



**Здравствуйтесь уважаемые члены Государственной  
Аттестационной Комиссии.**

2017 г.



# **Технология оперативного температурно-прочностного контроля бетона при выдерживании монолитных конструкций в условиях отрицательных температур**

2017 г.

## Научно-техническая гипотеза

Научно-техническая гипотеза состоит в предположении возможности повышения эффективности монолитного строительства за счет организации методов, обеспечивающих высокую оперативность выработки решений адаптивного характера в ходе управления производственными процессами на различных этапах изготовления строительной продукции.

В условиях больших объемов и высоких темпов изготовления монолитных конструкций особую остроту приобретают вопросы разработки и применения надёжных методов построечного контроля температуры выдерживания и динамики нарастания прочности бетона и связанных с этим технологических приёмов выдерживания конструкций, подвергающихся ранней распалубке. При этом требуется разработка систем технологического контроля, интегрированных непосредственно в производственный процесс, обеспечивающих выдерживание бетона в сложных климатических условиях.

Целью работы является повышение эффективности и надёжности процессов управления тепловой обработкой и выдерживанием монолитных конструкций зданий, в том числе подвергающихся ранней распалубке и в условиях скоростного строительства, посредством разработки новых и совершенствования существующих технологических приёмов оперативного температурно-прочностного объектного контроля.

Теоретической и методологической основой исследования являются труды отечественных и зарубежных ученых в области организации и управления строительным производством и технологии монолитного строительства; общие положения и принципы системного анализа, системотехники строительства, теории управления и теории организационно-технологической надёжности строительного производства; эмпирические методы исследования влияния различных факторов на процессы структурообразования бетона.

## Практическая значимость работы заключается:

- в разработке правил выполнения производственных косвенных измерений температуры, бетона через опалубку;
- в разработке приёмов построечного температурного контроля с применением различных приборных средств и методик измерений, позволяющих с большей степенью надёжности оценивать температурно-прочностные показатели при выдерживании конструкций разного типа;
- в разработке рекомендаций по выдерживанию вертикальных монолитных железобетонных конструкций, подвергающихся ранней распалубке, в том числе при больших температурных перепадах «бетон-воздух»;
- в разработке способа оценки конструктивной прочности бетона монолитных конструкций, по значению прочности бетона в наружных слоях;
- в разработке структурной модели системы оперативного температурно-прочностного контроля и обосновании эффективности её применения.



# КОНТРОЛЬ ВЫДЕРЖИВАНИЯ БЕТОНА МОНОЛИТНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ: СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

## Методы контроля прочности бетона в забетонированных конструкциях

Сегодня в практике производственных измерений температуры бетона обычно используют два способа:

**Прямые измерения** термометрами и термодатчиками, размещаемыми в теле конструкции (в скважинах, реже в отверстиях под анкера опалубки стен и еще реже - с помощью теряемых датчиков, устанавливаемых в центральных или опасных зонах);

**Косвенные измерения** - измерение температуры на поверхности опалубки с целью оценки температуры в поверхностных слоях бетона.

## **Методы контроля прочности бетона в забетонированных конструкциях существуют следующие:**

Метод испытания образцов - кубов, твердеющих около конструкций

Метод испытания образцов – кубов, извлекаемых из тела конструкций с помощью закладных форм

Метод испытания образцов – кернов, вырезаемых из конструкций

Метод отрыва со скалыванием

Метод отрыва

Метод скалывания ребра

Ультразвуковой импульсный метод

Метод упругого отскока

Метод пластических деформаций

Метод ударного импульса

Метод контроля по температурно-временному фактору

Метод контроля по электропроводимости

Радиоактивный метод

Огнестрельный метод

## Цели исследования

В результате анализа существующей системы температурно-прочностного контроля с учетом существующих тенденций, в диссертации поставлена **цель исследований**: повышение эффективности ненадёжности процессов управления тепловой обработкой и выдерживанием бетона монолитных конструкций зданий, в том числе подвергающихся ранней распалубке, посредством разработки новых и совершенствования существующих технологических приёмов оперативного **ОБЪЕКТНОГО** температурно-прочностного контроля.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **основные задачи исследования**:

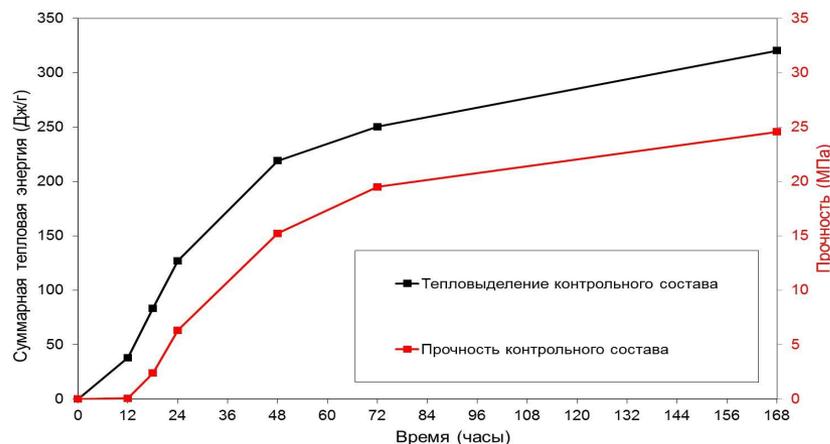
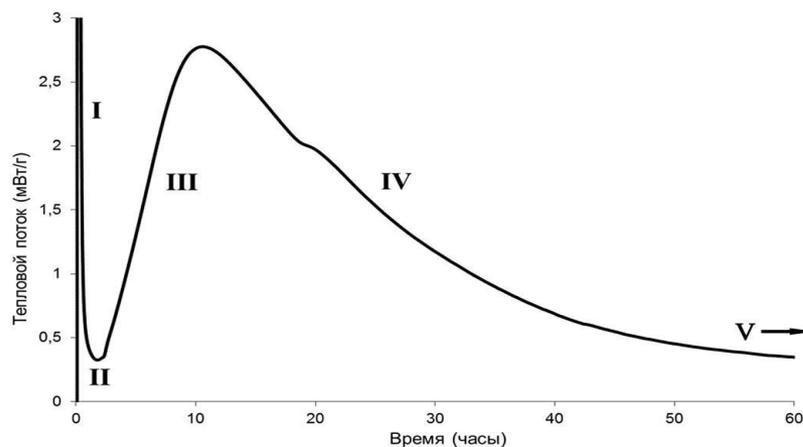
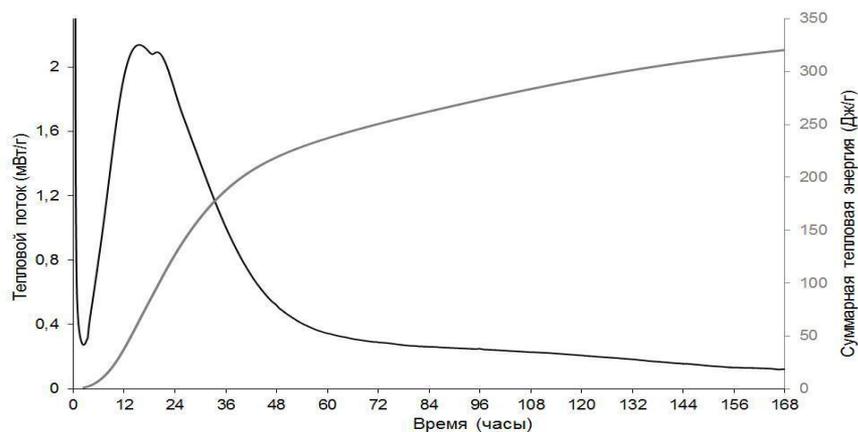
- теоретически обоснован метод косвенного определения температуры бетона через опалубку с использованием ИК термометрии;
- теоретически обоснован метод косвенного определения температуры бетона через опалубку с использованием контактных датчиков температуры и теплоизолирующих накладок;
- разработан метод организации оперативного мониторинга состояния возводимых монолитных конструкций в реальном масштабе времени;
- определены перспективные направления дальнейших исследований в рамках обозначенной предметной области;
- проведен анализ факторов, определяющих неоднородность условий выдерживания бетона в объеме отдельных конструкций и их фрагментов;
- разработаны правила выполнения косвенного определения температуры бетона в построечных условиях;
- разработаны типовые приёмы построечного температурного контроля с применением различных приборных средств и методик измерений для надёжной оценки теплового режима содержания конструкций и прогнозирования прочности;
- составлены рекомендации по выдерживанию вертикальных монолитных железобетонных конструкций, подвергающихся ранней распалубке;
- разработан способ оценки конструктивной прочности бетона монолитных конструкций по значению прочности бетона в наружных слоях (на ранних этапах выдерживания).

## Выводы по главе

1. Рассмотрение декларируемых в нормативной и методической литературе методов оценки и контроля состояния бетона при выдерживании монолитных конструкций показало отсутствие универсальных методов контроля температуры и прочности бетона, полностью отвечающих современным производственным требованиям и позволяющих достоверно оценивать состояние бетона монолитных конструкций в ходе выдерживания.
2. Анализ особенностей существующей технологии монолитного домостроения показал, что в условиях значительного возрастания объёмов и темпов монолитного строительства обозначилась острая необходимость в методах производственного температурно-прочностного контроля, встроенных непосредственно в производственный процесс, позволяющих эффективно управлять процессами выдерживания бетона с одновременным обеспечением качества изготавливаемых конструкций.
3. Анализ выявил необходимость совершенствования нормативно методической базы контроля выдерживания бетона монолитных конструкций на основе современных представлений, подходов, методов и средств оперативной оценки температурно-прочностного состояния бетона, разработки приемов выдерживания монолитных конструкций с учётом существующих технологий работ. Показана необходимость совершенствования и внедрения в практику монолитного строительства информационно, технически и организационно обеспеченной комплексной системы температурно-прочностного контроля выдерживания бетона, основывающейся на полном инженерно-технологическом сопровождении работ по управлению интенсификацией твердения и контролю динамики нарастания прочности бетона на различных этапах возведения зданий.

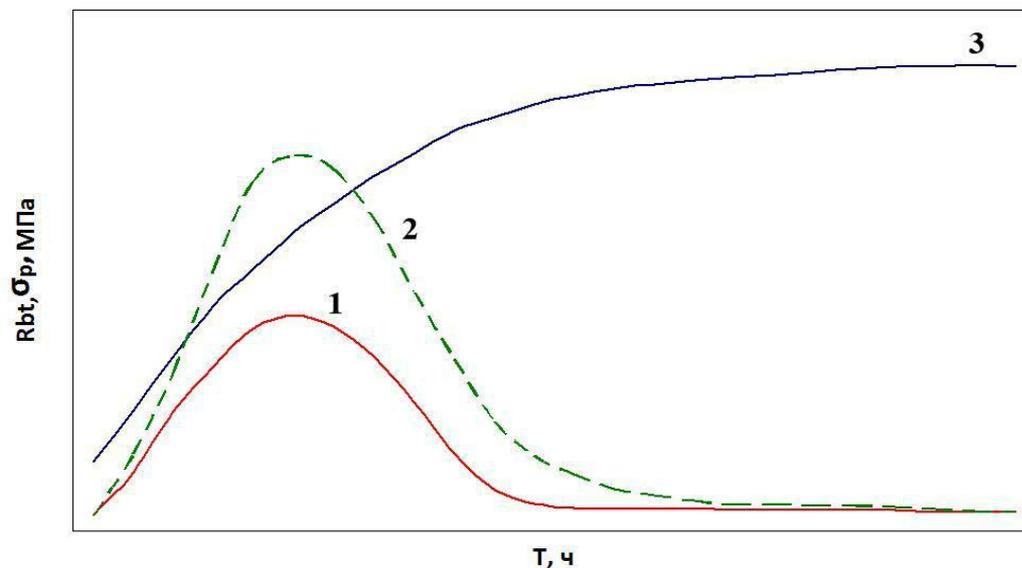
## Выбор технологического параметра оперативной оценки влияния внешних факторов на производственные процессы

Известно, что все бетоны при затворении водой выделяют тепло, количество которого напрямую зависит от состава смеси, водоцементного соотношения ряда других параметров, поэтому для более глубокого понимания взаимосвязи тепловыделения с различными внешними факторами и свойствами бетона, в диссертационной работе систематизированы некоторые положения в области изучения тепловых эффектов процесса гидратации.



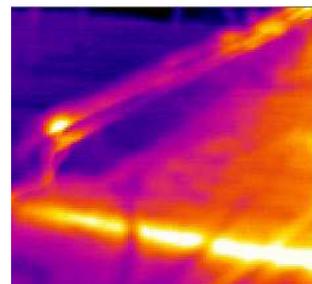
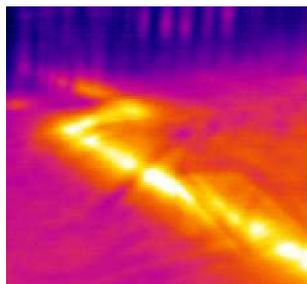
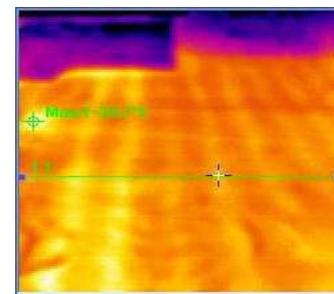
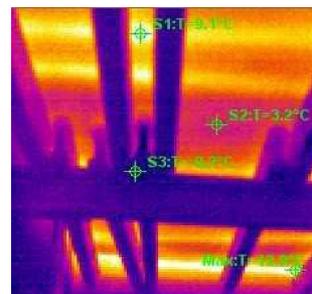
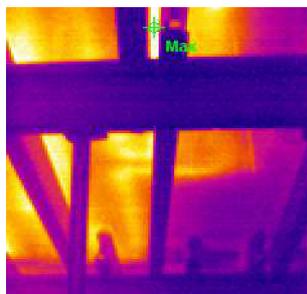
## Выбор технологического параметра оперативной оценки влияния внешних факторов на производственные процессы

Механизм возникновения трещин в бетоне под воздействием растягивающих напряжений, вызванных перепадом температур между отдельными точками. В случае если возникающие растягивающие напряжения ( $\sigma_p$ ) превышают значение прочности бетона на растяжение ( $R_{bt}$ ), происходит образование трещин. Условно процесс набора увеличения прочности бетона на растяжение и возникновения растягивающих напряжений от времени.



## Факторы, определяющие неоднородность условий выдерживания бетона в объеме конструкций

Небрежное выполнение электротехнических работ и отсутствие качественного утепления также приводит к увеличению, как внутренних градиентов, так и неравномерности распределения температуры по площади прогреваемого участка, что, в совокупности с граничными эффектами, часто является причиной пониженной прочности отдельных, как правило, наиболее нагруженных мест конструкций.





# РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ ПРИ МОНОЛИТНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

## Выводы по главе

1. Проанализированы факторы, определяющие неоднородность условий выдерживания бетона в объеме отдельных конструкций и дана качественная и количественная оценка влияния естественных, случайных и технологических факторов, включая граничные эффекты, положение линейных нагревателей и величину нагрузки на них.
2. Выполнена оценка неравномерности температурно-прочностных распределений по площади прогреваемых конструкций и их фрагментов с учётом комплексного влияния выше указанных факторов, в результате которой показано, что неравномерность распределения прочности по площади монолитных конструкций на ранних этапах выдерживания носит системный характер.
3. Предложено использовать в качестве параметра – тепловыделение как фундаментальную характеристику процесса гидратации цементных систем, позволяющую анализировать и прогнозировать степень влияния различных факторов на состояние возводимых конструкций, как в реальном масштабе времени, так и в долгосрочной перспективе.

# ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР БЕТОНА В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

## Технические особенности выполнения ИК измерений применительно к определению температуры бетона

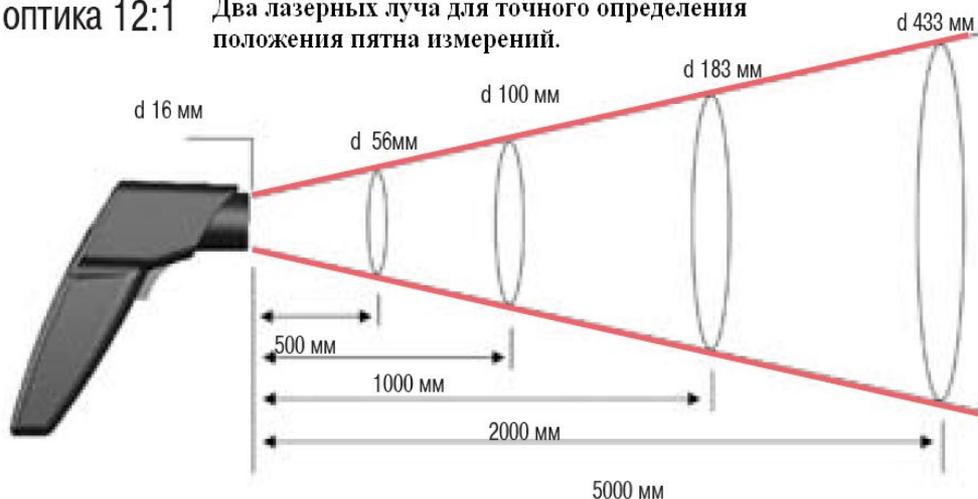


Рассматривая ИК технику в качестве средства построения контроля температуры бетона, и при выполнении измерений с её помощью следует учитывать особенности выполнения ИК измерений и факторы, которые могут приводить к существенным ошибкам измерений.

### Объект, область и технические особенности ИК измерений.

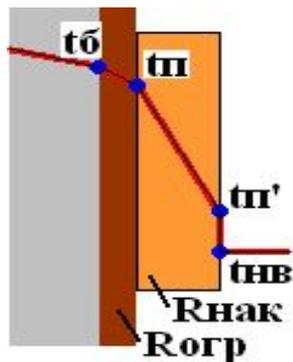
Согласно рекомендациям, температуру бетона в ходе выдерживания монолитных конструкций следует определять на глубине 5...10 см от поверхности. ИК приборы принципиально не могут выполнить такие измерения, поскольку они измеряют температуру на *поверхности* тел. Таким образом, в качестве объекта измерения может выступать любая доступная для проведения измерений поверхность тела: при прямых измерениях – открытая поверхность бетона или, как исключение, тонкая полиэтиленовая плёнка, плотно прилегающая к поверхности бетона без образования складок (для ИК измерителей со спектральным диапазоном измерений 8...14 мкм она прозрачна при минимуме рассеяния); при косвенных измерениях – наружная поверхность палубы неутеплённой опалубки (которая выступает в качестве приемлемого носителя информации о температуре бетона).

оптика 12:1 Два лазерных луча для точного определения положения пятна измерений.

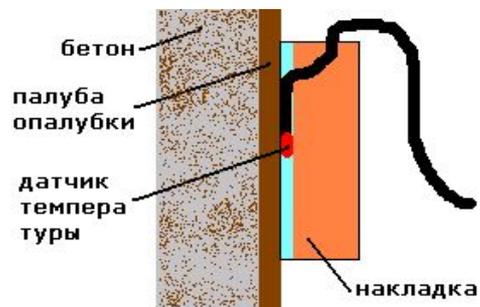


# ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР БЕТОНА В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

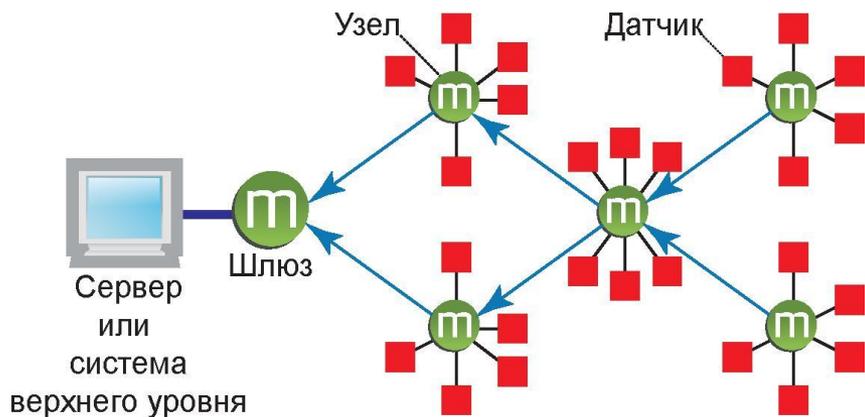
Исследование метода косвенного определения температуры бетона через опалубку с использованием теплоизолирующих накладок



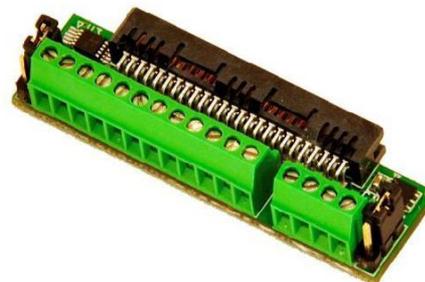
Указанный МОТБ, реализующий способ измерений температуры поверхности опалубки под теплоизолирующей накладкой посредством контактных датчиков представляет не меньший интерес, чем МОТБ с применением ИК термометрии, поскольку позволяет устранить либо уменьшить влияние дестабилизирующих факторов при определении температуры поверхности опалубки за счёт использования теплоизолирующей накладки.



## Исследование метода определения температуры бетона с использованием температурных датчиков



На современном этапе технического развития, где высоко ценятся низкая трудоёмкость, высокая оперативность измерений, удобные средства хранения и обработки информации, система беспроводного мониторинга является одной из самых передовых и удобных технологий определения температуры бетонной смеси.





# ИССЛЕДОВАНИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР БЕТОНА В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

## Выводы по главе

1. Теоретически исследован метод косвенного определения температуры бетона по температуре палубы опалубки с использованием ИК термометрии. Сформулированы аналитические расчётные алгоритмы вычисления температуры бетона. Теоретически установлено количественное и качественное влияние основного дестабилизирующего фактора - скорости ветра на изменение температуры поверхности различных ограждений. Установлены основные производственные факторы, влияющие на точность расчёта температуры бетона при косвенных ИК измерениях.
2. Теоретически исследован метод косвенных измерений с применением теплоизолирующих накладок в производственных условиях. Установлены основные факторы, влияющие на точность расчёта температуры бетона. Предложена оптимальная конструкция накладки малых размеров.
3. В ходе исследований сформулированы правила выполнения измерений при определении температуры бетона косвенными методами.
4. Теоретически исследован метод определения температуры бетона с использованием температурных датчиков. Проведен анализ работы беспроводной системы температурно-прочностного мониторинга бетонной смеси. Представлены преимущества беспроводной системы температурно-прочностного мониторинга.

## Локальное использование беспроводной системы температурно-прочностного мониторинга бетонной смеси

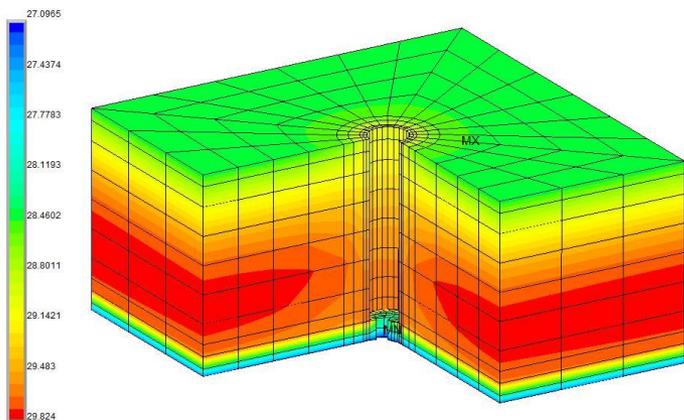
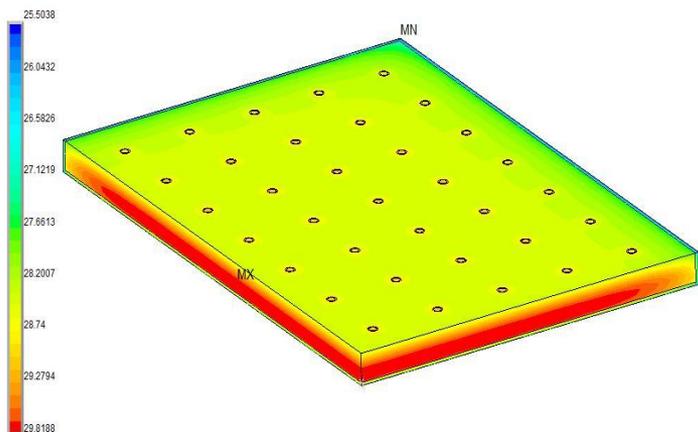


## Выводы по главе

1. Разработана структура организации, информационно-технического и методического обеспечения системы оперативного температурнопрочностного контроля (ОТПК) для предприятий.
2. Предложены рекомендации по осуществлению температурного контроля: общие положения, понятие регулярных и нерегулярных измерений температуры, принципы выполнения нерегулярных температурных измерений, объёмы контроля и размещение регулярных КТ, периодичность выполнения измерений температуры.
3. Предложены рекомендации по выдерживанию монолитных конструкций, подвергающихся ранней распалубке, а также способ оценки конструктивной прочности конструкций по прочности бетона в наружных слоях.
4. Обосновано, что реализация указанных расчетов состояния монолитных конструкций с использованием современных программных комплексов численного моделирования позволит создавать ситуационные модели состояния конструкций заданной формы и массивности в различных режимах твердения с целью предотвращения трещинообразования, а также выработки эффективных мер по уходу за бетоном и прогнозирования сроков производства распалубочных работ.
5. Для реализации обратной связи с управляемым объектом, выражающимся в контроле состояния конструкций и параметров внешней среды, предложен метод организации мониторинга распределения температурных полей в твердеющем бетонном массиве и фактических изменений тепловлажностного режима среды, основанный на использовании возможностей современных беспроводных сенсорных сетей.
6. Определены наиболее перспективные направления развития и внедрения разработанных решений. В первую очередь, при управлении производственными процессами на этапе строительстве объектов атомной энергетики
7. Для апробации подхода к управлению производственными процессами монолитного строительства в реальном масштабе времени с учетом воздействия внешних факторов разработан прототип системы автоматизированного мониторинга температурных полей в бетоне и тепловлажностных условий окружающей среды. Тестирование системы и верификация разработанных методов моделирования состояния монолитных конструкций с учетом прогнозирования кинетики твердения бетона как функции удельного теплового потока при гидратации цемента осуществлены в рамках научно-производственной деятельности совместно с НИИ СМиТ. Испытания проводились при бетонировании плиты, стен и колонн объекта - «Плавательный бассейн МГСУ» по адресу: г. Москва, Ярославское шоссе, вл. 26», а моделирование процессов структурообразования и термонапряженного состояния бетона выполнялось в верифицированном программном комплексе ANSYS.
8. Предложен метод организации оперативного мониторинга состояния возводимых монолитных конструкций на строительной площадке в реальном масштабе времени, обеспечивающий обратную связь субъекта управления с объектом для возможности оперативной выработки управленческих решений.

1. На основании проведённого анализа вопросов производственного температурно-прочностного контроля бетона монолитных конструкций выявлены актуальные направления совершенствования его нормативнометодической, информационно-технической и организационной базы, включающие использование современного приборного обеспечения, разработку методического обоснования и развитие информационных составляющих.
2. Рассмотрен, получил методическое обеспечение метод косвенного определения температуры бетона через опалубку и ограждения с использованием ИК термометрии, обладающий наиболее низкой трудоёмкостью при контроле большого числа немассивных конструкций.
3. Проведено исследование и методическое обоснование метода косвенного определения температуры бетона с использованием температурных датчиков, размещаемых на палубе опалубки под теплоизолирующими накладками или утеплителем, который позволяет с большей долей надёжности определять температуру бетона за опалубкой, при существенной ветровой нагрузке.
4. Проведено исследование неоднородности температурно-прочностных распределений в конструкциях, в результате которого:  
произведена оценка величины и характера измерения отношения поверхностной и средней (интегральной) прочности сечения, на основе которой предложен подход к оценке (интегральной) конструктивной прочности бетона монолитных конструкций на ранних этапах выдерживания по значению прочности бетона в наружных слоях.
5. Проведено исследование кинетики свободного остывания монолитных конструкций различной массивности после распалубки в результате которого:  
разработаны рекомендации по выдерживанию монолитных конструкций, подвергающихся ранней распалубке, позволяющие снизить риски трещинообразования.
6. Рассмотрен пример структуры организации, информационно-технического и методического обеспечения системы комплексного температурно-прочностного контроля при внедрении на производстве.
7. Предложен метод организации производственных процессов монолитного строительства с учетом моделирования кинетики твердения бетона для обеспечения возможности прогнозирования фактических сроков набора распалубочной прочности, а также снижения риска возникновения дефектов под действием термических напряжений.
8. Предложен метод организации оперативного мониторинга состояния возводимых монолитных конструкций на строительной площадке в реальном масштабе времени, обеспечивающий обратную связь субъекта управления с объектом для возможности оперативной выработки управленческих решений.

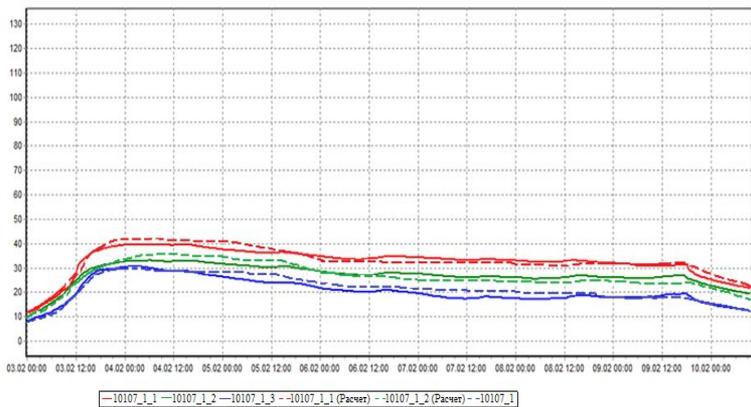
## Результаты моделирования и мониторинга состояния монолитных конструкций



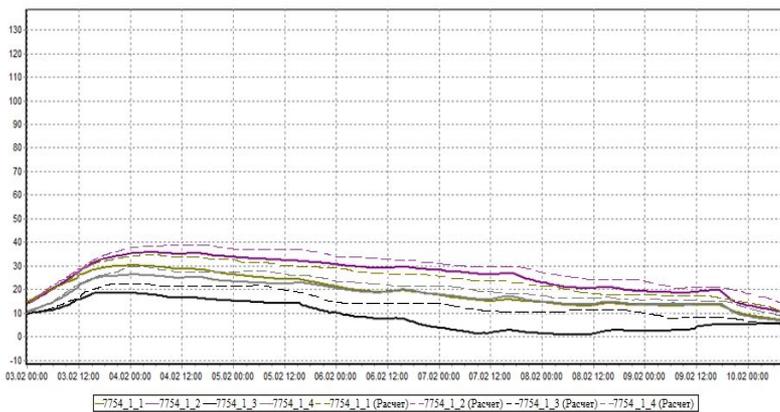
Не металлические материалы	Излучательная способность			
	Эффективная длина волны			
	1 мкм	2.2 мкм	5.1 мкм	8-14 мкм
Асбест	0,9	0,8	0,9	0,95
Асфальт	0,85	0,85	0,95	0,95
Базальт	--	--	0,7	0,7
Карбон не окисл.		0,8-0,9	0,8-0,9	0,8-0,9
Графит		0,8-0,9	0,7-0,9	0,7-0,8
Карбон		0,95	0,9	0,9
Керамика	0,4	0,8-0,95	0,85-0,95	0,95
Глина		0,8-0,95	0,85-0,95	0,95
Бетон	0,65	0,9	0,9	0,95
Ткань		--	0,95	0,95
Стекло				
1. 3мм	0,27	0,30	0,98	0,85
2. 6мм	0,41	0,47	0,98	0,85
3. 12мм	0,63	0,69	0,98	0,85
4. 20 мм	0,80	0,85	0,98	0,85
Гравий		--	0,95	0,95
Гипс		--	0,4-0,97	0,8-0,95
Лёд		--	--	0,98
Известняк		--	0,4-0,98	0,98
Краска		--	--	0,9-0,95
Бумага		--	0,95	0,95
Пластик		--	0,95	0,95
Резина		--	0,9	0,95
Песок		--	0,9	0,9
Снег		--	--	0,9
Земля		--	--	0,9-0,98
Вода		--	--	0,93
Дерево		--	0,9-0,95	0,9-0,95

Металлы	Излучательная способность			
	Эффективная длина волны			
	1 мкм	2.2 мкм	5.1 мкм	8-14 мкм
Алюминий	0,1-0,2	0,02-0,2	0,02-0,2	0,02-0,1
Оксид алюминия	0,40	0,2-0,4	0,2-0,4	0,2-0,4
Оксид железа	0,7-0,9	0,7-0,9	0,6-0,9	0,5-0,9
Железо	0,35	0,1-0,3	0,05-0,25	0,05-0,2
Грубое железо		0,6-0,9	0,5-0,8	0,5-0,7
Литое железо	0,35	0,4-0,6	--	--
Сталь хол. проката	0,8-0,9	0,8-0,9	0,7-0,9	--
Листов. сталь	--	0,6-0,7	0,5-0,7	0,4-0,6
Отполиров. Сталь	0,35	0,2	0,1	0,1
Литая сталь	0,35	0,25-0,4	0,1-0,2	--
Оксислен. сталь	0,8-0,9	0,8-0,9	0,7-0,9	0,7-0,9
Нержав. сталь	0,35	0,2-0,9	0,15-0,8	0,1-0,8
Листовое железо оксидирован.	0,9	0,7-0,95	0,65-0,95	0,6-0,95
Листовое железо	0,35	0,3	0,25	0,2
Лист. железо литое	0,35	0,3-0,4	0,2-0,3	0,2-0,3
Обработан. железо (тусклое).	--	0,95	0,9	0,9

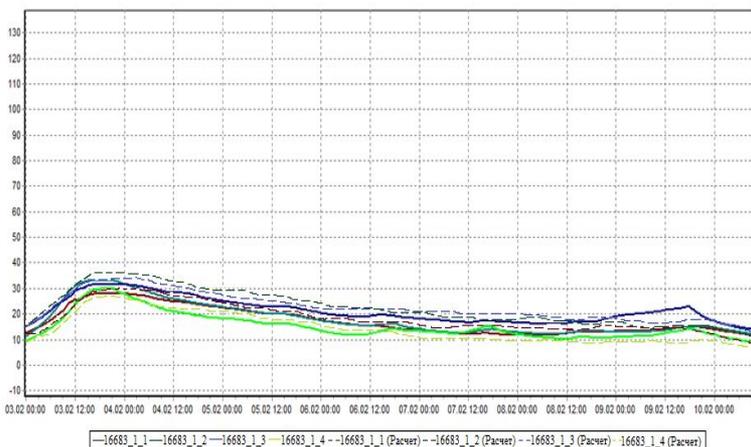
Датчик температуры 1-wire (°C)



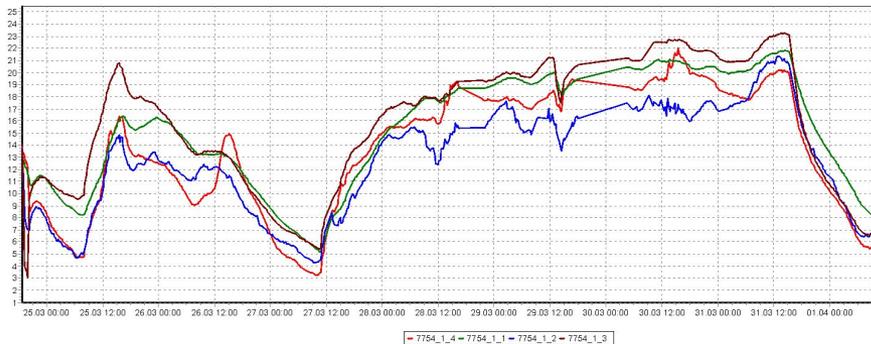
Датчик температуры 1-wire (°C)



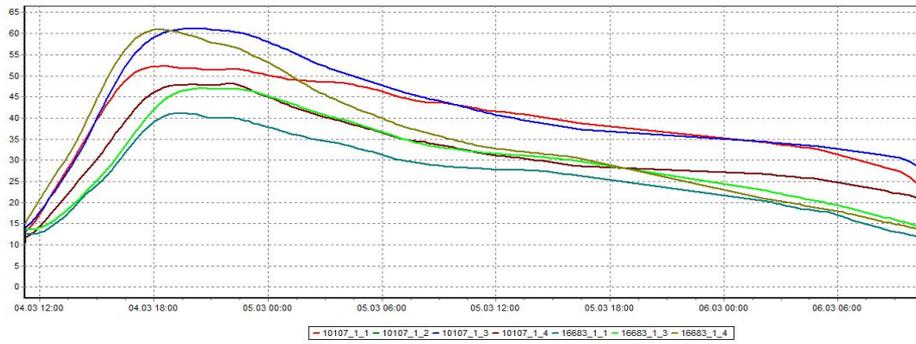
Датчик температуры 1-wire (°C)



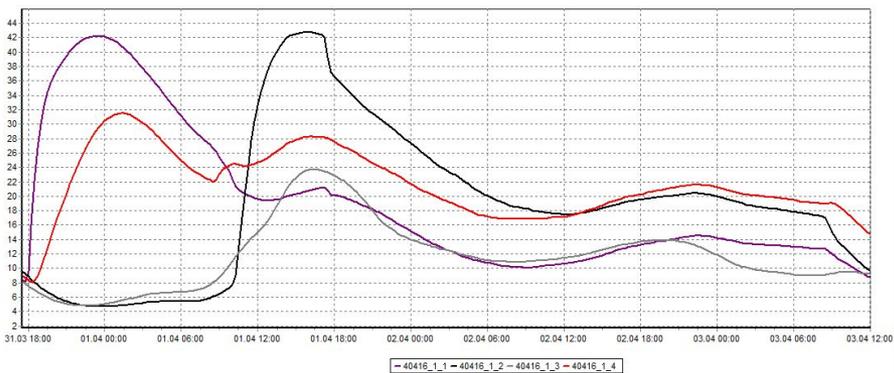
Датчик температуры 1-wire (°C)



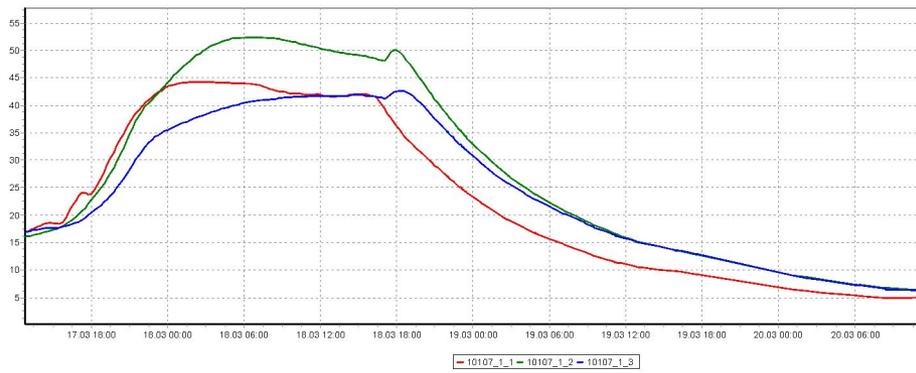
Датчик температуры 1-wire (°C)



Датчик температуры 1-wire (°C)



Датчик температуры 1-wire (°C)





**СПАСИБО  
ЗА ВНИМАНИЕ!**

2017 г.