 г.

Об авторе: Афанасьев Александр Алексеевич — доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет», 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, 8-495-287-49-14, доб. 31-25.

Для цитирования: Афанасьев А.А. Технологии возведения сборно-монолитных каркасных зданий при отрицательных температурах // Вестник МГСУ. 2012. № 4. С. 175—180.

A.A. Afanas'ev

TECHNOLOGY OF ERECTION OF PRECAST FRAME BUILDINGS AT NEGATIVE TEMPERATURES

In the article, the author describes the technological peculiarities of erection of frame buildings at negative temperatures. The author also demonstrates structural and technological peculiarities of prefabricated frame elements. The author also speaks about the technology of prefabricated production of stacked columns, pre-stressed girders, beams and hollow core slabs.

It is proven that the frame system is applicable for the construction of industrial, residential and office buildings that may have different numbers of storeys and that are flexible in terms of design concepts. Besides, the author describes the technological peculiarities of the assembly of structural elements, their temporary and permanent fixing.

The author also provides basic requirements applicable to the technology of grouting of column-to-girder joints and hollow slabs designated for a cased frame. The article also contains an analytical solution of the heat conductivity equation that describes the period of heating of connected elements.

The solution makes it possible to use numerical methods to identify the depth of heating of girders and columns, depending on the ambient temperature and the duration of exposure to the heat.

The author has also analyzed the technology of grouting of precast structure joints at negative temperatures in the event of pre-heating of structural elements to be connected and the heating of the concrete mix with heating wires. The author has identified the range of rational heating modes for structural joints on the basis of the parameters of negative temperatures.

Key words: stacked columns, crossbars, hollow core slabs, heat generator, heating, heating wires, modified concrete mix, thermal insulation, heat loss, hardening.

References

1. Schembakov V.G. *Sborno-monolitnoe karkasnoe stroitel'stvo* [Precast Monolithic Frame Construction]. Cheboksary, 2004. 96 p.
2. Afanas'ev A.A., Minakov Yu.A. *Otsenka teplovых полей при ускоренных методах твердения бетона в монолитном домостроении* [Assessment of Thermal Fields as part of Methods of Accelerated Hardening of Concrete in Monolithic House Building]. *Sbornik "Teoreticheskie osnovy stroitel'stva"* [Collected Works. Theoretical Foundations of Construction]. Moscow, 1999, pp. 16—22.
3. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of Mathematical Physics]. Moscow, Nauka Publ., 1966, 724 p.
4. Mironov S.A. *Teoriya i metody zimnego betonirovaniya* [Theory and Methods of Winter-time Concreting]. Moscow, S.K. Publ., 1975, 700 p.
5. Afanas'ev A.A., Selishev K.S. *Tekhnologii omonolichivaniya stykov pri vozvedenii karkasnykh zdaniy* [Technology of Grouting of Joints in Construction of Frame Buildings]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2010, no. 4, pp. 34—38.
6. Gmyrya A.I., Korobkov S.V. *Tekhnologiya betonnykh rabot v zimnikh usloviyakh* [Technology of Concrete Works in Winter Conditions]. Tomsk, TGASU [Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering], 2011, 411 p.

About the author: **Afanas'ev Aleksandr Alekseevich** — Professor, Doctor of Technical Sciences, **Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; +7 (495) 287-49-14, ext. 31-25.

For citation: Afanas'ev A.A. *Tekhnologii vozvedeniya sborno-monolitnykh karkasnykh zdaniy pri otritesatel'nykh temperaturakh* [Technology of Erection of Precast Frame Buildings at Negative Temperatures]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2012, no. 4, pp. 175—180.