



УДК 624.3.019.32

DOI: 10.22227/2949-1622.2026.1.3-23

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ/RESEARCH ARTICLE

## Сопротивление железобетонных плит ударным нагрузкам

А.Г. Тамразян\*

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Российская Федерация

\*tamrazian@mail.ru

**Ключевые слова:** железобетонная плита, армирование, ударные нагрузки, высота падения, скорость масс, прогиб, повреждение, пробивание

### История статьи

Поступила в редакцию: 03.12.2025

Доработана: 21.12.2025

Принята к публикации: 26.12.2025

### Для цитирования

Тамразян А.Г. Сопротивление железобетонных плит ударным нагрузкам // Железобетонные конструкции. 2026. Т. 13. № 1. С. 3–23.

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований для изучения работы железобетонных плит под воздействием низкоскоростных ударных нагрузок. Ударные нагрузки создавались на образцах свободно падающим грузом, ударяющим на образцы в средней точке. Результаты этих испытаний показали, что ударное поведение плит значительно отличается от их статического поведения. Профили перемещения и распределение сил сильно изменяются из-за высоких инерционных сил во время удара. Собранные данные испытаний с целью понимания поведения железобетонных плит под ударными нагрузками, которые могут быть использованы в дальнейших исследованиях и послужить отправной точкой для разработки методов анализа и проектирования ударных нагрузок. Изучение поведения железобетонных плит, подверженных ударным нагрузкам, требует хорошо разработанной экспериментальной программы в сопровождении численных и аналитических исследований. Экспериментальные исследования имеют решающее значение для проверки аналитических и численных методов. В данном исследовании изучается поведение железобетонных плит, испытанных под различными ударными нагрузками, и результаты сравниваются с поведением идентичных образцов, испытанных под статическими нагрузками.

## Resistance of Reinforced Concrete Slabs to Impact Loads

A.G. Tamrazyan\*

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), Moscow, Russian Federation

\* tamrazian@mail.ru

**Ашот Георгиевич Тамразян**, член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; eLIBRARY SPIN-код: 2636-2447, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788, E-mail: Tamrazian@mail.ru

© Тамразян А.Г., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

**Keywords:** reinforced concrete slab, reinforcement, impact loads, drop height, mass velocity, deflection, damage, penetration

**Article history**

Received: 03.12.2025

Revised: 21.12.2025

Accepted: 26.12.2025

**For citation**

Tamrazyan A.G. Resistance of Reinforced Concrete Slabs to Impact Loads. *Reinforced concrete structures*. 2026; 1(13):3-23.

**Abstract.** The results of experimental studies examining the performance of reinforced concrete slabs under low-velocity impact loads are presented. Impact loads were generated on specimens using a freely falling weight, striking the specimens at their midpoint. These tests showed that the impact behavior of the slabs differs significantly from their static behavior. Displacement profiles and force distributions change significantly due to the high inertial forces during impact. Test data were collected using well-equipped instrumentation to understand the behavior of reinforced concrete slabs under impact loads. This data can be used in further research and serve as a starting point for the development of analysis and design methods for impact loads. Studying the behavior of reinforced concrete slabs subjected to impact loads requires a well-designed experimental program accompanied by numerical and analytical studies. Experimental studies are crucial for validating analytical and numerical methods. This study investigates the behavior of reinforced concrete slabs tested under various impact loads and compares the results with the behavior of identical specimens tested under static loads.

## ВВЕДЕНИЕ

При проектировании железобетонных конструкций необходимо учитывать различные комбинации нагрузок, такие как землетрясения, взрывы, ударные, а также гравитационные нагрузки. Поэтому ударные нагрузки стали предметом изучения многих проектировщиков и исследователей [1–3]. Конструкции по разным причинам могут подвергаться ударным нагрузкам, например при столкновениях транспортных средств, обвалах горных пород, авариях на производстве, военных действиях и террористических актах. С целью предотвращения катастроф экспериментальные и численные исследования железобетонных конструкций играют важную роль в понимании их поведения под воздействием ударных нагрузок. Военные нужды инициировали исследования ударных нагрузок, которые в основном были направлены на проектирование и анализ конструкций, подверженных высокоскоростным ударам, таким как удары баллистических снарядов [4–6].

В центре внимания исследований находится локальная реакция железобетонных элементов, в частности проникновение и пробитие железобетонной конструкции снарядом с высокой скоростью в диапазоне 10–100 м/с и меньшим диаметром относительно толщины поражаемого объекта. Однако, по сравнению с военными применениями и террористическими атаками, чаще встречаются проблемы, характерные для гражданского строительства, такие как камнепады, обледенение и столкновение транспортных средств с опорами мостов. В этих случаях объект реагирует на удар глобально, как и вся конструкция, и получает значительные повреждения за пределами точки удара.

Анализ и проектирование железобетонных конструкций, подверженных ударным нагрузкам в сочетании с другими воздействиями, как, например, огневыми, также являются областью повышенных интересов для исследователей в различных областях [7–10].

Первоначальные исследования были направлены на прогнозирование глубины проникновения снаряда, скорости вылета и сопротивления конструкции.

*Ashot G. Tamrazyan*, Corresponding Member of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2636-2447, Scopus: 55975413900, ResearcherID: T-1253-2017, ORCID: 0000-0003-0569-4788, E-mail: Tamrazian@mail.ru

Первое большое исследование сопротивления бетонных стен ударам высокоскоростных снарядов из огнестрельного оружия относится к середине 18 в.

Исследования [11] в 1742 г., Poncelet в 1830 г. и Resel в 1895 г. являются самыми ранними примерами таких исследований [12].

С развитием железобетона и увеличением производственных требований такие подходы для целей проектирования железобетонных конструкций, подверженных ударным нагрузкам, оказались недостаточными.

Согласно существующим формулам пробития, элементы конструкции, которые выполнены из высокопрочного бетона (High Strength Concrete, HSC) и предназначены для защиты от ударов снарядов, имеют более высокие характеристики. Но с ростом прочности бетона, из-за его относительно высокой хрупкости, увеличиваются отколы на задней поверхности конструкций. Поэтому важно повысить ударную вязкость элементов из HSC. Одним из решений является армирование проволочной сеткой и волокнами [13].

Исследования показывают, что использование стальных армирующих стержней не обеспечивает защиты бетона от ударов, в отличие от армирования волокнами [14] или покрытий [15] с целью увеличения поглощения энергии. Решающую роль в сдерживании фрагментации материала играет металлическая сетка [16].

Сегодня это самый используемый материал для строительства противоударных оборонных объектов (ДОТ, бункер, каземат, бомбоубежище и др.) и ответственных сооружений (посольство, правительственный объект, атомная электростанция, мост, плотина и др.).

Наиболее часто используемыми моделями для условий экстремального нагружения железобетонных конструкций являются модели HJC, RHT и CDP. Эти определяющие соотношения реализованы в различных нелинейных решателях конечных элементов, таких как LS-DYNA и ABAQUS.

В работе [17] в LS-DYNA провели численное моделирование испытаний на удар плит толщиной 50 мм из 3-х видов бетона с номинальным пределом прочности при сжатии 35, 75 и 110 МПа и получили хорошее соответствие между экспериментальными и численными результатами.

В работе [18] обнаружили, что высокопрочный бетон, армированный стальными волокнами (Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete, SFRHSC) с прочностью на сжатие 100 Мпа, оказался наиболее эффективным для противоударных защитных сооружений.

Композиты на основе цемента, такие как высокопрочный бетон (High Strength Concrete, HSC) и HSC, армированный стальной фиброй (Steel Fiber Reinforced High Strength Concrete, SFRHSC), считаются рациональным материалом как для военных, так и для гражданских защищенных сооружений, таких как защитная оболочка АЭС и другие конструкции, которые спроектированы так, чтобы выдерживать преднамеренные и случайные ударные нагрузки, вызванные снарядами, осколками и т.д.

В работах [19, 20] рассмотрены железобетонные балки при кратковременном динамическом нагружении с учетом податливости опор.

В работе [14] провели испытания высокоскоростных снарядов на пробитие мишеней SFRHSC со скоростями поражения 510–1320 м/с. Эксперименты подтвердили, что SFRHSC обладает отличной ударопрочностью против проникновения снаряда, например уменьшением глубины проникновения и размеров кратера твердого материала, а также разрушает структуру

и отклоняет конечную баллистическую траекторию абразивного снаряда. При этом тенденция не является линейной.

Дальнейшее повышение прочности на сжатие требует снижения соотношения В/Ц и устранения крупных заполнителей, однако это не приводит к уменьшению глубины проникновения и диаметра кратера. Наличие крупных заполнителей из гранита, по-видимому, полезно с точки зрения уменьшения глубины проникновения, диаметра кратера и распространения трещин, что способствует повышению ударопрочности.

Они определили, что стальная фибра незначительно улучшает сопротивление проникновению, но препятствуют видимым повреждениям бетона, вносит основной вклад к уменьшению диаметра кратера и предотвращению распространения трещины. Также выяснили, что SFRHSC с прочностью на сжатие 90 МПа и с соотношением стальной фибры 1,5 % — наиболее эффективный и экономичный выбор для защитных конструкций.

Включение стальной фибры в бетон уменьшило диаметр кратера и распространение трещины, но не оказало существенного влияния на глубину проникновения.

Стальная фибра обычно используется при строительстве ответственных объектов (оборонного) двойного назначения. При строительстве гражданских объектов в основном используется полипропиленовая фибра, она нужна, чтобы уменьшить трещины на поверхности бетона.

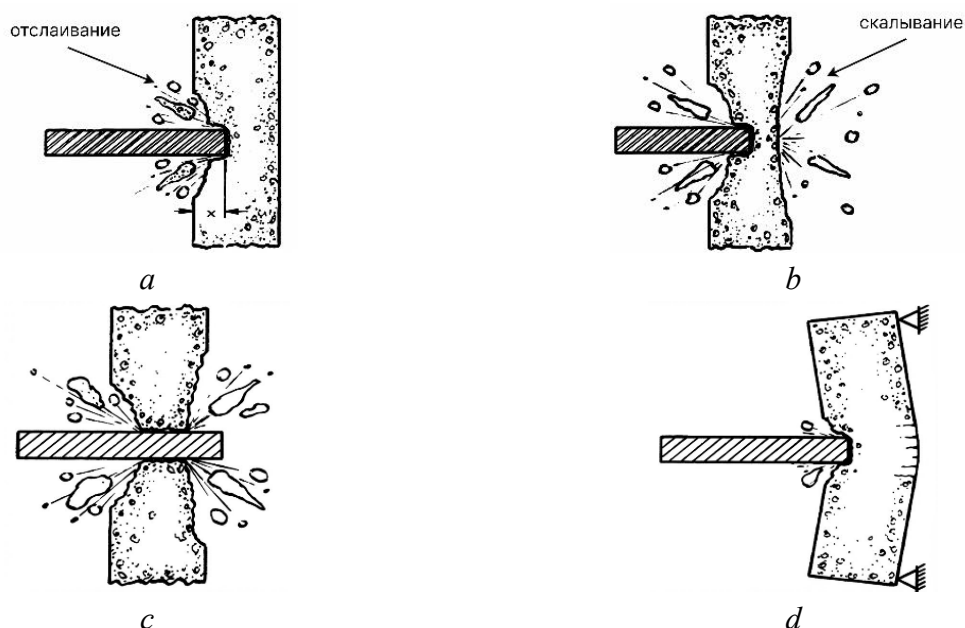
Большинство доступных в литературе исследований, посвященных ударным нагрузкам, рассматривают поведение железобетонных конструкций, подверженных воздействию баллистического оружия. В частности, после Второй мировой войны исследования в этой области значительно активизировались. Одновременно возросли и требования атомной энергетики к проектированию ударопрочных конструкций ядерных реакторов. Эти конструкции должны быть спроектированы с учетом ударных нагрузок, таких как нагрузки от аварий транспортных средств и оборудования, столкновений самолетов и ударов снарядов, поскольку отказы в результате таких инцидентов могут привести к катастрофам. В последние десятилетия исследования ударных нагрузок расширились и теперь включают проектирование ударопрочных конструкций защитных сооружений от обрушения для автомобильных и железных дорог, защитных барьеров, опор мостов, промышленных объектов от аварий, а также морских сооружений от столкновений со льдом и судами.

## МЕТОД

Удары снарядов по конструкциям обычно классифицируют на две категории: жесткие и мягкие удары. При жестких ударах снаряды существенно не деформируются по сравнению с поврежденной конструкцией. С другой стороны, при мягких ударах снаряды деформируются.

Конструкции, подверженные ударным нагрузкам, также можно сгруппировать по их реакции: конструкции, которые получают только локальные повреждения вокруг точки удара, конструкции, которые реагируют на удар глобальными деформациями элементов, и комбинация этих двух реакций. Локальные повреждения подразделяются на три уровня: 1) проникновение снаряда и отслоение осколков от пробитой поверхности; 2) значительное образование осколков как с передней, так и с тыльной стороны конструкции; 3) пробивание элемента (рис. 1).

Представленное исследование посвящено воздействиям, которые приводят к изменению поведения конструкции в результате глобальных деформаций элементов.



**Рис. 1.** Явления, возникающие при ударе снаряда:

*a* — проникновение и отслоение снаряда, растрескивание; *b* — образование осколков конструкции;  
*c* — пробивание; *d* — общая реакция на цель

**Fig. 1.** Missile impact phenomena:

*a* — Missile penetration and spalling; *b* — Target scabbing; *c* — Perforation; *d* — Overall target response

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Примером экспериментальных исследований ударного поведения железобетонных плит является работа [21]. Испытания проводились на трех типах плит размером  $90 \times 1524 \times 3353$  мм. Первый тип был армирован двумя сетками из сварной стальной проволоки  $150 \times 150$  мм диаметром 5 мм с защитным слоем 25 мм; второй — одной сеткой из стальных стержней диаметром 9,5 мм  $150 \times 150$  мм, расположенной посередине толщины плиты; и третий — двумя сетками из стальных стержней диаметром 9,5 мм  $150 \times 150$  мм, расположенными под защитным слоем 25 мм. Масса ударного элемента составляла приблизительно 2600 кг, и он сбрасывался с высоты 152, 305 и 610 мм. Испытательная установка фиксировала плиты двумя рядами болтов со всех сторон. Условия крепления считались как среднее между простым и жестким закреплением. Для регистрации импульсов нагрузки использовался датчик нагрузки на ударном молотке, а акселерометры были установлены на обратной поверхности плит в разных местах. Для измерения деформаций плит использовались два датчика прогиба, расположенные в середине (датчик 1) и в четверти (датчик 2) точек главных осей плиты (рис. 2).

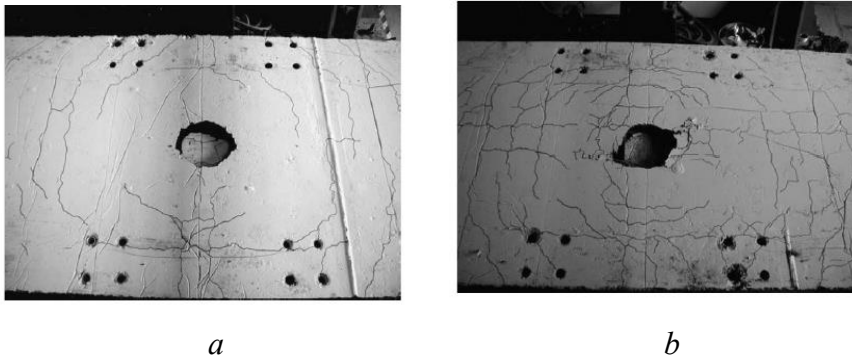


**Рис. 2.** Места датчиков и опорные условия [21]

**Fig. 2.** Sensor locations and support conditions [21]

Девять образцов, по три образца для каждого из трех типов, подвергались ударам с различной высоты: 152, 305 и 610 мм. В ходе испытаний регистрировались зависимости ударной нагрузки от времени, деформации плит в двух точках, ускорения плит, ускорения ударной массы и деформации арматуры.

Согласно анализу данных и профилям трещин в плитах, режимы разрушения плит зависят от армирования и высоты падения ударной нагрузки. При одинаковом армировании увеличение высоты падения ударной массы приводило к тенденции локальных повреждений. При высоких скоростях нагружения изгибное поведение практически не наблюдалось. Следовательно, при увеличении высоты падения локальная реакция преобладала в поведении плиты, и возникло поперечное пробивание. Таким образом, поперечные трещины были более заметны и шире при одинаковом количестве арматуры. Однако диаметры отверстий от пробивных ударов обратно пропорциональны высоте падения (рис. 3).



**Рис. 3.** Трещины вдоль верхних поверхностей [21]:

*a* — падение с высоты 305 мм на плиту с арматурной сеткой;

*b* — падение с высоты 610 мм на плиту с арматурной сеткой

**Fig. 3.** Crack patterns along the top surfaces [21]:

*a* — fall from a height of 305 mm onto a slab with reinforcing mesh;

*b* — fall from a height of 610 mm onto a slab with reinforcing mesh

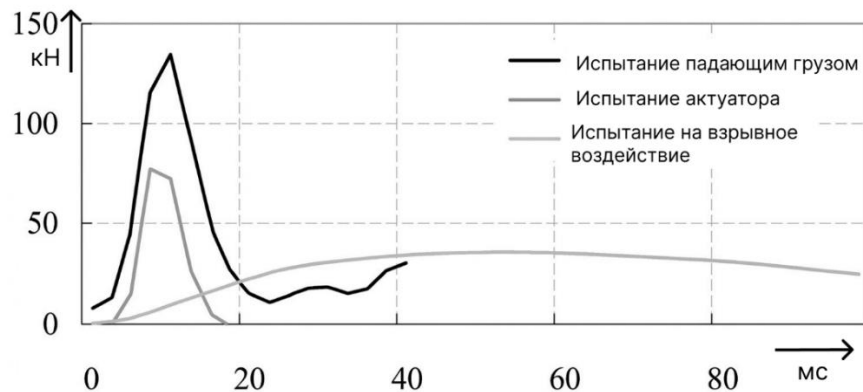
Отслоение бетона зависело от типа и количества арматуры. Больше бетона отслаивалось с тыльной поверхности плит с наименьшим количеством арматуры. В ходе испытаний максимальная нагрузка, измеренная на плитах, не отличалась между образцами, поскольку разрыв арматуры определял разрушение элемента.

Исследование четырех серий испытаний — малого, среднего, большого масштаба и испытаний на продавливание — является еще одним примером исследований ударного поведения железобетонных плит. В центре внимания такого исследования было поведение камнепадных галерей под ударными нагрузками. Испытания малого масштаба были проведены [22], тогда как остальные серии были выполнены [23].

В испытаниях малого масштаба испытывались три квадратные плиты размером  $900 \times 900$  мм. Толщина плит составляла 100 мм, за исключением третьей плиты, для которой она была уменьшена до 52 мм.

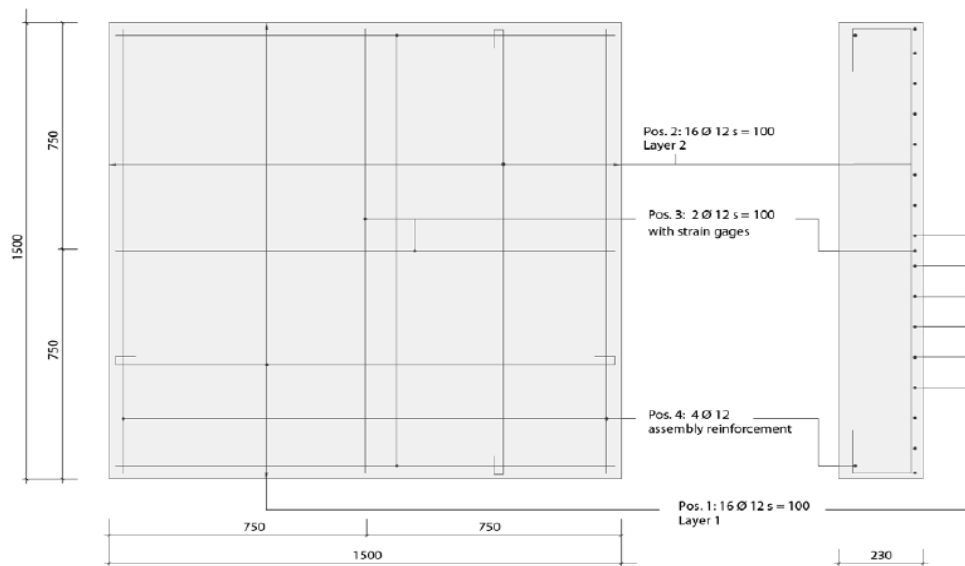
В первом испытании на образец с высоты 2 м был сброшен бетонный валун массой 825 кг и диаметром 800 мм. В четырех углах плиты были созданы условия простого опирания. Кроме того, плита была покрыта песчаной подушкой толщиной 190 мм для рассеивания энергии. Во втором испытании к образцу приложили сервоуправляемый привод с максимальной

грузоподъемностью 100 кН, смещение составило 20 мм. В третьем испытании ударная нагрузка создавалась гидравлическим ударом. В ходе испытаний измерялись реакции опоры, деформации, ускорения и смещения (рис. 4).



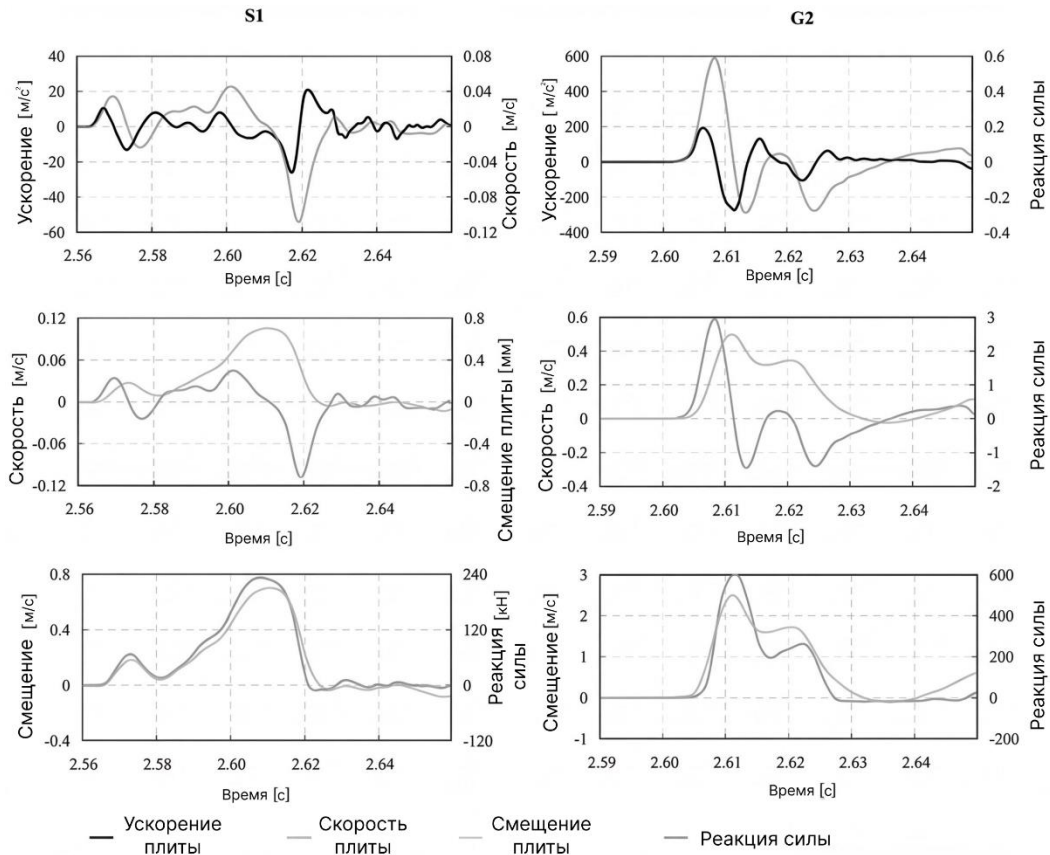
**Рис. 4.** Суммарные силы реакции (кН) в зависимости от времени (мс) на опорах для трех испытаний [22]  
**Fig. 4.** Total reaction forces (kN) vs. time (ms) at supports for three tests [22]

Испытания на падение груза проводились в среднем масштабе. Были испытаны три железобетонные плиты размером  $1500 \times 1500 \times 230$  мм с простым опиранием (рис. 5).



**Рис. 5.** Схема армирования плит (все размеры указаны в мм) [23]  
**Fig. 5.** Reinforcement layout of slabs (all dimensions in mm) [23]

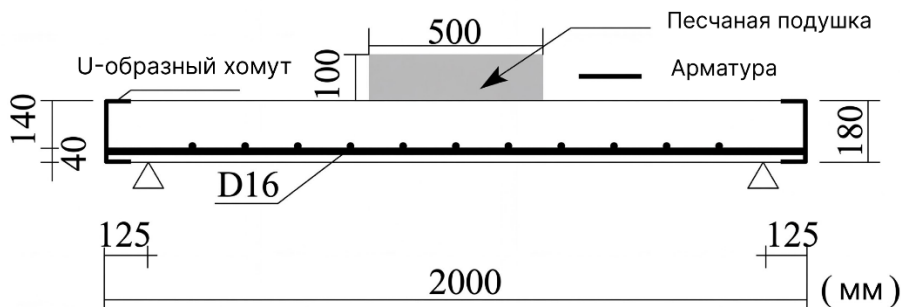
В этих испытаниях использовались три различных типа подушек. Падающий груз составлял 825 кг, он сбрасывался с высоты 2 м, аналогично испытаниям падения груза в малом масштабе. Для различных типов подушек, включая песок, пеностекло и гравий, были рассчитаны скорости удара, энергия удара, глубина проникновения, максимальные силы реакции и ускорения, а также рассеянная энергия. Прогибы в центре плиты определялись путем двукратного интегрирования ускорений (рис. 6).



**Рис. 6.** Прогобы в центре плиты для песчаной (S1) и гравийной (G1) подушки [23]  
**Fig. 6.** Deflection of slab center for with sand (S1) and gravel (G1) cushion [23]

Для крупногабаритных испытаний были доведены до разрушения шесть железобетонных плит, покрытых подушками. Использовались три типа плит. Плиты 1 и 2 толщиной 250 мм не имели поперечной арматуры. Плиты 3 и 4 также не имели поперечной арматуры, но их толщина была увеличена до 350 мм. Последние две плиты имели поперечную арматуру, и их толщина также составляла 350 мм. Размеры всех шести плит составляли 3500 × 4500 мм.

Материал подушки и падающий груз во время испытаний оставались неизменными. Груз массой 300 кг падал с фиксированной скоростью и при различных диаметрах нагрузки. Скорость удара варьировалась от 6 до 10 м/с. Диаметр падающего груза составлял 60 мм для первой плиты и 150 мм для остальных пяти. Плиты имели размеры 2000 × 2000 × 180 мм, и сверху была уложена песчаная подушка толщиной 100 мм (рис. 7).



**Рис. 7.** Поперечное сечение железобетонной плиты [23]  
**Fig. 7.** Cross-section of reinforced concrete slab [23]

Пробитие наблюдалось у всех плит. Меньшее количество трещин при изгибе и более низкое сопротивление пробитию были отмечены при использовании падающего груза меньшего диаметра. На рис. 8 показаны картины трещин плит, испытанных при диаметре зоны нагружения 60 мм (S6) и 150 мм (S15).

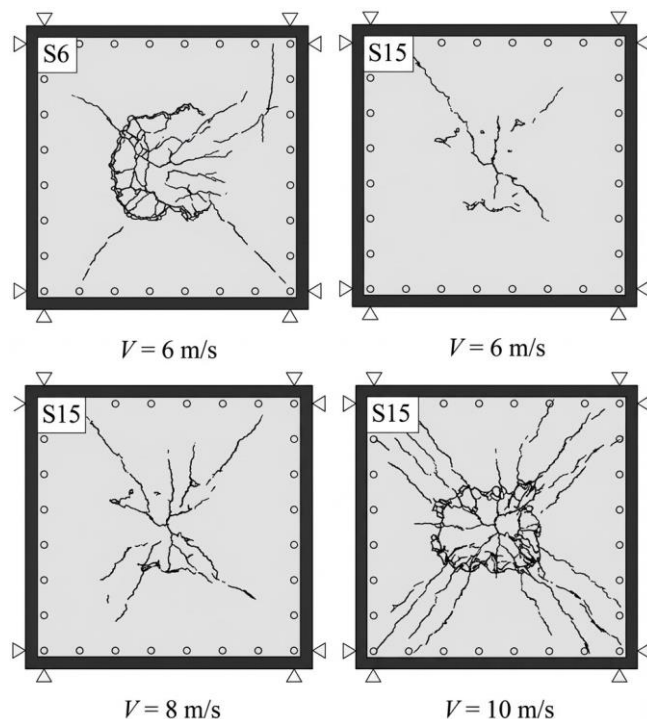
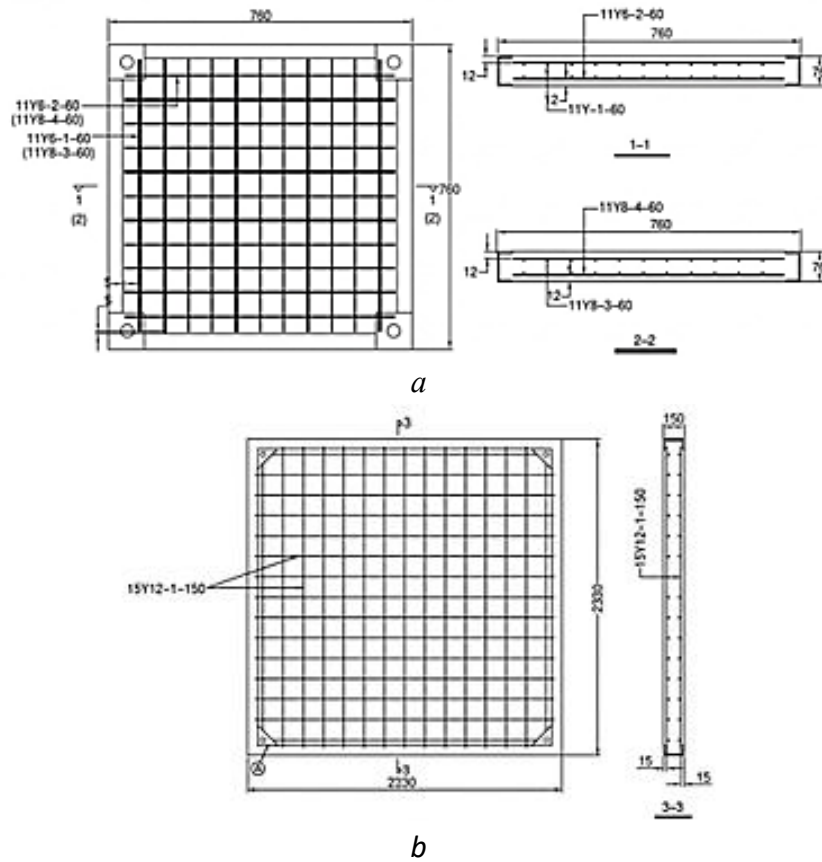


Рис. 8. Картины трещин после испытаний [24]

Fig. 8. Crack patterns after tests [24]

В работе [25] провели серию экспериментальных исследований железобетонных элементов, подвергнутых ударам падающих грузов. Целью исследования было проведение экспериментов и проверка метода численного моделирования. В исследовании использовали 18 балок и шесть плит. Были испытаны два типа плит: четыре размером  $760 \times 760 \times 76$  мм и две размером  $2300 \times 2300 \times 150$  мм (рис. 9). Плиты были пронумерованы от 1 до 4 для плит размером 0,76 м, и от 5 до 6 для плит размером 2,33 м. Все четыре плиты размером 0,76 м подвергались ударным нагрузкам с массой ударника 98,7 кг, тогда как для двух плит размером 2,33 м использовались массы 196,7 кг и 382 кг. Скорость удара составляла 6,5 м/с для плит 1–3. Плиты 4, 5 и 6 подвергались ударам со скоростью 8, 8,7 и 8,3 м/с соответственно. Коэффициент армирования плит составлял 0,6 % для плит 1, 2 и 3; 1,1 % для плиты 4; 0,5 % для плит 5 и 6. Прочность бетонных кубиков составляла 60 МПа для плит меньшего размера, тогда как для плит 5 и 6 она составляла 47,3 и 55,7 МПа, соответственно.

Опорные элементы были закреплены в горизонтальном и вертикальном направлениях в четырех углах. В испытаниях использовались два типа падающих грузов. Один из них был стальным диаметром 90 мм и имел наконечник с полусферическим профилем. Другой тип имел плоскую поверхность диаметром 100 мм.



**Рис. 9.** Характеристики плит [25]:

*a* — квадратные плиты размером 0,76 м; *b* — квадратные плиты размером 2,33 м

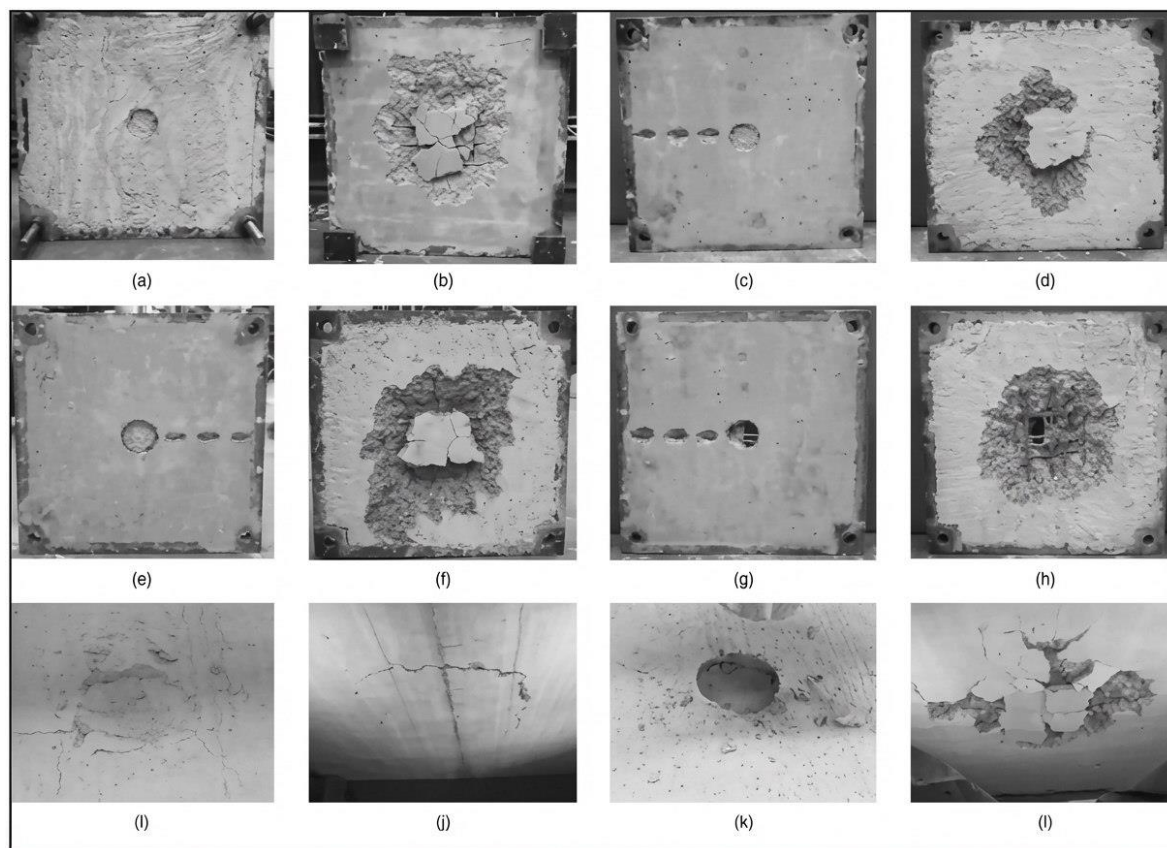
**Fig. 9.** Details of the slabs [25]:

*a* — square slabs measuring 0.76 m; *b* — square slabs measuring 2.33 m

В испытаниях все плиты подвергались воздействию падающего груза с полусферическим наконечником, за исключением одной квадратной плиты размером 0,76 м, которая была испытана с использованием падающего груза с плоской поверхностью. Использование различных типов падающих грузов показало, что полусферический наконечник ударника создает более круглую зону отслаивания на нижней поверхности плиты по сравнению с плоским наконечником. На рис. 10 показаны повреждения на обеих поверхностях шести плит.

Как уже упоминалось, данное исследование включало изучение поведения железобетонных элементов при низкоскоростном ударе для проверки численного моделирования. По этой причине эмпирические формулы, прогнозирующие диаметры отслоений и толщину плиты для предотвращения пробития, сравнивались с результатами испытаний. Также были представлены переходные ударные нагрузки на плиты и переходные деформации арматуры.

В работе [26] также провели несколько испытаний бетонных плит на удар. В своем исследовании изучалось поведение железобетонных плит с различными типами бетона, включая обыкновенный бетон, высокопрочный бетон (ВПБ) и сверхвысокопрочный бетон (СВПБ).



**Рис. 10.** Поверхности плиты после удара [25]:

*a* — верхняя грань плиты 1; *b* — нижняя грань плиты 1; *c* — верхняя грань плиты 2; *d* — нижняя грань плиты 2; *e* — верхняя грань плиты 3; *f* — нижняя грань плиты 3; *g* — верхняя грань плиты 4; *h* — нижняя грань плиты 4; *i* — верхняя грань плиты 5; *j* — нижняя грань плиты 5; *k* — верхняя грань плиты 6; *l* — нижняя грань плиты 6

**Fig. 10.** Slab faces after impact [25]:

*a* — upper edge of slab 1; *b* — lower edge of slab 1; *c* — upper edge of slab 2; *d* — lower edge of slab 2; *e* — upper edge of slab 3; *f* — lower edge of slab 3; *g* — upper edge of slab 4; *h* — lower edge of slab 4; *i* — upper edge of slab 5; *j* — lower edge of slab 5; *k* — upper edge of slab 6; *l* — lower edge of slab 6

Исследование включает испытания 15 железобетонных плит размерами  $1000 \times 1000 \times 150$  мм. Плиты были сгруппированы по типу бетона. Все плиты имели одинаковую схему армирования стальной сеткой, состоящей из стержней диаметром 10 мм с шагом 150 мм в обоих направлениях и пределом текучести 500 МПа. В дополнение к продольному армированию две плиты были армированы U-образными хомутами для повышения сопротивления поперечным силам. Шесть плит также были дополнительно армированы фибросеткой. В четырех углах плиты опирание простое, а усилия в опорах определялись с помощью тензодатчиков.

Для проведения испытаний на ударную нагрузку цилиндрический закаленный стальной предмет диаметром 10 см и высотой 20 см сбрасывали в центре плит. Как видно из таблицы, высота падения и скорость масс варьировались, в то время как масса сбрасываемого груза оставалась неизменной, за исключением первого испытания. Высота падения изменялась от 3 до 9 м, в результате чего скорость изменялась от 7,7 до 13,3 м/с.

Исходные данные экспериментальных исследований [26]

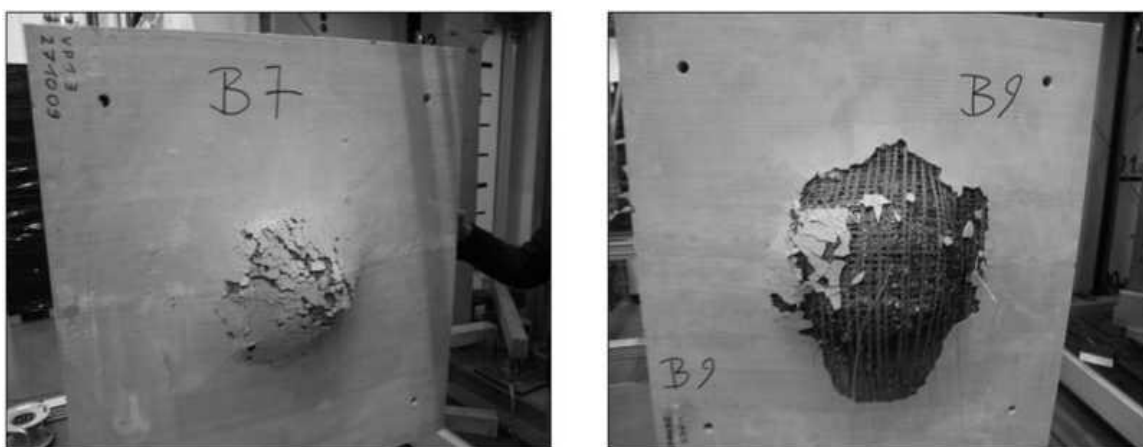
Initial data from experimental studies [26]

Наименование	Бетон	Кубическая прочность, Н/мм <sup>2</sup>	Сетки	Поперечные стержни	Материал	Масса падения, кг	Высота падения, м	Скорость, м/с
В1	C20/25	34,7	φ10 мм 150 мм	–	–	290	6,0	10,8
В2	C20/25	34,7	φ10 мм 150 мм	–	–	183	7,5	12,1
В3	C20/25	34,7	φ10 мм 150 мм	–	–	183	9,0	13,3
В4	C20/25	34,7	φ10 мм 150 мм	φ6 мм	–	183	7,5	12,1
В5	C20 / 25	34,7	φ10 мм 150 мм	φ6 мм	–	183	7,5	12,1
В6	C20/25	34,7	φ10 мм 150 мм	–	Сталь	183	7,5	12,1
В7	C20/25	34,7	φ10 мм 150мм	–	Сталь	183	7,5	12,1
В8	C20/25	34,7	φ10 мм 150 мм	–	Углеродная ткань	183	7,5	12,1
В9	C20/25	34,7	φ10 мм 150 мм	–	Углеродная ткань	183	7,5	12,1
С1	C70/S5	76,7	φ10 мм 150 мм	–	–	183	3,0	7,7
С2	C70/S5	76,7	φ10 мм 150 мм	–	–	183	5,5	10,4
С3	C70/85	76,7	φ10 мм 150 мм	–	Сталь	183	5,5	10,4
С4	C70/S5	76,7	φ10 мм 150 мм	–	Сталь	183	7,5	12,1
Д1	UHPC	185,2	φ10 мм 150 мм	–	–	183	5,5	10,4
Д2	UHPC	184,1	φ10 мм 150 мм	–	–	183	3,5	7,7

После испытаний все плиты с обычным бетоном и стандартной стальной арматурой, включая плиты с поперечной арматурой, получили повреждения (рис. 11). Плиты с дополнительной тканевой арматурой также были повреждены, но не полностью пробиты (рис. 12.).



**Рис. 11.** Плиты со стандартной стальной арматурой (B3, слева) и дополнительным хомутом (B4, справа) [26]  
**Fig. 11.** Slabs with standard steel reinforcement (B3, left) and additional stirrup reinforcement (B4, right) [26]

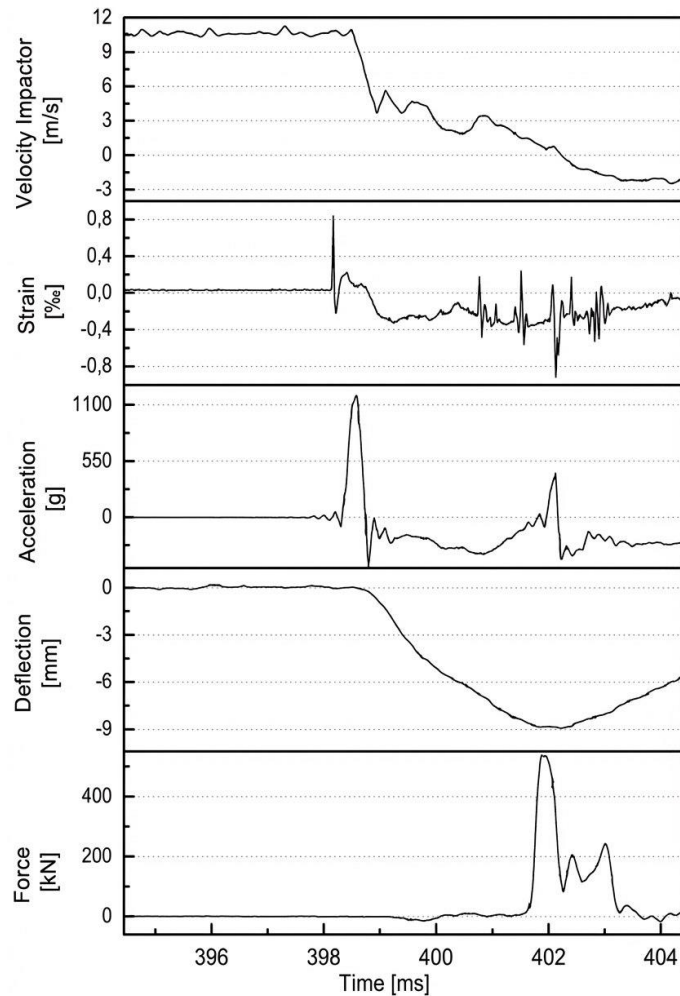


**Рис. 12.** Стандартная бетонная плита с дополнительной стальной тканью (B7, слева) и с углеродной тканью (B9, справа) [26]  
**Fig. 12.** Standard concrete slab with additional steel fabric (B7, left) and with carbon fabric (B9, right) [26]

Различия в поведении вышеупомянутых плит наблюдались также в группе высокопрочных бетонных плит с дополнительным армированием тканью и без него.

На рис. 13 представлены измерения и общая реакция плиты. Как ясно видно на графике зависимости прогиба от времени, изгиб начался как вторая часть структурной реакции. Опорные реакции также начали возрастать через 4 мс после первого контакта. В момент удара на верхней поверхности плиты наблюдалась деформация от растягивающих напряжений.

Исследование [24] включало сравнение численного моделирования с экспериментальными данными. Испытания были разработаны как удар падающего груза по железобетонным плитам с тремя различными типами опор: опоры вдоль четырех краев, опоры на противоположных краях, опоры только на одном крае и точечные опоры в двух углах. Сравнение численного анализа с экспериментальными данными проводилось по временным зависимостям динамического отклика, максимальным реакционным силам, максимальным прогибам в середине плит и основным картинам трещин.



**Рис. 13.** Измерения при испытании плиты [26]

**Fig. 13.** Measurements during slab testing [26]

Размеры использованных в испытаниях железобетонных плит составляли  $2000 \times 2000 \times 180$  мм, а арматура размещалась только в нижней части плит с шагом 150 мм в обоих направлениях и диаметром 16 мм. Схема расположения арматуры приведена на рис. 14.

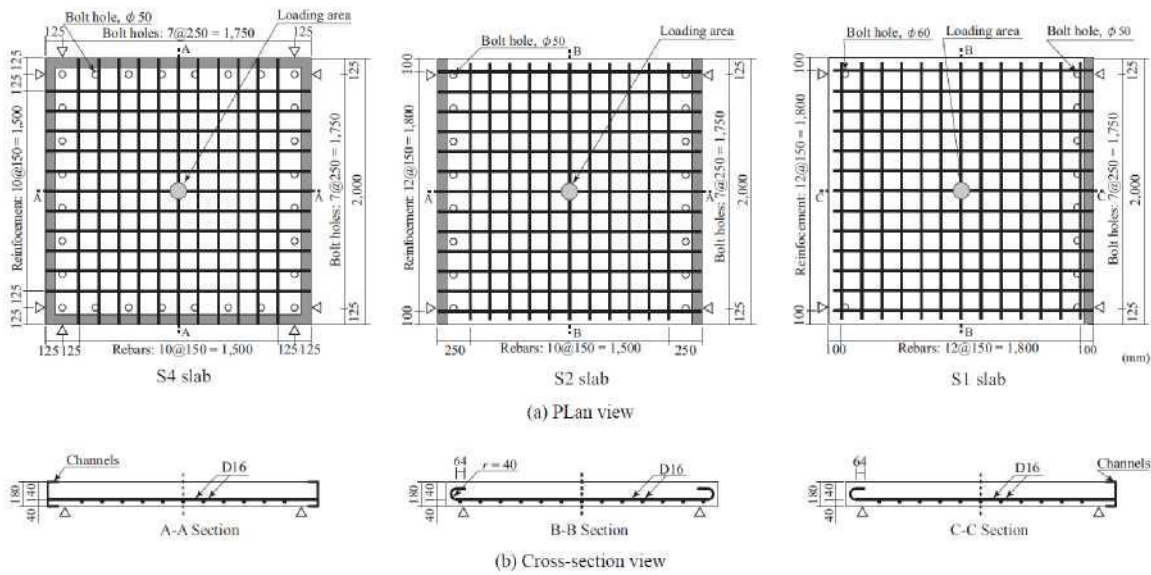
Датчики нагрузки были размещены на опорах для измерения реакционных сил, а плиты были закреплены в углах, чтобы предотвратить отрыв. Опоры могли свободно вращаться, но горизонтальное перемещение было ограничено.

В качестве испытательного груза был применен груз массой 300 кг, который сбрасывался свободно с фиксированной скоростью удара 4 м/с. Диаметр падающего груза составлял 90 мм, а его наконечник был сферическим с радиусом 507 мм и конусностью 2 мм.

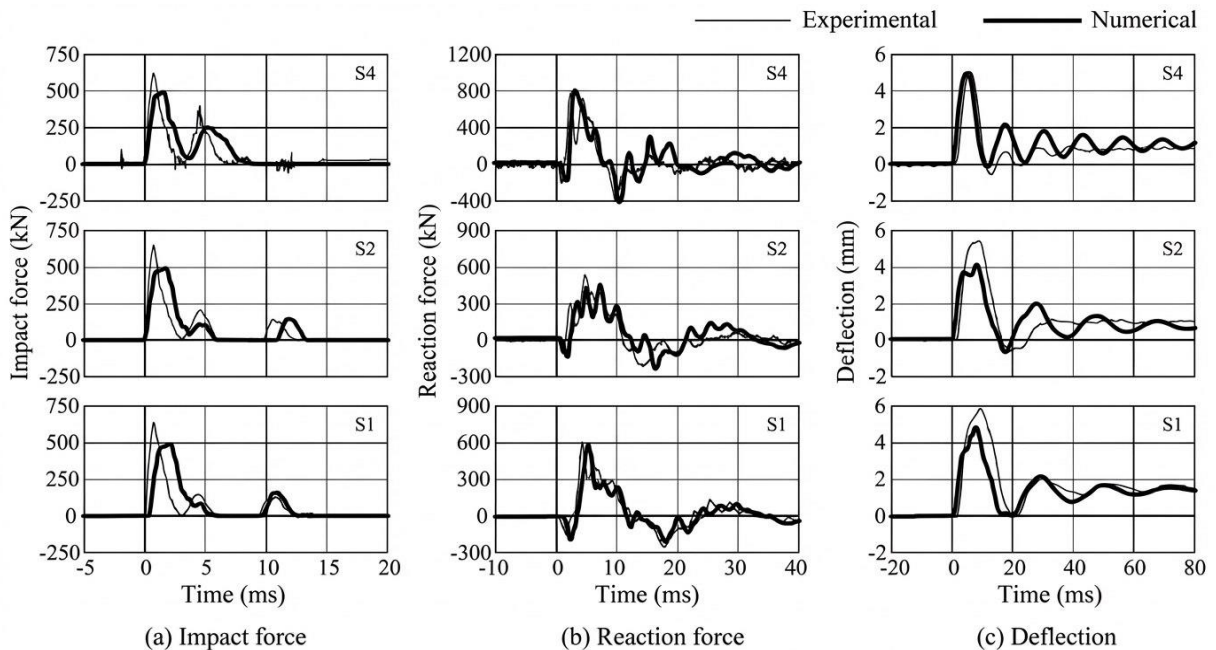
Предполагается, что деформации падающего груза, опор и датчиков нагрузки остаются в упругой области. Прочность бетона на сжатие составляла 26,6 МПа.

Согласно экспериментальным результатам, максимальные ударные силы не зависели от граничных условий, а кривые зависимости от времени, полученные в результате численного анализа, были близки к экспериментальным данным. Однако максимальные силы удара, полученные в результате численного анализа, были меньше экспериментальных. Для реакционных сил форма кривых зависимости от времени не отличалась, а кривые зависимости прогиба от

времени также имели схожую форму. Помимо кривых зависимости прогиба от времени, максимальный прогиб плит, по-видимому, не зависел от граничных условий (рис. 15).

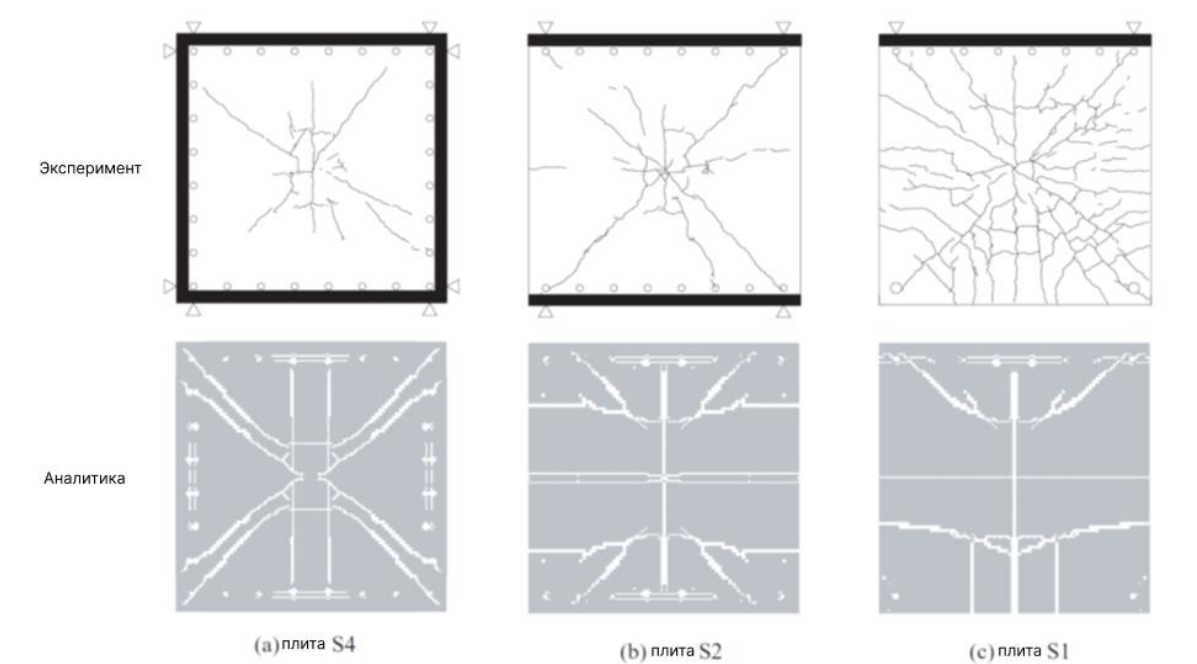


**Рис. 14.** Размеры, схема армирования и условия крепления плит [24]  
**Fig. 14.** Dimensions, reinforcement layout and support conditions for each slab [24]



**Рис. 15.** Зависимости силы удара, силы реакции и прогиба от времени [24]  
**Fig. 15.** Time histories of impact force, reaction force and deflection [24]

На рис. 16 отчетливо видно, что плита S1 растрескана больше остальных. Растрескивание было вызвано сочетанием продавливания, крутящего момента и одностороннего изгиба. Следовательно, можно сделать вывод, что из-за условий крепления наиболее гибкой была плита S1.



**Рис. 16.** Картина трещин в плитах S4, S2, S1 [24]

**Fig. 16.** Crack patterns in S4, S2, S1 slab [24]

Когда к массе прикладывается сила, зависящая от времени, то при игнорировании силы демпфирования ей противодействуют силы инерции, равные по величине произведению массы на ускорение и опорные реакции. С целью определения сил инерции для плит квадрант плит был оснащен 16 датчиками RLPT, которые использовались для вычисления ускорений по перемещениям. Для расчета сил инерции каждая плита была разделена на 64 четырехугольных элемента с четырьмя узлами. В этих элементах каждый угол соответствовал местоположению датчика RLPT. Ускорения для каждого углового узла рассчитывались по второй производной от перемещений, при этом предполагалось линейное изменение ускорений между углами. К данным о перемещениях и их производным применялись соответствующие фильтры. Силы инерции рассчитывались путем умножения ускорений на единицу массы и интегрирования по плите. Для численного интегрирования использовался метод Гаусса с  $2 \times 2$  точками интегрирования.

Как пояснялось выше, ожидается, что сила, создаваемая ударом, будет равна сумме инерционных сил и сил реакции опоры. Зависимости силы от времени в ходе ударных испытаний представлены на рис. 17 и 18.

Согласно зависимостям силы от времени, вычисленные инерционные силы начинают действовать до момента удара падающего груза на плиту. Эта ошибка была вызвана применением цифровых фильтров к полученным скоростям из перемещений, что создало несколько искусственных пиков в отфильтрованных сигналах на более ранних временных шагах. Однако на рис. 17 и 18 видно, что реакции на удар выравниваются после первых циклов воздействия сил.

При сравнении результатов статических и ударных испытаний для идентичных образцов четко видно, что измеренные пиковые реакции опоры в статических испытаниях составляли примерно половину пиковых реакций опоры, измеренных в ударных испытаниях. Для исследования этой разницы в несущей способности был смоделирован квадрант плиты в

SAP2000 с использованием метода конечных элементов. В этой линейно-упругой модели распределение моментов и поперечных сил рассчитывалось в момент удара, когда вся сила удара воспринималась только силами инерции, т.е. опорные реакции были равны нулю. Рассчитанные силы инерции в этот момент подавались в модель как статические силы для расчета распределения сил в случае удара, тогда как та же нагрузка прикладывалась статически в середине для расчета распределения сил в статическом случае.

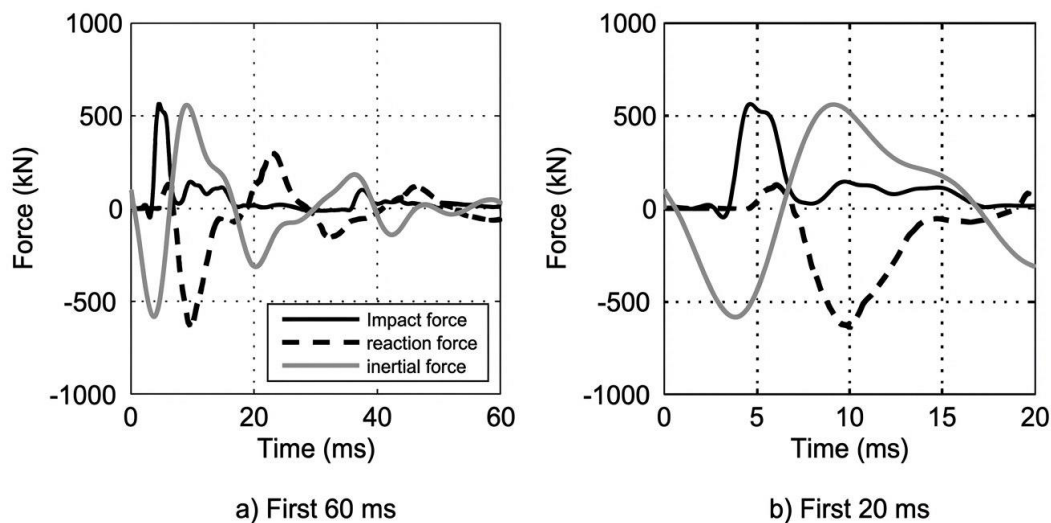


Рис. 17. Динамическое равновесие плит с шагом армирования 100 мм  
Fig. 17. Dynamic equilibrium slab with a 100 mm reinforcement spacing

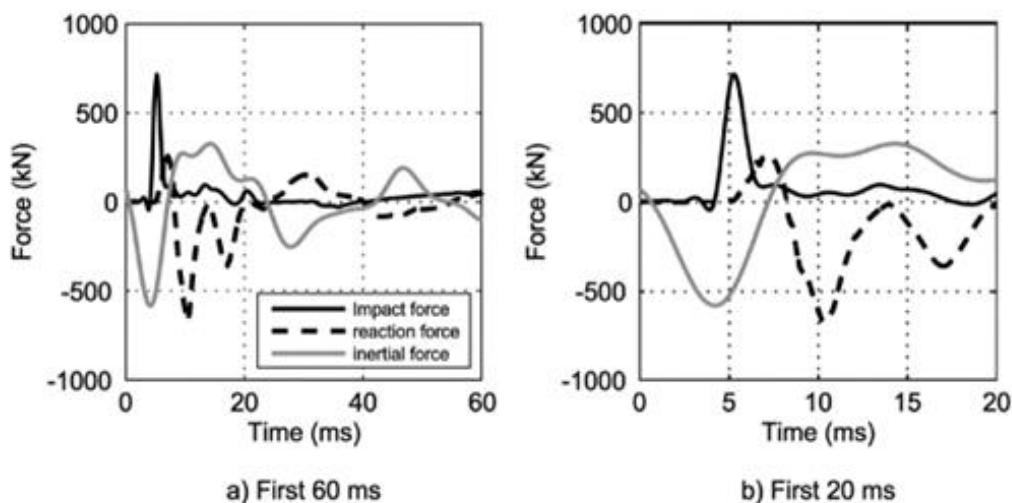
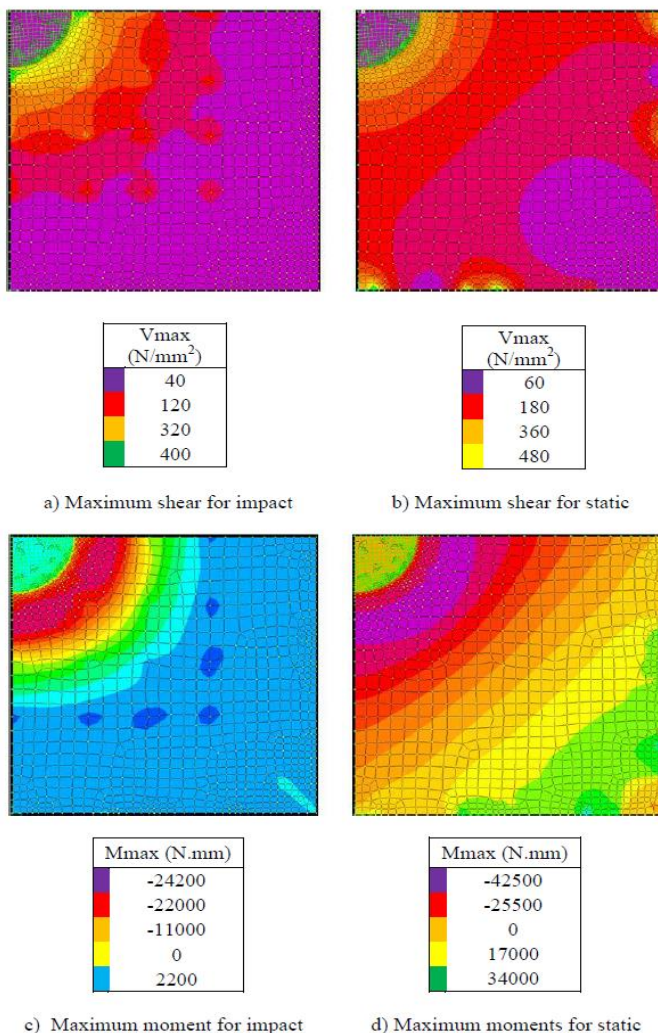


Рис. 18. Динамическое равновесие плит с шагом армирования 200 мм  
Fig. 18. Dynamic equilibrium slab with a 200 mm reinforcement spacing

Результаты анализа показывают, что одинаковая суммарная нагрузка для условий удара и статического нагружения создает приблизительно одинаковые максимальные поперечные силы вокруг точки удара (рис. 19, *a, b*), но максимальные моменты, создаваемые силами удара, составляют приблизительно половину моментов, создаваемых в условиях статической нагрузки (рис. 19, *c, d*).



**Рис. 19.** Распределение максимального момента и поперечных сил для ударных (*a, c*) и статических (*b, d*) случаев

**Fig. 19.** Maximum moment and shear distributions for impact (*a, c*) and static (*b, d*) cases

Это может объяснить более высокую несущую способность, наблюдаемую в случае удара, поскольку сочетание поперечных сил и моментов приводит к разрушению при более низких уровнях нагрузки в статическом случае. Иными словами, плиты могут выдерживать более высокие поперечные нагрузки из-за меньших моментов при ударе. Для дальнейшего изучения этого явления необходимо провести подробные численные исследования.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе изучалось поведение железобетонных плит при ударе. Результаты испытаний и анализ данных сводятся к следующему:

1. В условиях статической нагрузки все образцы демонстрировали изгибную деформацию с образованием радиальных трещин, распространяющихся от точки приложения нагрузки к краям, что соответствует теории линии текучести, но разрушались при поперечном продавливании, образуя видимый конус продавливания.

2. Увеличение коэффициента продольного армирования влияет на пластичность и статическую несущую способность. Образец с наибольшим коэффициентом армирования выдержал наибольшую нагрузку, но при этом разрушился хрупким образом.

3. Ударные испытания выявили важность инерционных сил. Согласно данным о зависимости силы от времени, полученным в ходе анализа этих испытаний, на начальных этапах ударные нагрузки компенсируются инерционными силами плит. Силы, возникающие в опорах, становятся более выраженными после удара, и на этом этапе наблюдается равновесие. Кроме того, все измеренные силы реакции были приблизительно одинаковыми, тогда как ударные силы, равные по величине произведению массы на ускорение, различались.

4. При сравнении сил, возникающих в опорах при ударной и статической нагрузках, измеренные силы реакции при ударной нагрузке выше, чем при статической нагрузке, независимо от того, произошло разрушение или нет. Кроме того, направление сил, измеренных в опорах, противоположно друг другу при статической и ударной нагрузках.

5. Профили перемещений соответствуют направлению сил при статической нагрузке, но при ударных нагрузках распределение сил на образце изменяется из-за возникновения очень высоких ускорений, которые, вызывая высокие инерционные силы, не позволяют частям образца следовать за другими частями. Это запаздывание реакции явно видно при сравнении профилей перемещений при статических и ударных нагрузках для одинаковых прогибов в средней точке. Вследствие этого различия в поведении перемещений измеренные реакции опор также имеют противоположное направление. В статических условиях для опор посередине и вдоль краев измеряют сжимающие нагрузки, а для опор в углах — растягивающие; в случае ударных нагрузок ситуация обратная.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов Ю.М. Бетон при динамическом нагружении. М. : Стройиздат, 1970. 292 с.
2. Белов Н.Н., Кабанцев О.В., Коняев А.А., Копаница Д.Г., Толкачев В.Ф., Югов А.А., Югов Н.Т. Расчет прочности железобетона на ударные нагрузки // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47. № 6 (280). С. 165–173.
3. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С., Забегаев А.В. Расчет конструкции на динамические специальные нагрузки. М. : Высшая школа, 1992. 319 с.
4. Кабанцев О.В., Тонких Г.П., Листов В.Л. Обзор исследований устойчивости железобетонных конструкций защитных сооружений гражданской обороны // Технологии гражданской безопасности. 2025. Т. 22. № 3 (85). С. 51–60.
5. Belov N.N., Yugov N.T., Tonkikh G.P., Plyaskin A.S., Babarykina A.I. Numerical Study of the High-Speed Impact of a Steel Projectile on a Concrete Target // Russian Physics Journal. 2024. Т. 67. № 3. С. 267–272.
6. Пляскин А.С., Бабарыкина А.И., Тонких Г.П. Математическое моделирование высокоскоростного взаимодействия стального ударника и преграды // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 6 (774). С. 5–12.
7. Тамразян А.Г. Горизонтальное динамическое воздействие по нижней части колонны с учетом совместной работы с элементом сооружения // Железобетонные конструкции. 2025. Т. 10. № 2. С. 3–16.
8. Тамразян А.Г., Аветисян Л.А. Прочность и несущая способность сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении в условиях повышенных температур // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 7. С. 56–60.
9. Тамразян А.Г. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении в условиях огневых воздействий // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 29–35.
10. Тамразян А.Г. Огнеударостойкость несущих железобетонных конструкций высотных зданий // Жилищное строительство. 2005. № 1. С. 7.

11. *Robins B.* New Principles of Gunnery. 1742. P. 25.
12. *Corbett A. et al.* Genetic analysis of macromolecular transport across the nuclear envelope // *Exp Cell Res.* 1996. Vol. 229 (2). Pp. 212–216.
13. *Danziger A.N., Yankelevsky D.Z.* The Response of High-Strength Concrete to a Strong Projectile Impact // *International Journal of Impact Engineering.* 1996. Vol. 18. Issue 6. Pp. 583–599.
14. *Wu K., Fang Q., Chen X.W., Gong Z.M., Liu J.Z.* Projectile Penetration of Ultra-High-Performance Cement-Based Composites at 510–1320 m/s // *Journal of Construction and Building Materials.* 2015. Vol. 74. Pp. 188–200.
15. *Sun K.Y., Yu Z., Wang Z., Liu X.* A New Protective Coating for Enhanced Projectile Impact Resistance of Concrete // *Journal of Dynamic Behavior of Materials.* 2015. Vol. 96. Pp. 484–490.
16. *Pavlovich A., Fragassa K., Disich A.* Comparative numerical and experimental study of the impact of a projectile on reinforced concrete // *Composites Journal. Part B.* 2017. Vol. 108. Pp. 122–130.
17. *Christoffersen M., Toreskas O.L., Sumita Dey, Børvik T.* Ballistic Perforation Resistance of Thin Concrete Slabs Impacted by Pointed-Nose Steel Projectiles // *International Journal of Impact Engineering.* 2021. Vol. 156.
18. *Zhang M.H., Shim W.P.W., Lu G., Chu C.W.* Impact Performance of High-Strength Concrete // *International Journal of Impact Engineering.* 2005. Vol. 31 (7). Pp. 825–841.
19. *Кумляк О.Г., Галяутдинов З.Р., Галяутдинов Д.Р.* Влияние распора на прочность железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // *Известия высших учебных заведений. Строительство.* 2023. № 1 (769). С. 5–16.
20. *Галяутдинов З.Р.* Исследование железобетонных балок на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении // *Железобетонные конструкции.* 2023. No. 1 (1). Pp. 28–36.
21. *Zineddin M., Krauthammer T.* Dynamic Response and Behaviour of Reinforced Concrete Slabs under Impact Loading // *International Journal of Impact Engineering.* 2007. Vol. 34. Pp. 1517–1534.
22. *Buzzini D., Dazio A., Trüb M.* Quasi-Static Cyclic Tests on Three Hybrid Fibre Concrete Structural Walls : IBK Report No. 297. Zurich, Switzerland : Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2006.
23. *Schellenberg K.* On the Design of Rockfall Protection Galleries. Zurich, Switzerland : Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2009.
24. *Kishi N., Kurihashi Y., Ghadimi Khasraghy S., Mikami H.* Numerical Simulation of Impact Response Behavior of Rectangular Reinforced Concrete Slabs under Falling-Weight Impact Loading // *Applied Mechanics and Materials.* 2011. Vol. 82. Pp. 266–271.
25. *Chen Y., May I. M.* Reinforced Concrete Members under Drop-Weight Impacts // *Proceedings of Institution of Civil Engineers, Structure and Buildings.* 2009. Vol. 162. Pp. 45, 56.
26. *Hummeltenberg A., Beckmann B., Weber T., Curbach M.* Investigation of Concrete Slabs under Impact Load // *Applied Mechanics and Materials.* 2011. Vol. 82. Pp. 398–403.

## REFERENCES

1. *Bazhenov Yu.M.* *Concrete under dynamic loading.* Moscow, Stroyizdat, 1970; 292. (In Russian).
2. *Belov N.N., Kabantsev O.V., Konyaev A.A., Kopanitsa D.G., Tolkachev V.F., Yugov A.A., Yugov N.T.* Calculation of Reinforced Concrete Strength under Impact Loads. *Applied Mechanics and Technical Physics.* 2006; 47:6(280):165-173. (In Russian).
3. *Popov N.N., Rastorguev B S., Zabegaev A.V.* *Calculation of Structures for Special Dynamic Loads.* Moscow, Higher School, 1992; 319. (In Russian).
4. *Kabantsev O.V., Tonkikh G.P., Listov V.L.* Review of studies of the stability of reinforced concrete structures of civil defense protective structures. *Civil Safety Technologies.* 2025; 22:3(85):51-60. (In Russian).
5. *Belov N.N., Yugov N.T., Tonkikh G.P., Plyaskin A.S., Babarykina A.I.* Numerical Study of the High-Speed Impact of a Steel Projectile on a Concrete Target. *Russian Physics Journal.* 2024; 67(3):267-272.
6. *Plyaskin A.S., Babarykina A.I., Tonkikh G.P.* Mathematical Modeling of High-Speed Interaction between a Steel Impactor and an Obstacle. *News of Higher Educational Institutions. Construction.* 2023; 6(774):5-12. (In Russian).
7. *Tamrazyan A.G.* Horizontal Dynamic Impact on the Bottom of a Column Taking into Account Joint Action with a Structural Element. *Reinforced Concrete Structures.* 2025; 10(2):3-16. (In Russian).

8. Tamrazyan A.G., Avetisyan L.A. Strength and Bearing Capacity of Compressed Reinforced Concrete Elements under Dynamic Loading at Elevated Temperatures. *Industrial and Civil Engineering*. 2016; 7:56-60. (In Russian).
9. Tamrazyan A.G. Calculation of Eccentrically Compressed Reinforced Concrete Elements under Dynamic Loading under Fire Exposures. *Industrial and Civil Engineering*. 2015; 3:29-35. (In Russian).
10. Tamrazyan A.G. Fire Impact Resistance of Load-Bearing Reinforced Concrete Structures of High-Rise Buildings. *Housing Construction*. 2005; 1:7. (In Russian).
11. Robins B. *New Principles of Gunnery*. 1742; 25.
12. Corbett A. et al. Genetic analysis of macromolecular transport across the nuclear envelope. *Exp Cell Res*. 1996; 229(2):212-216.
13. Danziger A.N., Yankelevsky D.Z. The Response of High-Strength Concrete to a Strong Projectile Impact. *International Journal of Impact Engineering*. 1996; 18(6):583-599.
14. Wu K., Fang Q., Chen X.W., Gong Z.M., Liu J.Z. Projectile Penetration of Ultra-High-Performance Cement-Based Composites at 510–1320 m/s. *Journal of Construction and Building Materials*. 2015; 74:188-200.
15. Sun K.Y., Yu Z., Wang Z., Liu X. A New Protective Coating for Enhanced Projectile Impact Resistance of Concrete. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*. 2015; 96:484-490.
16. Pavlovich A., Fragassa K., Disich A. Comparative numerical and experimental study of the impact of a projectile on reinforced concrete. *Composites Journal, Part B*. 2017; 108:122-130.
17. Christoffersen M., Toreskas O.L., Sumita Dey, Børvik T. Ballistic Perforation Resistance of Thin Concrete Slabs Impacted by Pointed-Nose Steel Projectiles. *International Journal of Impact Engineering*. 2021; 156.
18. Zhang M.H., Shim W.P.W., Lu G., Chu C.W. Impact Performance of High-Strength Concrete. *International Journal of Impact Engineering*. 2005; 31(7):825-841.
19. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. Effect of thrust on the strength of reinforced concrete beams on yielding supports under short-term dynamic loading. *News of higher educational institutions. Construction*. 2023; 1(769):5-16. (In Russian).
20. Galyautdinov Z.R. Study of reinforced concrete beams on yielding supports under short-term dynamic loading. *Reinforced concrete structures*. 2023; 1(1):28-36. (In Russian).
21. Zineddin M., Krauthammer T. Dynamic Response and Behaviour of Reinforced Concrete Slabs under Impact Loading. *International Journal of Impact Engineering*. 2007; 34:1517-1534.
22. Buzzini D., Dazio A., Trüb M. *Quasi-Static Cyclic Tests on Three Hybrid Fibre Concrete Structural Walls : IBK Report No. 297*. Zurich, Switzerland, Institute of Structural Engineering, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2006.
23. Schellenberg K. *On the Design of Rockfall Protection Galleries*. Institute of Structural Engineering. Zurich, Switzerland, Swiss Federal Institute of Technology Zurich, 2009.
24. Kishi N., Kurihashi Y., Ghadimi Khasraghy S., Mikami H. Numerical Simulation of Impact Response Behavior of Rectangular Reinforced Concrete Slabs under Falling-Weight Impact Loading. *Applied Mechanics and Materials*. 2011; 82:266-271.
25. Chen Y., May I.M. Reinforced Concrete Members under Drop-Weight Impacts. *Proceedings of Institution of Civil Engineers, Structure and Buildings*. 2009; 162:45-56.
26. Hummeltenberg A., Beckmann B., Weber T., Curbach M. Investigation of Concrete Slabs under Impact Load. *Applied Mechanics and Materials*. 2011; 82:398-403.