

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 6. С. 141–156.

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

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2025; 27 (6): 141–156.

Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.328.1:693.557

DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-141-156

EDN: CULJAW

ДЕФЕКТОСКОПИЯ БЕТОНА КОНСТРУКЦИЙ С ВНЕШНЕЙ СТАЛЬНОЙ ОБОЛОЧКОЙ НА ОСНОВЕ ЗАКОНОВ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА В МАТЕРИАЛЕ

Пётр Дмитриевич Арленинов

*Научно-исследовательский, проектно-конструкторский
и технологический институт бетона и железобетона
им. А.А. Гвоздева, АО НИЦ «Строительство», г. Москва, Россия
Московский государственный строительный университет,
г. Москва, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Рассматривается проблема отсутствия апробированных методик неразрушающего контроля качества бетона в конструкциях, внешняя поверхность которых закрыта стальным листом (трубобетонные колонны, конструкции с внешним листовым армированием и несъемной опалубкой). Существующие методы, такие как визуальный контроль с помощью камер, обладают существенными недостатками, включая субъективность, технологические ограничения и невозможность проверки уже возведенных конструкций.

Цель. Разработка и экспериментальная апробация методики неразрушающего тепловизионного контроля сплошности бетона в композитных конструкциях со стальной облицовкой.

Материалы и методы. В качестве решения предлагается инновационная методика, основанная на тепловизионном контроле внешней поверхности стального листа. Ее физическая суть заключается в регистрации тепловизором температурных аномалий, возникающих из-за различной теплопроводности монолитного бетона и дефектов (полости, инородные включения). Метод применяется в двух режимах: пассивном – в период экзотермического тепловыделения при твердении бетона, а также активном – с искусственным нагревом или принудительным охлаждением конструкции для усиления теплового контраста.

Результаты. Методика была успешно апробирована на двух типах реальных конструкций: высотной трубобетонной колонне и армоопалубочном блоке с внешним листовым армированием. В ходе экспериментов, включавших закладку искусственных дефектов, продемонстрирована возможность надежного обнаружения дефектов, расположенных как вплотную к стальному листу, так и на глубине до 10 см. Эффективность метода подтверждена как на пике экзотермии, так и через 60 сут после бетонирования.

Полученные положительные результаты показывают перспективность методики для промышленного применения в качестве надежного инструмента контроля сплошности бетона в сложных композитных конструкциях.

Ключевые слова: внешнее листовое армирование, бетон, железобетон, контроль качества, дефектоскопия, тепловизор

Для цитирования: Арленинов П.Д. Дефектоскопия бетона конструкций с внешней стальной оболочкой на основе законов переноса тепла в материале //

Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.
2025. Т. 27. № 6. С. 141–156. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-141-156. EDN:
CULJAW

ORIGINAL ARTICLE

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF CONCRETE STRUCTURE WITH OUTER STEEL SHELL USING HEAT TRANSFER PRINCIPLES

Petr D. Arleninov

*Research, Development, Design and Engineering Institute
of Concrete and Reinforced Concrete, Moscow, Russia
The National Research Moscow State University of Civil Engineering,
Moscow, Russia*

Abstract. This article addresses the lack of proven non-destructive testing of the concrete quality in structures with an outer steel shell, such as concrete-filled steel tubes and structures with external steel plating or permanent formwork. Such methods as visual monitoring with cameras, have significant drawbacks, including subjectivity, technological limitations, and inability to inspect completed structures.

Purpose: The aim of this work is the development and validation of non-destructive testing of concrete structure with outer steel shell using heat transfer principles.

Methodology/approach: The proposed innovative methodology is based on thermal imaging of the outer steel surface. Its physical principle involves a thermal imager to detect temperature anomalies caused by the different thermal conductivity of solid concrete and defects (voids, inclusions). The method is applied in two modes. The passive mode utilizes exothermic heat releasing during the concrete curing, and the active mode involves the artificial heating or forced cooling of the structure to enhance thermal contrast.

Research findings: The proposed methodology was successfully tested on two types of real structures: a high-rise concrete-filled steel tube column and a wall segment with the outer steel shell plating. Experiments involving artificially created defects demonstrate the reliable flaw detection directly against the steel sheet and at a 10 cm depth. The effectiveness of this method is confirmed both during the peak exothermic reaction and after 60 days of concreting.

Research implication: This methodology can be used in industries as a reliable tool for monitoring the concrete integrity in complex composite structures.

Keywords: outer steel shell, concrete, reinforced concrete, quality control, non-destructive testing, thermal imaging, thermography

For citation: Arleninov P.D. Non-Destructive Testing of Concrete Structure with Outer Steel Shell using Heat Transfer Principles. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitektarno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2025; 27 (6): 141–156. DOI: 10.31675/1607-1859-2025-27-6-141-156. EDN: CULJAW

Введение

В 2026 г. в России планируется к выходу первый свод правил по проектированию железобетонных конструкций с внешним листовым армированием, за которым последует уже промышленное применение такой технологии. За рубежом исследования включения листа несъемной опалубки в работу конструкции начались достаточно давно. Такое техническое решение было впер-

вые запатентовано во Франции в 1966 г. Конструкции с внешним листовым армированием начали активно применяться в атомной отрасли [1–5] и в высотном строительстве [6, 7]. Основным преимуществом такой технологии является сокращение сроков строительства; это крайне важно и экономически, и репутационно, поскольку для сложных и уникальных объектов общий срок постройки часто находится в интервале от 5 до 10 лет [8–10]. При этом уменьшение срока бетонных работ может достигать 20–30 %.

В нашей стране непосредственно внешнее листовое армирование не применялось и не применяется до сих пор, поскольку отсутствуют нормы, по которым такие конструкции можно запроектировать, однако начиная с 1960-х гг. начались исследования новых конструктивных решений оболочек АЭС со стальной облицовкой, выполняющей функции несущей арматуры [11–13]. Такая система особенно актуальна для атомной отрасли, поскольку в ряде станционных помещений применение стальной несъемной опалубки продиктовано требованиями радиационной защиты, поэтому включение внешнего стального листа в работу конструкции кажется последовательным решением. Первое применение этой технологии в СССР состоялось при строительстве защитной оболочки реактора пятого блока Нововоронежской АЭС в 1972 г. Она имеет форму цилиндра и выполнена из бетона М400, а с внутренней стороны облицована стальным листом толщиной 6–10 мм. И хотя формально из-за отсутствия норм включать стальной лист в работу конструкции нельзя, при рассмотрении особых предельных состояний у проектировщиков при использовании таких конструктивных решений появляются определенные резервы.

Несмотря на появление данной технологии уже более 50 лет назад, к настоящему моменту апробированных методик контроля качества бетонирования конструкций, поверхность которых закрыта стальным листом, не существует. Это относится к конструкциям с несъемной опалубкой и с внешним листовым армированием. В настоящее время на всех строящихся объектах Росатома, как в России, так и за рубежом, широко применяются конструкции с несъемной опалубкой (в том числе двусторонней) внутри реакторных оболочек. Параллельно ведутся предпроектные работы по внедрению систем внешнего листового армирования – не только для атомных станций, но и в высотном строительстве.

Аналогичная проблема отсутствия апробированных методик контроля качества бетона характерна и для трубобетонных конструкций. Несмотря на длительную историю их исследования и массовое применение в промышленном и гражданском строительстве, данная проблема остается нерешенной как в России, так и за рубежом [14–15].

В разное время предлагались различные способы контроля качества бетона при закрытой сталью наружной поверхности – от ультразвукового до акустико-эмиссионного контроля [16–19], но развитие эти способы пока не получили. Одним из самых простых и старых способов является простукивание с внешней стороны (такой способ применяется при контроле колесных пар поездов), однако он крайне субъективен в части интерпретации дефекта контролером, также он позволяет определить только полости, расположенные вплотную к листу. Единственным применяемым способом контроля на текущий мо-

мент является видеосъемка процесса бетонирования с погружением камеры внутрь несъемной опалубки (трубы) на штанге с постепенным поднятием вместе с наполнением сечения бетоном. Однако, кроме имеющихся достоинств данного способа, очевидны и его недостатки.

1. Субъективность и зависимость от специалиста, осуществляющего работу.
2. Невозможно одновременно качественно выполнить съемку процесса заливки на всех этапах бетонирования со сплошным контролем.
3. Необходимо качественное освещение внутри опалубочной системы, а учитывая возможную высоту армоопалубочного блока (например, на зарубежных строительных площадках высота отдельных блоков, изготовленных на заводе, составляла более 10 м), это может быть сложным для выполнения.
4. Одновременное использование нескольких камер при заливке массивных конструкций. Это усложняет последующий анализ результатов съемки из-за необходимости синхронизации данных с каждой камеры.
5. Сложности контроля на участках с густым армированием, которое может быть в зоне стад-болтов непосредственно у стального листа, а именно в этих местах и возможно образование дефектов при бетонировании.
6. Риск отказа оборудования.
7. При обнаружении проблемы при бетонировании необходимо мгновенное принятие решения о продолжении работ.
8. Невозможно независимо проконтролировать уже залитые конструкции.

В статье [20] ранее была предложена концепция инновационной методики контроля сплошности бетона конструкций, внешняя поверхность которых закрыта стальным листом как во время бетонирования, так и в любой момент времени, основанная на тепловизионной съемке стального листа с внешней стороны конструкции. В настоящей статье приведены результаты апробации данной методики на двух реальных объектах: трубобетонных колоннах большой высоты и армоопалубочных блоках системы внешнего листового армирования. Кроме того, в исследовании детально описаны физические основы предлагаемого метода контроля.

Методы и материалы

При твердении бетона происходит экзотермическая реакция с выделением тепла в зависимости от количества и качества цемента, используемого в составе бетонной смеси, а также ряда других факторов (параметры сечения конструкции, температура окружающей среды и т. д.). Пик экзотермической реакции наступает на второй-третий день после бетонирования и может достигать 80 °С для массивных конструкций из высокопрочного бетона. При таком тепловыделении для бетонных или железобетонных конструкций, внешняя поверхность которых закрыта стальным листом, происходит последовательный нагрев сечения конструкции от центра к краю с последующим нагревом металлического листа. В месте возможного дефекта бетонирования внутри конструкции (из-за наличия полостей с низкой теплопроводностью) на внешней стороне стального листа образуются зоны аномалий с пониженной температурой, которые фиксируются с помощью тепловизора (рис. 1).

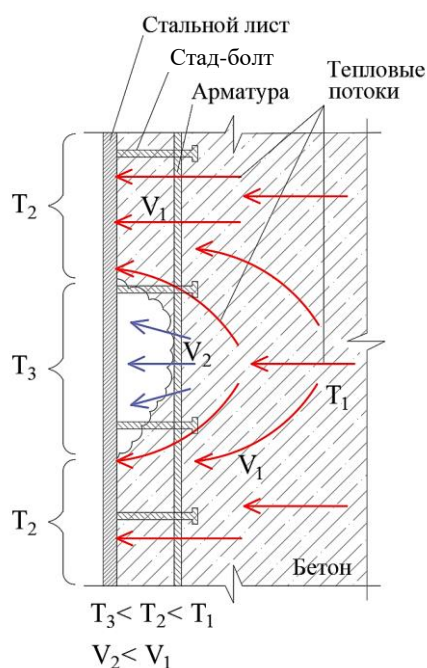


Рис. 1. Принцип работы предлагаемого метода

Fig. 1. Schematic view of the proposed method and thermal camera in operation

В случае минимальной разницы (до $10\text{ }^{\circ}\text{C}$) между температурой наружного воздуха и температурой внутри бетона, которая контролируется в отдельных точках посредством заранее установленных датчиков температуры (термопары или любые другие), тепло с поверхности внешнего стального листа снимается воздушным (вентиляторами) или водяным (увлажнением холодной водой) способом на пике экзотермической реакции. Датчики контроля температуры для оценки протекания экзотермической реакции закладываются внутри сечения, вплотную к стальному листу, а также на расстоянии 5 и 10 см от внутренней поверхности листа и в середине сечения. Охлаждение конструкции проводится с отслеживанием температуры по внутренним датчикам. Время охлаждения и характеристики используемых охлаждающих средств (температура и скорость ветрового потока, температура и объем охлаждающей жидкости) определяются посредством выполнения теплотехнического расчета.

Описанная методика применима и после завершения экзотермических процессов, когда температура конструкции стабилизируется и становится равной температуре окружающей среды. В этом случае конструкцию предварительно нагревают, контролируя внутреннюю температуру до достижения прогрева на глубину 15–20 см (поскольку на большей глубине образование дефектов маловероятно). Необходимая мощность и продолжительность нагрева определяются теплотехническим расчетом и уточняются на первом контрольном участке, оснащенном датчиками температуры.

Установка датчиков на всех конструкциях объекта не обязательна; достаточно оборудовать несколько участков с разнотипными конструкциями, разли-

чающимися, например, параметрами сечения, характеристиками стального листа, классом бетона и т. д. Равномерность прогрева обеспечивается комбинацией тепловых пушек и организацией замкнутых тепловых контуров.

Помимо контроля внутренних дефектов, настоящей методикой возможен контроль наличия и расположения внутренних стальных элементов, плотно примыкающих (приваренных) изнутри к стальному листу и также скрытых от осмотра (стад-болты, ребра внутри сечения листа). Эффект визуализации этих элементов на экране тепловизора достигается различной скоростью и объемом проходящего тепла через стальные элементы и бетон от центра сечения к краю к стальному листу.

Данная методика была апробирована на двух реальных разнотипных конструкциях – трубобетонные колонны большой высоты (пример 1) и армопалубочные блоки системы внешнего листового армирования (пример 2). В эти конструкции искусственно закладывались разные типы дефектов для оценки возможностей рассматриваемой методики. Исследуемые элементы были тестовыми и не использовались в качестве несущих конструкций зданий и сооружений.

Пример 1. Трубобетонная колонна. Исходные данные: высота колонн – 22 м; положение в пространстве – наклонные; бетон – В80; сечение трубы – 920 мм; толщина стенки – 8 мм; температура наружного воздуха – -7°C (январь); расстояние дефектов от верха трубы – 35 см (дефект № 1 – воздушная полость), 85 см (дефект № 2 – фрагмент пеноплекса).

Дефекты расположены между стенкой трубы и арматурным каркасом вплотную к трубе (рис. 2). Тепловизионное исследование проводилось на третий день после заливки.

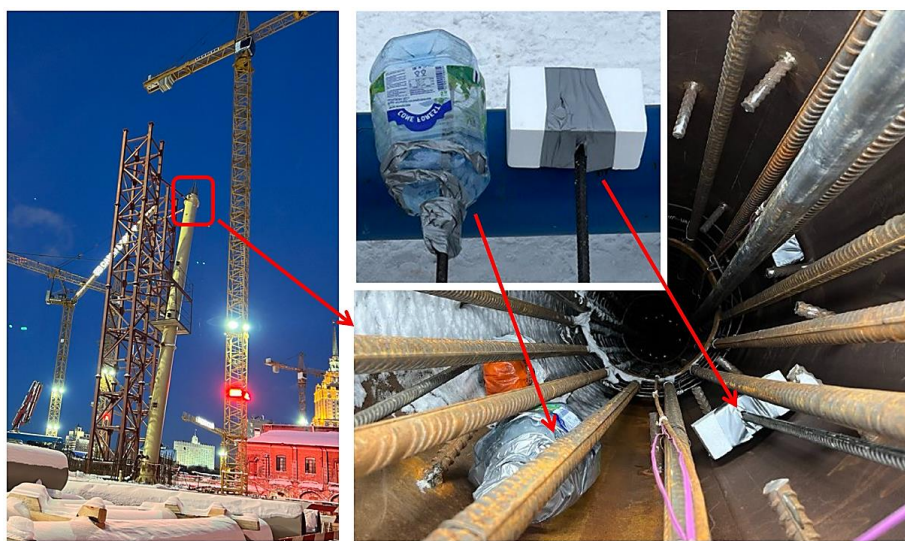


Рис. 2. Монтаж дефектов в верхней части трубобетонной колонны
Fig. 2. Flaw detection in the upper part of a shotcrete column

Пример 2. Армопалубочный блок П-образного фрагмента стен с системой внешнего листового армирования. Исходные данные: высота стены – 1,8 м;

толщина стены – 40 см; бетон – В40; толщина стенки – 10 мм; температура наружного воздуха – +20 ° (август), +7 °С (октябрь). Расположение и типы дефектов показаны ниже (рис. 3, 4). Тепловизионное исследование проводилось на 2, 3 и 60-й день после заливки.



Рис. 3. Монтаж дефектов внутрь стены с внешним листовым армированием
Fig. 3. Flaw detection in the wall with the outer steel shell

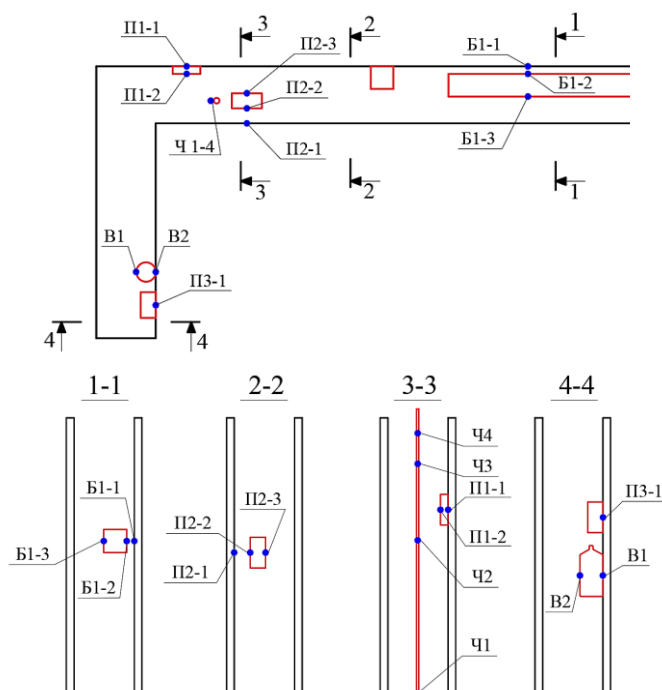


Рис. 4. Схема расположения установленных искусственных дефектов и датчиков контроля температуры
Fig. 4. Schematic of detected artificial defects and arrangement of temperature sensors

Результаты и обсуждение

Пример 1. Работа по исследованию работоспособности методики в трубо-бетонной колонне началась непосредственно перед заливкой данной конструкции, поэтому дефекты удалось заложить только в верхнюю часть колонны на расстоянии от верха не более метра (без установки внутрь контрольных датчиков температуры), а прогрев данной части колонны (работа проводилась зимой) практически не осуществлялся. Температура бетона вместо ожидаемой 50–60 °С оказалась менее 20 °С, а также, учитывая, что исследование проводилось с подъемника, выполнить работы по контролю в теплом контуре с возможностью дополнительного принудительного отвода тепла или нагрева не удалось.

Несмотря на такие неблагоприятные исходные условия (при отрицательной температуре наружного воздуха и минимальной положительной температуре внутри бетона трубы процесс теплопереноса от бетона к металлу осуществлялся по скорости, близкой к охлаждению вдоль металла листа), все дефекты удалось зафиксировать. На рис. 5 аномальные зоны металла трубы на экране тепловизора видны в синем цвете. При анализе термограммы по дефекту № 1 видны также аномально холодные фрагменты стальных ребер, выступающих на 20 см за поверхность трубы. Их наличие не помешало установить расположение дефекта, что свидетельствует о гибкости метода и возможности его применения на конструкциях, имеющих на внешней поверхности листа дополнительные стальные элементы – фрагменты болтов, ребра жесткости, фасонки и т. д. Положительные результаты эксперимента показали работоспособность методики, и это дало возможность уже полноценного участия в эксперименте с армопалубочным блоком системы внешнего листового армирования, рассмотренного ниже.



Рис. 5. Результаты тепловизионного исследования трубобетонной колонны
Fig. 5. Examination of shotcrete column using the thermal camera

Пример 2. Работа на фрагменте стены проводилась в несколько этапов.

1. Монтаж искусственных дефектов и термопар для возможности непрерывного контроля температуры во время испытания. Использовались три типа дефектов: фрагменты пеноплекса 20×20 см толщиной 5 и 10 см, воздушная полость 5 л, деревянные бруски сечением 15×15 см. Часть дефектов устанавливалась вплотную к металлическому листу, часть притапливалась на глубину до 10 см. В зоне дефектов датчики устанавливались внутри вплотную к стальному листу, между стальным листом и дефектом вплотную к дефекту, если он располагался на удалении от листа (такие сценарии также рассматривались) и в середине сечения стены. Этими датчиками контролировалось изменение температуры в зоне дефекта. Дополнительно в контрольной точке устанавливались 4 датчика по высоте стены.

2. Тепловизионное исследование проводилось в первые дни после бетонирования в период максимального экзотермического тепловыделения. Из-за малой толщины конструкции, использования бетона низкого класса и температуры окружающей среды около +20 °С температурный перепад между стальным листом и воздухом не превышал 10 °С. Кроме того, из-за небольших размеров искусственных дефектов тепло быстро распределялось по листу. Вследствие этого в пассивном режиме (без принудительного охлаждения или нагрева) дефекты идентифицировались нечетко и только те, что расположены вплотную к листу.

После принудительного охлаждения листа водой температурой +15 °С в течение короткого промежутка времени (расчетное время охлаждения составило около 10 мин) удалось выявить все приповерхностные дефекты. Они проявлялись в течение нескольких минут после начала охлаждения, т. к. тепло от более нагретого бетона начинало активно передаваться охлажденному листу. В зонах дефектов этот процесс происходит значительно медленнее из-за наличия воздушной полости, что и фиксируется тепловизором.

На рис. 6 представлены температурные кривые, зарегистрированные датчиками в конструкции. Видно, что экзотермический нагрев бетона начался через 7 ч после укладки, а пиковая температура в средней части сечения была достигнута через 24 ч. На графиках также отражен процесс принудительного охлаждения, проведенного на вторые сутки (правая часть графика, 43 ч). Это позволило оценить эффективность методики вне пика экзотермической реакции.

Интересный наблюдаемый эффект – влияние солнечного нагрева: участок листа в зоне датчика ПЗ-1 нагрелся до 46 °С, тогда как температура бетона за ним изменилась незначительно. Однако даже в этих условиях водяное охлаждение обеспечило быстрое остывание листа, и методика осталась работоспособной.

Дефекты, расположенные на удалении от поверхности, в данном эксперименте не идентифицировались. Следует отметить, что вероятность их образования невелика, т. к. основные дефекты формируются в зонах интенсивного армирования, где бетонная смесь уплотняется недостаточно эффективно. Для выявления подобных глубоких дефектов может потребоваться охлаждение большей продолжительности. При этом происходят следующие тепловые процессы:

– быстрое охлаждение стального листа на всю толщину;

– медленное охлаждение бетона от листа к центру, причем между листом и дефектом лист остывает быстрее, чем по неповрежденному сечению, поскольку отсутствует (снижена) подпитка теплом от центра сечения;

– охлаждение осуществляется до тех пор, пока температура непосредственно перед дефектом не начнет опускаться, чем больше производится охлаждение, тем более ярко проявятся дефекты на экране тепловизора.

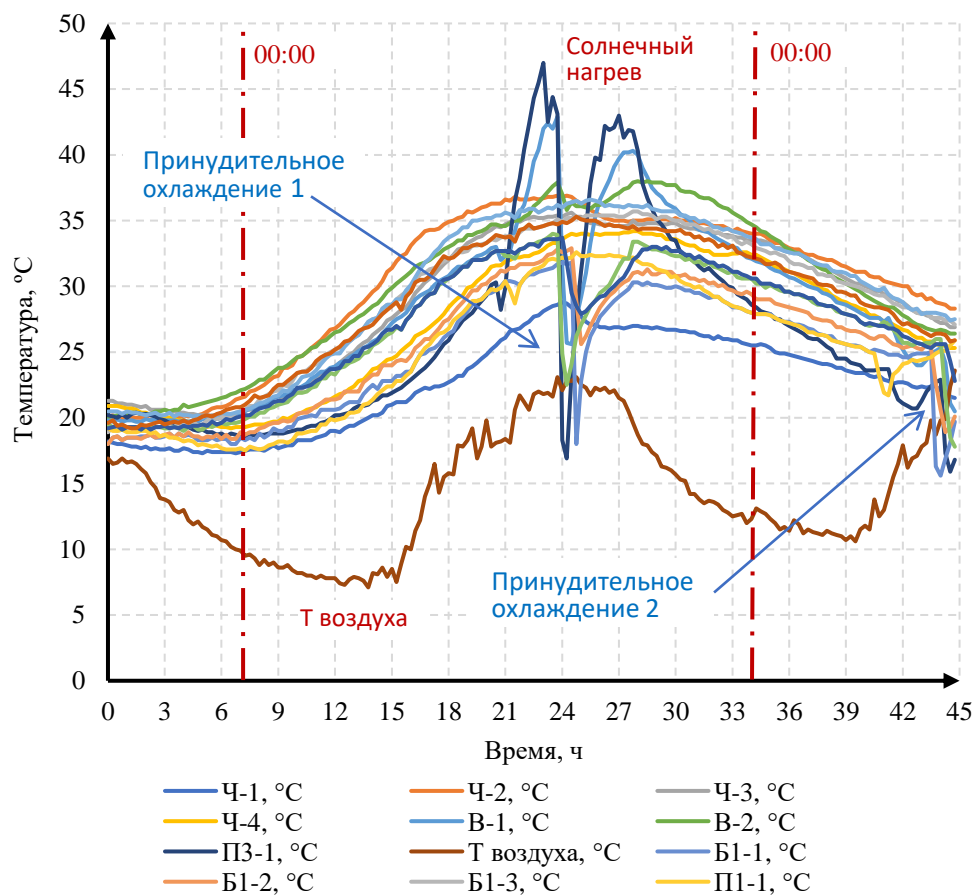


Рис. 6. Результаты температурного контроля в сечении конструкции сразу после заливки бетона
Fig. 6. Temperature control results in the structure cross-section after concreting

В рамках проводимого эксперимента после охлаждения около 30 мин удалось зафиксировать дефект (деревянный брусок Б1) на глубине 5 см в явном виде (отчетливо виден на экране тепловизора оператором), и дефект (фрагмент пенопласта П2) на глубине 10 см был виден не так явно (можно обнаружить уже в процессе постобработки тепловых снимков, но на экране тепловизора он идентифицируется менее четко). Действие методики усилится при следующих факторах: повышение температуры внутри сечения, снижение температуры используемых охлаждающих средств, увеличение размеров дефекта – все эти три фактора вполне осуществимы на строительной площадке, поскольку в рамках

проведенного эксперимента рассматривались наименее благоприятные сценарии. На рис. 7, 8 показаны результаты обнаружения фрагмента пенопласта ПЗ, установленного вплотную к листу, воздушной полости В1, касающейся листа частично, и горизонтально расположенного деревянного бруска Б1, расположенного на расстоянии 5 см от листа. Все показанные на рис. 4 другие дефекты также были успешно обнаружены.



Рис. 7. Фиксация дефектов ПЗ и В1

Fig. 7. Flow detection of P3 and V1

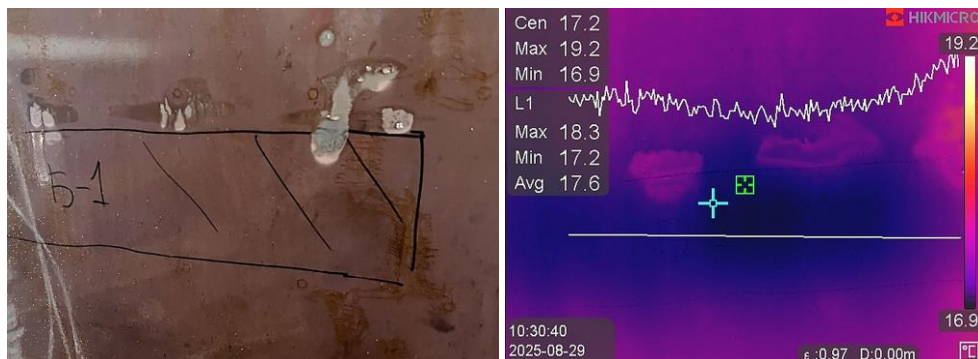


Рис. 8. Фиксация дефекта Б1, расположенного на расстоянии от листа 5 см

Fig. 8. Flow detection of B1 at 5 cm distance from the steel shell

Помимо обнаруженных дефектов, на рис. 7 четко видны все стад-болты, а также прерывистые сварные швы фасонного уголка (то есть возможность оценить тип применимых сварных швов – непрерывный, прерывистый, точечный), являющиеся элементами внутренней фермы конструкции. Это расширяет применение предлагаемой методики для контроля внутренней структуры стальных элементов сечения, расположенных вплотную к листу.

В рамках данного эксперимента также проводилось тепловизионное исследование рассматриваемого фрагмента конструкции через 60 сут после заливки. Весь процесс испытания был полностью идентичен описанному выше за исключением начального нагрева конструкции для искусственного воссоздания процесса экзотермии внутри бетонного сечения. Также, учитывая более низкую температуру наружного воздуха, принудительное охлаждение при обнаружении дефектов, расположенных вплотную к листу, удалось выполнить воздушным способом (обычным вентилятором). Нагрев осуществлялся тепловыми пушками внутри теплового контура в течение 12 ч. Графики распределения температур по сечению показаны на рис. 9.

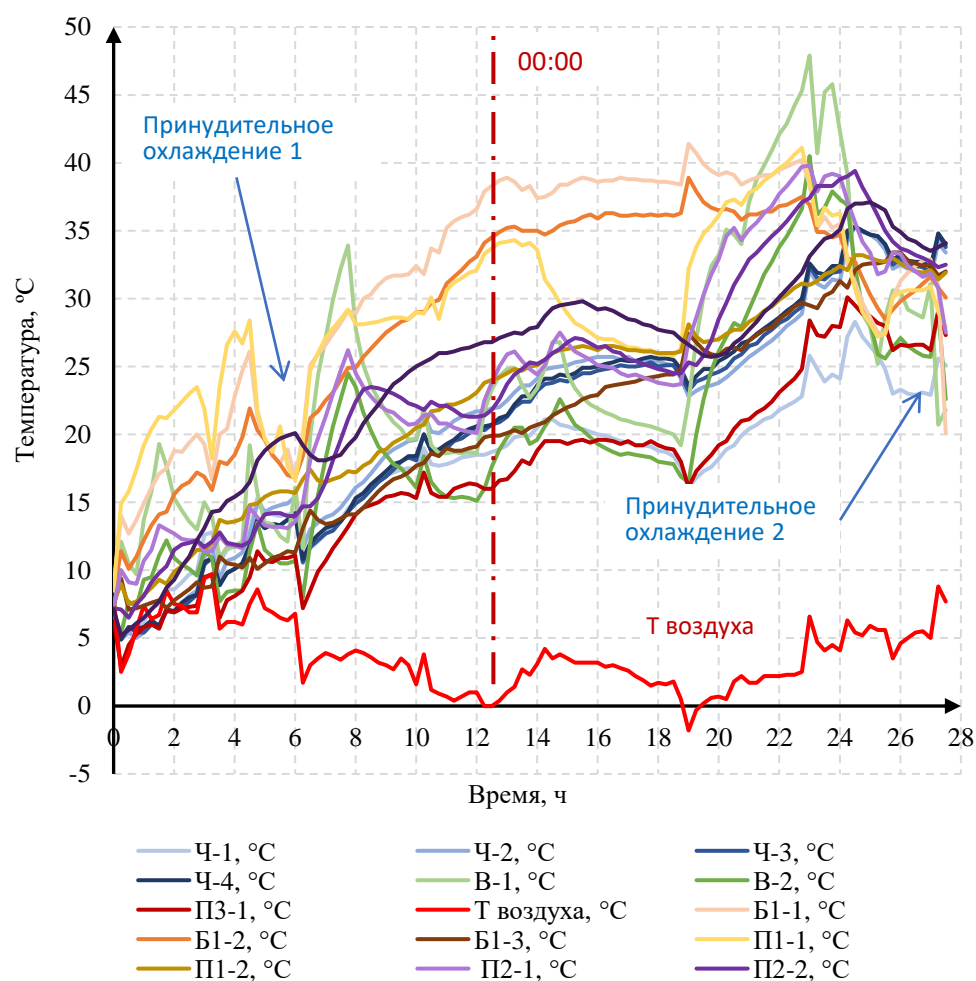


Рис. 9. Результаты температурного контроля в сечении конструкции в возрасте бетона 60 сут
Fig. 9. Temperature control results in the structure cross-section after 60-day concreting

По итогам испытаний был достигнут положительный результат, так же как и в первом эксперименте (в процессе твердения бетона), все дефекты были

обнаружены. Дополнительно во время этого испытания была проведена оценка работоспособности методики на окрашенном стальном листе, процесс тепловизионной съемки показан на рис. 1 (на экране тепловизора дефект ПЗ).

Заключение

По итогам проведенной работы по апробации предложенной методики тепловизионного контроля качества бетонирования конструкций, внешняя поверхность которых закрыта стальным листом, были получены положительные результаты на двух различных типах конструкции – трубобетонной колонне и фрагменте стены с внешней листовой арматурой. Была выполнена основная задача – при активном способе контроля (принудительное охлаждение снаружи стального листа) добиться эффекта, при котором наружный стальной лист становится прозрачным на тепловой картине и проявляются все дефекты бетонирования, это наглядно видно на рис. 7. Помимо зафиксированных дефектов, видны все шпильки (болты) как более горячие элементы: по ним тепло, как по трубкам радиатора, из центра сечения максимально быстро попадает к краю, а также стальной уголок внутренней рамы в виде вертикальной горячей полосы справа от дефекта В1.

Проведенные эксперименты позволили более глубоко понять физику тепловых процессов, происходящих в сталежелезобетонном сечении, подготовить основу для продолжения экспериментальных исследований в части разработки уже детальных критериев идентификации полученных термограмм, а также проведения термодинамических расчетов при пассивном и активном методе контроля.

Предложенная методика показала работоспособность как во время твердения бетона сразу после заливки, когда внутри сечения происходят экзотермические процессы, так и в любое время жизненного цикла конструкции (подтверждающие экспериментальные исследования были выполнены через 60 сут после заливки) и может быть рекомендована к промышленному применению.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Booth P.N. Analysis and Design of Modular Composite Walls for Combined Thermal and Mechanical Loading // 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20) Espoo, Finland, August 9–14, 2009. URL: <https://repository.lib.ncsu.edu/server/api/core/bitstreams/37990dba-7beb-428a-b543-ce0369de35d8/content> (дата обращения: 20.09.2025).
2. Ozaki M., Akita S., Oosuga H., Nakayama T., Adachi N. Study on Steel Plate Reinforced Concrete Panels Subjected to Cyclic In-Plane Shear // Nuclear Engineering and Design. 2004. V. 228. P. 225–244.
3. Takeuchi M., Narikawa M., Matsuo I., Hara K., Usami S. Study on a concrete fillet structure for nuclear power plants // Nuclear Engineering and Design. 1998. V. 179. P. 209–223.
4. Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Lai Z. Steel-Plate Composite (SC) Walls for Safety Related Nuclear Facilities: Design for In-Plane Force and Out-of-Plane Moments // Nuclear Engineering and Design. Special Issue on SMiRT-21 Conference. 2014. V. 269. P. 240–249.
5. Zhang K., Varma A.H., Malushte S., Gallocher S. Effect of shear connectors on local buckling and composite action in steel concrete composite walls // Nuclear Engineering and Design. 2014. V. 269. P. 231–239.

6. Shafaei S., Varma A.H., Seo J., Huber D., Klemencic R. Wind Design of Composite Plate Shear Walls/Concrete Filled (SpeedCore) Systems // *Engineering journal*. 2022. V. 59. P. 183–208.
7. Mithaiwala M.E., Patil A.A., Khadake N.V. A Review on Effect of Different Set of Stiffness Modifiers Varying Through Height of Structure on Analysis of Multi-Story R.C.C. Structure // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2020. V. 7. P. 845–849.
8. Шминдрук Е.В. Уникальные технологии строительства высотных зданий и сооружений // Перспективные этапы развития научных исследований: теория и практика : сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Кемерово, 15 июля 2019 г. Кемерово : ООО «Западно-Сибирский научный центр», 2019. С. 13–15.
9. Микрюкова Е.М., Николаев И.А. К вопросу о развитии строительства высотных зданий в России // *Строительство и застройка: жизненный цикл – 2020 : материалы V Международной (XI Всероссийской) конференции, Чебоксары, 25–26 ноября 2020 г. Чебоксары : Издательский дом «Среда», 2020. С. 40–46.*
10. Ahlfeldt G.M., Barr J. The economics of skyscrapers: A synthesis // *Journal of Urban Economics*. 2022. V. 129. DOI: 10.1016/j.jue.2021.103419
11. Коробов Л.А., Назарьев О.К., Карелин Е.П., Хайдуков Г.К. Железобетонные защитные оболочки АЭС. Москва : Атомиздат, 1978. 125 с.
12. Воронков Р.В. Железобетонные конструкции с листовой арматурой. Москва : Стройиздат, 1975. 144 с.
13. Белов В.В. Железобетонные резервуары давления с внешним листовым армированием. Нелинейное деформирование при силовых и температурных воздействиях : специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Белов Вячеслав Вячеславович. Ленинград, 1988. 206 с.
14. Wendrich A., Trela C., Krause M., Maierhofer C., Effner U., Wöstmann J. Location of Voids in Masonry Structures by Using Radar and Ultrasonic Traveltime Tomography // *ECNDT*. 2006. URL: <https://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.3.2.5.pdf> (дата обращения: 20.02.2025).
15. Мочко А., Мочко М., Андреев В.И. Проверка качества бетона в существующих конструкциях. Технологии европейских стандартов // *Вестник МГСУ*. 2019. Т. 14. № 8. С. 967–975. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.8.967-975
16. Коротких Д.Н., Дорф В.А., Капустин Д.Е., Зейд Килани Л.З. Контроль качества укладки монолитного бетона в конструкции с несъемной сталефибробетонной опалубкой // *Строительные материалы*. 2024. № 11. С. 31–39. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-830-11-31-39
17. Коротких Д.Н., Капустин Д.Е. Прогнозирование прочности и контроль качества укладки монолитного бетона в конструкциях с несъемной опалубкой // *Железобетонные конструкции*. 2024. Т. 8. № 4. С. 55–69. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.4.55-69
18. Сагайдак А.И. Стандарт на метод акустико-эмиссионного контроля бетонных и железобетонных изделий и монолитных конструкций // *Бетон и железобетон*. 2021. № 3 (605). С. 19–24.
19. Пивоваров В.А. Метрологическое обеспечение дефектоскопии бетона // *Альманах современной метрологии*. 2022. № 4 (32). С. 59–67.
20. Арленинов П.Д., Крылов С.Б., Калмакова П.С. Система контроля сплошности бетона сталежелезобетонных конструкций на основе тепловизионного метода // *Academia. Архитектура и строительство*. 2024. № 2. С. 150–156. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-2-150-156

REFERENCES

1. Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Booth P.N. Analysis and Design of Modular Composite Walls for Combined Thermal and Mechanical Loadings. *Transactions of the Internal Association for Structural Mechanics in Reactor Technology Conference, SMiRT-20*, Div. TS 6 Paper 1820, Espoo, Finland, IASMiRT, North Carolina State University, Raleigh, NC. 2009.
2. Ozaki M., Akita S., Oosuga H., Nakayama T., Adachi N. Study on Steel Plate Reinforced Concrete Panels Subjected to Cyclic In-Plane Shear. *Nuclear Engineering and Design*. 2004; 228: 225–244. Available: www.sci-hub.ru/10.1016/j.nucengdes.2003.06.010 (accessed July 25, 2024).

3. Takeuchi M., et al. Study on a Concrete Fillet Structure for Nuclear Power Plants. *Nuclear Engineering and Design*. 1998; 179: 209–223. Available: [www.sci-hub.ru/10.1016/S0029-5493\(97\)00282-3](http://www.sci-hub.ru/10.1016/S0029-5493(97)00282-3) (accessed July 25, 2024).
4. Varma A.H., Malushte S.R., Sener K.C., Lai Z. Steel-Plate Composite (SC) Walls for Safety Related Nuclear Facilities: Design for In-Plane Force and Out-of-Plane Moments. *Nuclear Engineering and Design. Special Issue on SMiRT-21 Conference*. 2014; 269: 240–249. Available: www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029549313005220?via%3Dihub (accessed July 25, 2024).
5. Zhang K., Varma A.H., Seo J., Huber D., Klemencic R. Effect of Shear Connectors on Local Buckling and Composite Action in steel Concrete Composite Walls. *Nuclear Engineering and Design*. 2014; 269: 231–239.
6. Shafaei S., Varma A.H., Seo J., Huber D., Klemencic R. Wind Design of Composite Plate Shear Walls/Concrete Filled (SpeedCore) Systems. *Engineering Journal*. 2022; 183–208: 2021–11.
7. Mithaiwala M.E., Patil A.A., Khadake N.V. A Review on Effect of Different Set of Stiffness Modifiers Varying through Height of Structure on Analysis of Multi-Story R.C.C. Structure. *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2020; 7: 845–849.
8. Shminderuk E.V. Unique Technologies for High-Rise Building Construction. In: *Proc. 3rd Int. Sci. Conf. 'Advanced Stages of Research Development: Theory and Practice'*. 15 July 2019. Kemerovo, 2019. Pp. 13–15. (In Russian)
9. Mikryukova E.M., Nikolaev I.A. Development of High-Rise Construction in Russia. In: *Proc. 5th Int. Sci. Conf. 'Construction and Housing: Life Cycle'*. 25–26 November 2020. Cheboksary: "SredA", 2020. Pp. 40–46. (In Russian)
10. Ahlfeldt G.M., Barr J. The Economics of Skyscrapers: A Synthesis. *Journal of Urban Economics*. 2022; 129. DOI: 10.1016/j.jue.2021.103419
11. Korobov L.A., Nazar'ev O.K., Karelin E.P., Khaidukov G.K. Reinforced Concrete Protective Shells for Nuclear Power Plants. Moscow: Atomizdat, 1978. (In Russian)
12. Voronkov R.V. Reinforced Concrete Structures with Steel Shells. Moscow: Stroiizdat, 1975. 144 p. (In Russian)
13. Belov V.V. "Reinforced concrete pressure vessels with external sheet reinforcement. Nonlinear deformation under force and temperature effects". PhD Thesis. Leningrad, 1988. – 206 p. (In Russian)
14. Wendrich A., Trela C., Krause M., Maierhofer C., Effner U., Wöstmann J. Location of Voids in Masonry Structures by Using Radar and Ultrasonic Travel-Time Tomography. *ECNDT*. 2006; 3.2.5: 11.
15. Mochko A., Mochko M., Andreev V.I. Checking the Concrete Quality in Structures. European Standard Technologies. *Vestnik MGSU*. 2019; 14 (8): 967–975. DOI: 10.22227/1997-0935. 2019.8.967-975. (In Russian)
16. Korotkikh D.N., Dorf V.A., Kapustin D.E., Zeid Kilani L.Z. Quality Control of Monolithic Concrete Placement in Structures with Permanent Steel Fiber-Reinforced Concrete Formwork. *Stroitel'nye materialy*. 2024; (11): 31–39. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-830-11-31-39 (In Russian)
17. Korotkikh D.N., Kapustin D.E. Strength Predicting and Quality Control of Cast-in-Situ Concrete Placement in Structures with Permanent Formwork. *Zhelezobetonnye konstruksii*. 2024; 8 (4): 55–69. DOI: 10.22227/2949-1622.2024.4.55-69 (In Russian)
18. Sagaidak A.I. Standard for Acoustic Emission Testing of Concrete and Reinforced Concrete Products and Cast-in-Situ Structures. *Beton i zhelezobeton*. 2021; 3 (605): 19–24. (In Russian)
19. Pivovarov V.A. Metrological Support for Concrete Flaw Detection. *Al'manakh sovremennoi metrologii*. 2022; 4 (32): 59–67. (In Russian)
20. Arleninov P.D., Krylov S.B., Kalmakova P.S. Thermal Imaging of Concrete Continuity in Steel Structures. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2024; (2): 150–156. DOI: 10.22337/2077-9038-2024-2-150-156 (In Russian)

Сведения об авторе

Арленинов Пётр Дмитриевич, канд. техн. наук, заместитель заведующего лабораторией, Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона

и железобетона НИЦ «Строительство», 109428, г. Москва, 2-я Институтская ул., 6, корп. 5; доцент, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университета, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, 26, niizhb_lab8@mail.ru

Author Details

Petr D. Arleninov, PhD, Research, Development, Design and Engineering Institute of Concrete and Reinforced Concrete, 6, 2-ya Institutskaya Str., 109428, Moscow, Russia; The National Research Moscow State University of Civil Engineering, 26, Yaroslavskoe Road, 129337, Moscow, Russia, niizhb_lab8@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19.11.2025
Одобрена после рецензирования 27.11.2025
Принята к публикации 28.11.2025

Submitted for publication 19.11.2025
Approved after review 27.11.2025
Accepted for publication 28.11.2025