УДК: 624.042.5
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.9
EDN: GCJQJT

Моделирование нагрева при длительной работе бетонных образцов под нагрузкой

П.Д. Арленинов[1,2]
[1] Научно-исследовательский проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», г. Москва, Российская Федерация
[2] Московский государственный строительный университет (МГСУ), г. Москва, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* В современных условиях развития атомной энергетики и использовании при строительстве, специальных бетонов и новых типов конструкций, особую актуальность приобретает изучение используемых материалов при повышенных температурах под действием длительных нагрузок. Существующие методики испытаний на ползучесть бетона при нагреве обладают рядом недостатков: сложность поддержания стабильных температурных условий, громоздкость оборудования, невозможность создания высоких нагрузок и отсутствие стандартизированных подходов к таким испытаниям в российских и международных нормах. В связи с этим возникает необходимость разработки новой, более эффективной методики, позволяющей проводить массовые испытания с высокой точностью и минимальными затратами, поскольку существующие методики по государственным стандартам не применимы к высокопрочным бетонам.
Задачей исследования является разработка экспериментальной методики для исследования деформаций ползучести бетона при температурах до 90°С, а также создание компактной системы локального нагрева образцов, совместимой со стандартными пружинными установками для возможности задания высоких нагрузок и использования существующей измерительной системы.
Результаты. Предложена инновационная трехкомпонентная система, включающая: тонкопластинчатые нагреватели с автоматикой контроля температуры, обеспечивающие равномерный нагрев образцов, сочетающаяся со стандартными пружинными установками и измерительным оборудованием. Проведенные тестовые испытания подтвердили работоспособность системы: достигнута стабильность температурного режима, обеспечена надежность измерений деформаций. Методика позволяет надежно и безопасно проводить длительные эксперименты.
Выводы. Разработанная методика обладает следующими преимуществами: универсальность: применима для бетона, железобетона и сталежелезобетона, включая образцы с листовым армированием; экономическая эффективность: использование серийного оборудования снижает затраты на испытания; высокая точность: автоматизация нагрева и модернизация измерительной системы минимизируют погрешности.

Ключевые слова: ползучесть бетона при нагреве, длительные исследования, моделирование температурных воздействий

Для цитирования: Арленинов П.Д. Моделирование нагрева при длительных испытаниях бетонных образцов // Известия КГАСУ, 2025, № 2(72), с. 99-107, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.9, EDN: GCJQJT

Modeling of heating during long-term operation of concrete specimens under load

P.D. Arleninov[1,2]
[1] Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev JSC "Research Center of Construction", Moscow, Russian Federation
[2] Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* In modern conditions of development of nuclear power engineering and the use of special concretes and new types of structures in construction, the study of materials used at elevated temperatures under the action of long-term loads is of particular relevance. Existing methods of testing for creep of concrete under heating have a number of disadvantages: difficulty in maintaining stable temperature conditions, bulky equipment, impossibility to create high loads and lack of standardized approaches to such tests in Russian and international norms. In this regard, there is a need to develop a new, more efficient methodology that allows mass testing with high accuracy and minimal costs, as the existing methods according to the state standard are not applicable to high-strength concrete.
The objective of the study is to develop an experimental methodology to investigate creep deformations of concrete at temperatures up to 90°C, and to develop a compact system for local heating of specimens, compatible with standard spring units for the possibility of setting high loads and using the existing measurement system.
Results. An innovative three-component system including thin-plate heaters with automatic temperature control, providing uniform heating of specimens, combined with standard spring units and measuring equipment was proposed. The conducted tests confirmed the system performance: the stability of the temperature regime was achieved; the reliability of deformation measurements was ensured. The methodology allows conducting long-term experiments reliably and safely.
Conclusions. The developed method has the following advantages: versatility: applicable for concrete, reinforced concrete and steel-reinforced concrete, including specimens with sheet reinforcement; cost-effectiveness: the use of serial equipment reduces testing costs; high accuracy: automation of heating and modernization of the measuring system minimize errors.

Keywords: creep of concrete under heating, long-term studies, modeling of temperature effects

For citation: Arleninov P.D. Modeling of heating during long-term operation of concrete specimens under load // News of KSUAE, 2025, № 2(72), p. 99-107, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.9, EDN: GCJQJT

1. Введение

В настоящее время наблюдается рост строительства объектов атомной промышленности [1-3], причем новые энергоблоки по отдельности и станции целиком проектируются и строятся как на территории Российской Федерации, так и за рубежом (Турция, Египет, Индия, Бангладеш, Китай, Иран, Венгрия), помимо этого в Московской и Новосибирской областях строятся два коллайдера. В современных объектах применяются и современные материалы – широко применяются высокопрочные бетоны, а также планируются к применению новые сталежелезобетонных конструкций [4-5].Поэтому крайне важной задачей является определение всего спектра характеристик используемых материалов, в частности информация по воздействию температур на высокопрочные бетоны, находящиеся под нагрузкой [6-7]. Так эксплуатационная температура в зоне локализации аварии реакторного отделения при различных сценариях может достигать 60ºС, а при контролируемых аварийных ситуациях до 90ºС в течении продолжительного времени. Важность понимания процессов деформирования бетона под нагрузкой при дополнительном нагреве видна из общей номограммы деформирования под постоянной нагрузкой во времени абстрактного материала при различной температуре, показанной на рис. 1 [8]. При уже детальном анализе графиков различных

исследований ползучести бетона при нагреве, например, [9] видно, что при температуре в бетоне 90ºС, деформации возрастают в 5 раз, а при увеличении температуры до 200ºС в 6 раз. График из данного исследования также приведен на рис. 1.

Проведение длительных испытаний по определению деформаций ползучести достаточно трудоемко и сложно само по себе [10-12] – необходимы климатические помещения со стабильным температурно-влажностным режимом; необходимы специальные установки, позволяющие поддерживать в образцах постоянный уровень напряжений; необходимо одновременно большое количество измерительного оборудования.

Учитывая длительность испытаний от полугода и более, испытательные установки, климатические помещения и используемое оборудование является по сути заблокированным на длительный срок, что не дает сделать такие испытания массовыми. Если дополнительно к стандартным испытаниям по определению деформаций ползучести добавить нагрев, то такие испытания уже переходят в разряд единичных [13].

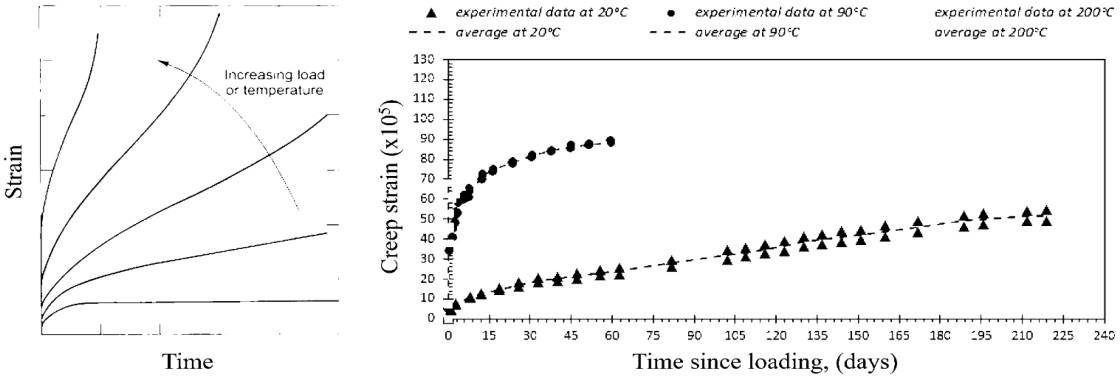

Рис. 1. Общая номограмма деформирования материала под длительно-действующей нагрузкой при различных температурах (слева) и график в координатах относительные деформации-время для высокопрочного бетона при нагреве
Иллюстрация слева[8], справа [9]
Fig.1. General nomogram of material deformation under long-acting load at different temperatures (left) and graph in coordinates relative deformations-time for high-strength concrete under heating (illustration on the left [8], on the right [9])

В нашей стране единственным нормативным документом, в котором приведена методика проведения длительных испытаний с одновременным нагревом бетонных образцов является ГОСТ 24544, которые предполагает использование специальных печей, теплоизолированных от окружающей среды в которые помещается образец. Измерение предполагается проводить с использованием индикаторов часового типа, которые фиксируют деформации базы измерения через выносные штанги, выполненные из материалов, слабо подверженных температурному расширению (кварцевое стекло или железоникелевый сплав при температурах до 200ºС). Нагружение предлагается осуществлять с помощью рычажной установки реверсивного типа.

В зарубежных стандартах таких как ASTMC512, ISO 1920-9, EN 12390-17 проведение таких испытаний не регламентируется. Единственный документ, который можно отнести к нормативному и описывающему проведение длительных испытаний бетонных образцов при нагреве являются рекомендации RilemTC 129-MHT от 2007г и состоящие из 11 частей, каждая из которые регламентирует отдельный тип испытаний – сжатие, растяжение, модуль упругости, усадка, ползучесть и т.д. В документе подробно описывается какие должны быть уровни напряжений, параметры нагрева, периодичность снятия показаний и т.д., но непосредственно процесс создания одновременного длительного сжатия и нагрева не описан, приведены только указания о необходимости использования нагревающих и нагружающих устройств, позволяющих создать НДС с требуемой точностью.

В современной литературе как в нашей, так и в зарубежной можно найти отдельные испытания такого типа [14], но при этом описательная часть нагружающих и нагревающих устройств обычно не приводится или приводится очень поверхностно, так

например в работе [15]испытательные установки целиком вместе с гидродомкратами помещались в печь (испытания проводились при температурах до 80ºС), но какие либо принципы построения такой системы и возможности испытаний не приводятся (очевидно что такой способ накладывает много ограничений как по испытательному и измерительному оборудованию, а также по мощности и величине установок). Исключение составляет группа исследований специалистов Санкт-петербургского Политехнического Университета [9], в работах которых испытательный процесс подробно описан – нагружение проводилось в стандартных пружинных установках, нагрев осуществлялся при помощи греющего провода, с ручной регулировкой реостатом, измерение стандартным стальными рамками и индикаторами часового типа по ГОСТ 24452. С оной стороны такие испытания достаточно просты, но также они имеют и свои недостатки – искажение показаний при нагреве измерительных рамочек как от самого образца, так и от соседних установок (соответственно необходимы какие-либо поправочные коэффициенты), отсутствие системы автоматического поддержания температурного режима в образце. Поэтому необходимо разработать новую, более эффективную методику, позволяющую проводить массовые испытания с высокой точностью и минимальными затратами.

2. Материалы и методы

Если предметно рассмотреть экспериментальную составляющую ползучести при нагреве, то можно выделить несколько сложных вопросов, которые необходимо решить при проведении таких испытаний:

- Невозможность одновременного нагрева всех образцов посредством подогрева воздуха внутри помещения, поскольку рабочие температуры при таких испытаниях начинаются от 60ºС, что делает невозможность работы в таких помещениях людей и высокоточного измерительного оборудования.
- Невозможность одновременно использовать стандартные пружинные установки и нагревательные печи, рекомендуемые ГОСТ 24544, в связи с их габаритными размерами.
- Невозможность использования рычажных установок, рекомендуемых ГОСТ 24544, поскольку в настоящее время проведение таких испытаний актуально в первую очередь для конструкций реакторных оболочек и конструкций уникальных зданий и сооружений, в которых используются преимущественно высокопрочные бетоны.
- Погрешности в испытаниях при использовании стандартных средств измерения (стальные рамочки), рекомендуемых ГОСТ 24452.

Предлагаемая методика испытаний одновременно является максимально простой, решает поставленные задачи с обеспечением требуемой точности и надежности измерений, позволяет использовать стандартные пружинные установки. Суть методики приведена ниже на рис. 2.

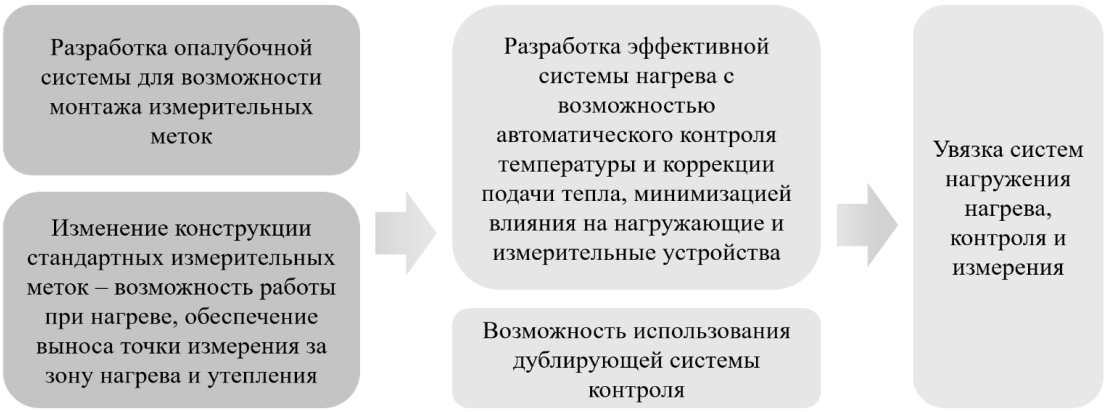

Рис. 2. Блок схема с концепцией испытательной системы (иллюстрация авторов)
Fig.2. Block diagram with test system concept (illustration by the authors)

Также методика подходит для оценки деформаций температурной ползучести в сталежелезобетонных конструкциях и систем с использованием внешнего листового армирования. Планируемые испытания будут проводится в температурном диапазоне 30-90ºС – моделирует работу железобетонных конструкций в зоне локализации аварии (ЗЛА) реакторных отделений атомных станций с возможностью оценки нештатной ситуации, но также методика позволяет проводить испытания и при температуре до 150-200ºС.

Предлагается нагрев осуществлять с помощью тонких пластинчатых радиаторов с нагревательной лентой из нихрома, которая расположена между изоляционным материалом (миканитом), помещенным в металлический корпус. Такая технология позволяет изготавливать П и Г образные формы нагревательных элементов в сочетании с отверстиями любой формы. Рабочая температура радиатора до 350ºС, то есть с двух-трехкратным запасом относительно задачи испытания. Радиаторы Г-образной формы сочетаются со стандартными образцами призмами, предпочтительный размер образцов 150х150х600мм, поскольку на призмах такого размера уже возможно смоделировать классическое и внешнее листовое армирование. На один образец крепится два радиатора и скручиваются между собой, обеспечивая жесткое фрикционное соединение с образцом. Радиаторы подключаются отдельно через автоматический котроллер температуры (с возможностью синхронизации), на котором возможно выставить диапазоны включения и выключения.

Так, например, если стоит задача поддержание температуры в образце 90ºС на контролере выставляется диапазон 89-91ºС, то есть если температура нагревательной платины опускается ниже 89ºС, то автоматически подается ток и включается нагрев, если поднимается выше 91ºС, то нагрев прекращается. Опытные образцы нагревательных элементов и блока управления приведены на рис.2. При этом параллельно проводится контроль фактической температуры непосредственно в образце и между образцом и нагревательной пластиной с помощью термопар. На стадии планирования эксперимента производится тестовый нагрев с контролем температуры в нагревательных элементах и в различных точках образца, подбираются переходные коэффициенты, которые используются при выставлении диапазонов требуемых температур на автоматическом контроллере.

Для устройства такой системы для испытания каждого образца собирается отдельный электрический шкаф (на рис.3 показан такой шкаф в исполнении сразу на серию из трех образцов). Теплоизоляция образца осуществляется с помощью мягкого рулонного утеплителя толщиной до 1-2см.

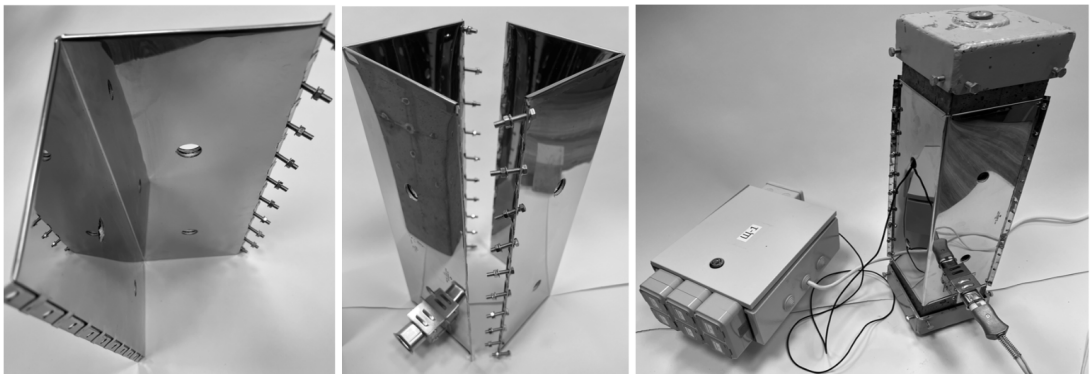

Рис.3. Система нагрева в сборе (иллюстрация авторов)
Fig.3. Heating system assembly (illustration by the authors)

Использование таких тонких нагревающих в комбинации с рулонным теплоизоляционным материалом позволило использовать в качестве измерительных устройств модернизированную систему, основанную на принципе DemecMechanicalStrain Gauge с использованием контрольных меток, которые изготавливаются увеличенной длины и с дополнительным анкерующим устройством с

возможностью установки при бетонировании образца. Стандартные и модернизированные метки, а также принцип съема показаний приведены на рис.4.

Учитывая, что выносные габаритные размеры таких меток будут не более 2-3см и при нагреве образца часть тепла в любом случае перейдет на эти метки, их расширение вдоль длинной части (то есть поперек образца) не окажет существенного влияния на результат эксперимента, а их поперечные деформации будут пренебрежимо малы относительно контролируемых деформаций.

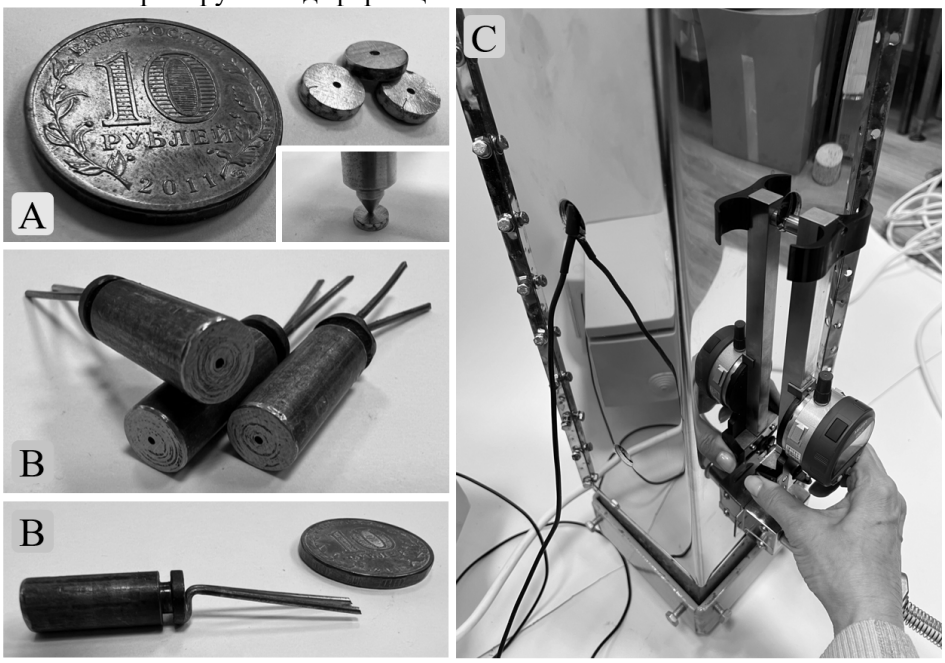

Рис.4. Модернизированные метки (B) относительно стандартных (A) для снятия показаний на основе принципа измерений DemecMechanicalStrain Gauge (C) (иллюстрация авторов)
Fig4. Modernized marks (B) relative to standard marks (A) for taking readings based on the Demec Mechanical Strain Gauge measurement principle (C) (illustration by the authors)

Бетонирование образцов осуществляется одновременно с установкой в них контрольных измерительных меток в соответствии с рис. 5.

Для этого вместо инвентарных форм предлагается использование специально изготовленных из ламинированной опалубочной фанеры, при этом метки по трем сторонам монтируются перед бетонированием после сборки опалубки, метки по четвертой открытой стороне можно либо не устанавливать, в таком случае показания будут сниматься по только по трем сторонам и на основании этих данных определяться среднее значение. При необходимости монтажа меток по четвертой стороне возможно использовать специальные кондукторы, в виде пластины с отверстиями, в которые закреплены сами метки. Пластины лучше сделать прозрачным, например, из оргстекла, чтобы была возможность визуального контроля внутренней стороны платины кондуктора и бетона. Такие пластины устанавливаются в проектное положение после заливки опалубки бетонной смесью и снимаются одновременно с разборкой опалубки.

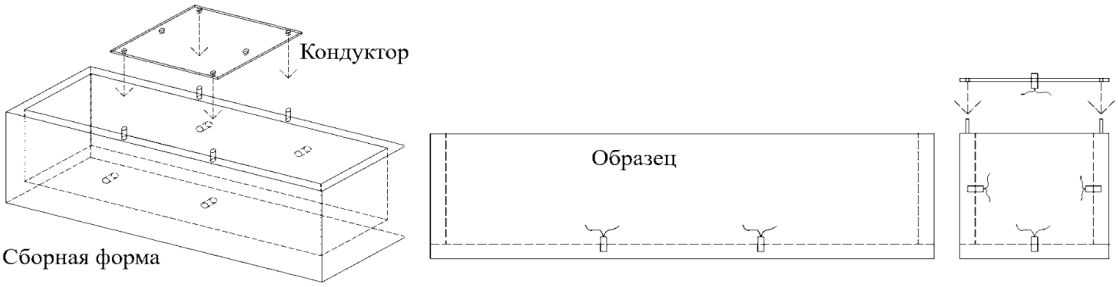

Рис. 5. Схема установки контрольных меток в опалубочную систему.
(иллюстрация авторов)
Fig.5. Scheme of setting the reference marks in the formwork system.
(illustration by the authors)

3. Результаты и обсуждение

Предложенная методика была разработана для проведения длительных испытаний образцов бетона, железобетона и сталежелезобетона при относительно невысоких температурах до 90ºС. Это является единственным ограничением, хотя именно такой диапазон температур и ставился целью методики, при этом возможности собранного комплекта оборудования позволяют поднять эту температуру до 150-200 ºС, но такие испытания рекомендуется проводить в отдельных специальных печах (специально разработанных по принципу рекомендаций ГОСТ 24544) и с выносными элементами из особых термостойких материалов поскольку такой порядок температур уже будет оказывать значительно большее влияние как на используемые пружинные установки, так и систему оснастки. Основным достоинством предложенной методики является возможность проводить простые массовые длительные испытания под воздействием температур, которые являются не аварийными, а именно рабочими эксплуатационными, при которых возможна плановая работа обычных железобетонных конструкции без каких-либо специальных мероприятий.

Испытания рекомендуется проводить в просторном цеху, а не в климатической камере, чтобы одновременно обеспечить достаточно быстрое снятие тепла с испытательной установки и отсутствием влияние данных температурных возбудителей на стабильный температурное влажностный режим климатических помещений. Учитывая, что испытываемые образцы будут полностью закрыты со всех сторон (это справедливо как для образцов в пружинных установках при испытаниях на ползучесть, так и для контрольных образцов в которых определяются деформации усадки), и будут находиться в режиме постоянного нагрева то стабильного поддержания влажностного режима в окружающей среде не требуется (который достигается только в климатической камере), и это не будет оказывать существенного влияния на результаты испытаний. Важный моментом, на который необходимо обратить внимание при проведении таких испытаний является обеспечение отсутствия стесняющего эффекта обоймы используемых нагревательных элементов, чтобы позволить образцу свободно деформироваться в поперечном направлении.

При планировании похожих испытаний особое внимание необходимо уделить вопросу миграции влаги в процессе эксперимента. При моделировании реального процесса эксплуатации – это могут быть как объекты атомной отрасли, так и просто уникальные здания, и сооружения, в которых возможны рассмотренные температурные режимы эксплуатации. Возможный нагрев таких железобетонных конструкций начинается спустя нескольких лет (поскольку строительство сложных объектов обычно сильно растянуто во времени), а обычно более пяти лет с момента их заливки бетоном. К этому времени практически полностью будут завершены усадочные процессы в бетоне и частично выбраны деформации ползучести. Также после окончания всех процессов гидратации, которые проходят в первый год твердения, свободная вода или будет заключена в межпоровом пространстве, или испарится с открытых поверхностей конструкции. При нагреве бетона при авариях температура окружающей среды составит более ста градусов по цельсию, что приведет к нагреву несвязанной воды в теле бетона, заключенной в межпоровом пространстве. При ее нагреве и миграции за счет сети пор, будут происходить реакции гидратации с непрореагированными зернами цемента. В связи с этим необходимо обеспечить возможность отвода пара (поровая влага выйдет, микропоровая останется) если в реальной конструкции такая возможность присутствует, это можно сделать с помощью дополнительно предусмотренных вентиляционных отверстий в нагревательных пластинах и теплоизоляционном слое. Преимущества разработанной методики относительно это в первую очередь, это работа в атематическом режиме, безопасность проведения испытаний, простота монтажа и относительно невысокая стоимость используемого оборудования

4. Заключение

Разработана концепция трехкомпонентной системы, позволяющей безопасно проводить испытания по определению ползучести бетона в стандартных пружинных установках без их дополнительной модернизации.

Разработанная система нагрева позволяет в автоматическом режиме равномерно нагревать образцы бетона до 200ºС с автоматическим контролем температуры до 1ºС.

Предложенная методика позволяет испытывать образцы любой формы в том числе образцы с внешним листовым армированием. Ограничением служат внутренние габариты и мощность используемых пружинных установок. Для испытаний по определению усадки ограничений нет.

Предложенная методика съема показаний является одновременно крайне простой и обеспечивают требуемую надежность измерений.

Изготовлены опытно-промышленная партия образцов системы, проведены тестовые испытания по контролю автоматики, выполнены тестовые заливки отработана система установки контрольных меток.

Список литературы/References

1. Соловьев С.П., Иванов Ф.М. Высокопрочные бетоны в конструкциях АЭС. – СПб.: Политехника, 2015
   Solovyov S.P., Ivanov F.M. High-Strength Concretes in NPP Structures. – St. Petersburg: Politekhnika, 2015
2. Должиков Н. С. Железобетон и его применение в современном строительстве / Современные перспективы развития гибких производственных систем в промышленном гражданском строительстве и агропромышленном комплексе: Сборник научных статей 2-й Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров, Курск, 23 мая 2024 года. – Курск: ЗАО "Университетская книга", 2024. – С. 192-194. – EDN UQZVXB. // Dolzhikov N. S. Reinforced concrete and its application in modern construction / Modern prospects for the development of flexible production systems in industrial civil engineering and agro-industrial complex: Collection of scientific articles of the 2nd All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Postgraduates, Masters and Bachelors, Kursk, May 23, 2024. – Kursk: ZAO "University Book", 2024. – Pp. 192-194.
3. Бадретдинова Э. З. строительство атомных станций / МИРОВЫЕ ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СОВРЕМЕННОСТИ. Технический ПРОГРЕСС: материалы VIII международной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 31 мая 2023 года / Автономная некоммерческая организация «Национальный исследовательский институт дополнительного профессионального образования» (АНО «НИИ ДПО»). – Ростов-на-Дону: Общество с ограниченной ответственностью "Издательство "Манускрипт", 2023. – С. 167-169.
   Badretdinov E. Z. Construction of nuclear power plants / WORLD NATURAL SCIENCE RESEARCH OF MODERNITY. TECHNICAL PROGRESS: Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference, Rostov-on-Don, May 31, 2023 / Autonomous Non-Profit Organization "National Research Institute of Additional Professional Education" (ANO "NII DPO"). – Rostov-on-Don: Limited Liability Company "Manuscript" Publishing House, 2023. – Pp. 167-169. – EDN BDWEXQ.
4. Травуш В.И., Каприелов С.С., Конин Д.В., Крылов А.С., Чилин И.А. Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций, работающих на изгиб. // Строительство и реконструкция. 2017;(4):63-71
   Travush V.I., Kaprielov S.S., Konin D.V., Krylov A.S., Chilin I.A. Experimental Studies of Steel-Fiber-Reinforced Concrete Structures Under Bending. // Construction and Reconstruction. 2017;(4) P. 63-71
5. Travush V. I., Konin D. V., Krylov A. S. Strength of composite steel and concrete beams of high-performance concrete // Magazine of Civil Engineering. – 2018. No. 3 (79). P. 36-44.
6. 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. USA, 2009.
7. Varma A.H., Zhang K., Malushte S.R. Local Buckling of SC Composite Walls at Ambient and Elevated Temperatures // Transactions of the 22nd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 22), San Francisco, CA, IASMIRT, North Carolina State University, Raleigh, NC. USA, 2013.
8. Pfeifer M. Materials enabled designs. 2009. Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8287-9.X0001-8.
9. Baranov A., Strakhov D. Creep of High Strength Concrete at Elevated Temperatures; 2023; Construction of Unique Buildings and Structures; 107 Article No 10704. doi: 10.4123/CUBS.107.4
10. Арленинов П.Д., Крылов С.Б., Конин Д.В., Нещадимов В.А. Узлы экспериментальных установок для проведения испытаний бетона на ползучесть. Строительные материалы. 2024. № 1-2. С. 67-73
Arleninov P.D., Krylov S.B., Konin D.V., Neshchadimov V.A. Components of Experimental Setups for Concrete Creep Testing. Construction Materials. 2024. No. 1-2. P. 67-73
11. Арленинов П.Д., Калмакова П.С., Нещадимов В.А., Римшин В.И. Исследование эффектов гидроизоляции бетонных образцов при проведении длительных испытаний. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2024. № 3 (783). С. 89-99
Arleninov P.D., Kalmakova P.S., Neshchadimov V.A., Rimshin V.I. Study of Hydroisolation Effects in Concrete Specimens During Long-Term Testing. News of Higher Educational Institutions. Construction. 2024. No. 3 (783). P. 89-99
12. Травуш В.И., Арленинов П.Д., Десяткин. Исследование ползучести сталежелезобетонных образцов. Строительство и реконструкция / // Строительство и реконструкция. 2024. №1(111). С. 49-63
Travush V.I., Arleninov P.D., Desyatkin. Study of Creep in Steel-Fiber-Reinforced Concrete Specimens. Construction and Reconstruction / // Construction and Reconstruction. 2024. No. 1(111). P. 49-63
13. Korsun V., Korsun A. and Volkov A. (2013) Characteristics of Mechanical and Rheological Properties of Concrete under Heating Conditions up to 200°C. MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 6. https://doi.org/10.1051/MATECCONF/20130607002.
14. Torrenti J.M. (2017) Basic Creep of Concrete-Coupling between High Stresses and Elevated Temperatures. European Journal of Environmental and Civil Engineering, Taylor & Francis, 22, 1419–1428. https://doi.org/10.1080/19648189.2017.1280417.
15. Ladaoui W., Vidal T., Sellier A. and Bourbon X. (2013) Analysis of Interactions between Damage and Basic Creep of HPC and HPFRC Heated between 20 and 80 °c. Materials and Structures/Materiaux et Constructions, 46, 13–23. https://doi.org/10.1617/s11527-012-9879-1.

Информация об авторах

Арленинов Петр Дмитриевич, кандидат технических наук, научно-исследовательский и проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация
Email: niizhb_lab8@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4737-1549

Information about the authors

Petr D. Arleninov, Candidate of Technical Sciences, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev JSC “Research Center of Construction”, Moscow, Russian Federation
Email: niizhb_lab8@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4737-1549

Дата поступления: 09.04.2025 *Дата принятия: 21.05.2025*