

УДК 69.058.8

ОПЫТ СОЗДАНИЯ СТЕНДОВ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОТВЕТСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

Однокопылов Георгий Иванович¹,
OGLz@yandex.ru

Саркисов Дмитрий Юрьевич²,
Milandd@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² Томский государственный архитектурно-строительный университет,
Россия, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Актуальность работы обусловлена возросшей вероятностью воздействия на строительные конструкции ответственных зданий и сооружений объектов нефтегазового комплекса кратковременных ударных и взрывных динамических нагрузок вследствие террористических актов и других чрезвычайных ситуаций. Примером таких воздействий может служить недавний террористический акт на газопроводах «Северный поток». В связи с большим количеством параметров, влияющих на физический процесс деформирования конструкций при таком виде воздействия, в настоящее время неотъемлемой частью научных изысканий в этой области являются экспериментальные исследования. Особенно актуальны такие исследования для железобетонных конструкций, которые, с одной стороны, очень широко применяются в строительстве, а с другой, обладают сложным нелинейным характером деформирования. Для проведения экспериментальных исследований необходимо проектировать и реализовывать специализированные стенды, при помощи которых можно создать кратковременное динамическое воздействие на конструкцию. Выполненный обзор литературных данных показал, что наиболее часто для проведения таких исследований создаются испытательные стенды на базе копровых установок. В таких установках для разрушения конструкций используется энергия падающего груза. Из вышесказанного следует, что проектирование и совершенствование стендов для исследований железобетонных конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок является актуальной задачей, имеющей практическую значимость.

Цель: описание конструкций испытательных стендов, созданных на базе копровой установки в лаборатории кафедры железобетонных и каменных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета, выявление их основных преимуществ и указание недостатков; формулировка дальнейших путей развития в области проектирования и реализации таких установок.

Методы: теоретический анализ литературы и интернет-источников, моделирование, экспериментальные исследования.

Результаты. Спроектированы и реализованы различные модификации испытательных стендов на базе копровой установки для исследований железобетонных конструкций. Показаны основные преимущества и недостатки таких установок, сформулированы дальнейшие пути их развития.

Ключевые слова:

Испытательный стенд, копровая установка, форма сигнала нагрузки, кратковременное динамическое нагружение, железобетон, экспериментальные исследования.

Актуальность исследования

Известно, что важной народно-хозяйственной задачей является обеспечение промышленной безопасности опасных производственных объектов (ОПО). Аварии и чрезвычайные ситуации на таких объектах могут приводить к значительным материальным потерям, а также возможной гибели людей. Кроме того, при авариях на крупных промышленных объектах возникают репутационные потери для государства, а также косвенные потери, связанные, например, с необеспечением населения и объектов экономики необходимыми ресурсами или разрушением логистических цепочек при производстве сложных товаров.

Статус опасных производственных объектов, а также их описание закреплены в Федеральном законе № 116 ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.1997 г. (рис. 1). В приложении 1 ФЗ № 116 приведен перечень объектов, отнесенных к ОПО. К ним относятся, например, объекты, на которых получают, используются, обра-

зуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются в указанных количествах опасные вещества следующих видов: воспламеняющиеся, окисляющие, горючие, взрывчатые, токсичные и высокотоксичные вещества, а также вещества, представляющие опасность для окружающей среды. Таким образом, отдельные здания и сооружения нефтегазового комплекса являются ОПО, например, стационарные платформы цеха газонефтеперерабатывающих заводов и др.

В настоящее время возросла опасность осуществления на таких объектах террористических актов, которые приводят к воздействию на строительные конструкции кратковременных динамических нагрузок в виде ударов или взрывов. Примером такого террористического акта может служить подрыв газопроводов «Северный поток». Характерными особенностями такого вида нагрузок являются: резкое нарастание, относительно короткий период действия, высокая интенсивность, а в самих конструкциях наблюдается волновой характер распространения напряжений.

Некоторые факторы, обуславливающие сложность кратковременных динамических нагрузок [1–4], приведены ниже:

- различная форма приложения (распределенное или сосредоточенное) – это может быть давление фронта волны при взрыве, распределенное по всей площади конструкции с ее общим деформированием, или точечное попадание снаряда с прониканием, образованием воронки, пробитием;
- различное направление воздействия – нормальное приложение нагрузки на конструкцию (падение груза) или под произвольным углом (попадание снаряда);
- зависимость от формы и характеристик воздействующего элемента (формы ударника, его способности деформироваться и поглощать энергию);
- широкой диапазон возможных скоростей воздействия нагрузки, например, при дефлаграционном горении газо-пылевоздушных смесей скорость

распространения фронта пламени составляет обычно несколько метров или несколько десятков метров в секунду, а при детонационном горении скорость распространения фронта в газовых смесях может достигать 1000–3500 м/с, а в твердых и жидких веществах до 9000 м/с; скорость аварийного падения груза может составлять несколько метров в секунду, а скорость падения самолета достигает 250–300 м/с; начальная скорость удара авиабомбы достигает 250 м/с, а снаряда 1000 м/с;

- различный характер действия во времени, например, различают кратковременный импульс и мгновенный импульс. При действии на конструкцию кратковременного импульса необходимо учитывать величину импульса, его форму и продолжительность действия, а при действии мгновенного импульса учитывают только его величину;
- разные формы импульса: прямоугольная, треугольная, параболическая.



Рис. 1. Перечень относящихся к ОПО объектов

Fig. 1. List of objects related to the dangerous industrial objects

Поведение строительных конструкций при действии кратковременных динамических нагрузок во многом зависит от материала их изготовления, при этом наиболее часто встречающимися материалами являются сталь и железобетон. Работа материалов конструкций при кратковременных динамических нагрузках отличается от работы тех же материалов при статических воздействиях. Наиболее сильно это проявляется для бетона, как для материала, обладающего значительной физической нелинейностью. В дальнейшем речь в работе пойдет в основном о железобетонных конструкциях.

Сложность теоретического описания работы железобетона при действии кратковременной динамической нагрузки, особенно на стадии разрушения, обусловлена в том числе следующими факторами [5–28]:

- влиянием скорости нагружения на свойства материала, при возрастании скорости повышается предел прочности и уменьшаются деформации;
- запаздыванием пластических деформаций при динамическом нагружении;

- влиянием качества цементного камня, его плотности, свойств заполнителей (крупность, объем содержания), прочности сцепления в контактной зоне между цементным камнем и заполнителем, водоцементного отношения и т. д.;
- влиянием неоднородности структуры и наличия микродефектов, которые в большей степени снижают динамическую прочность чем статическую;
- влиянием водонасыщения, например, в водонасыщенном состоянии динамическая прочность бетона возрастает;
- различным временем задержки разрушения, в течение которого бетон будет выдерживать перегрузку.

Сложность процессов и недостаточно изученное напряженно-деформированное состояние материала приводит к необходимости проведения экспериментальных исследований для дальнейшего уточнения данных теоретических положений, верификации расчетных моделей, набора данных для статистической обработки, исключения или уточнения эмпирических коэффициентов и т. д.

Из вышесказанного следует, что испытания (экспериментальные исследования) в настоящее время должны являться неотъемлемой частью выполнения научных и практических работ в области сопротивления железобетонных конструкций кратковременным динамическим нагрузкам.

В то же время исследователи имеют ограничения в плане наличия необходимого оборудования и методов его использования (возможность установки и применения, недопущения повреждений вследствие высокой стоимости, воспроизводимости полученных данных и др.).

Исходя из этого возникают сложности, связанные с разноплановостью применяемых для испытаний стендов и измерительного оборудования.

Целью работы является описание конструкций испытательных стендов, созданных на базе копровой установки в лаборатории кафедры железобетонных и каменных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета, выявление их основных преимуществ и указание недостатков, формулировка дальнейших путей развития в области проектирования и реализации таких установок.

Краткий обзор экспериментальных стендов

Обзор литературных данных показывает, что при экспериментальных исследованиях строительных конструкций и материалов на действие кратковременных динамических нагрузок в основном используется несколько типов испытательных стендов. Можно выделить пневматические установки, огнестрельные или взрывные, а также ударные.

В пневматических установках воздействие на образец осуществляется за счет энергии сжатого, сжиженного или отвержденного воздуха или газа. Данная энергия приводит в движение некий снаряд (ударник), который воздействует на мишень (экспериментальный образец). Для исследования свойств материалов широко используется стержневая система Кольского также известная, как Split-Hopkinson Pressure Bar [29–31]. Схема одной из таких установок [32] приведена на рис. 2. Существуют различные модификации таких установок, но предназначены они в основном для изучения свойств материалов, а не конструкций, размеры экспериментальных образцов достаточно малы. Также предполагается, что деформации в образце распространяются равномерно.

Также к пневматическим установкам можно отнести различного рода газовые пушки, из которых выстреливают снарядом по железобетонным образцам или конструкциям [33–36]. Скорость снаряда при соприкосновении с образцом может достигать 100, 200, 400 м/с и выше. Примером такой установки может служить газовая пушка в Пекинском технологическом университете [37] (рис. 3).

Относительно большие размеры таких пневматических испытательных стендов снижают возможности их модификации, перемещения, наклона, и они в основном предназначены не для исследования каких-то конкретных конструкций, а больше для условных мишеней из заданного материала. Также дополнительную сложность и повышенную опасность при испытаниях обуславливают работа с сжатым воздухом или газом и высокие скорости полета снарядов.

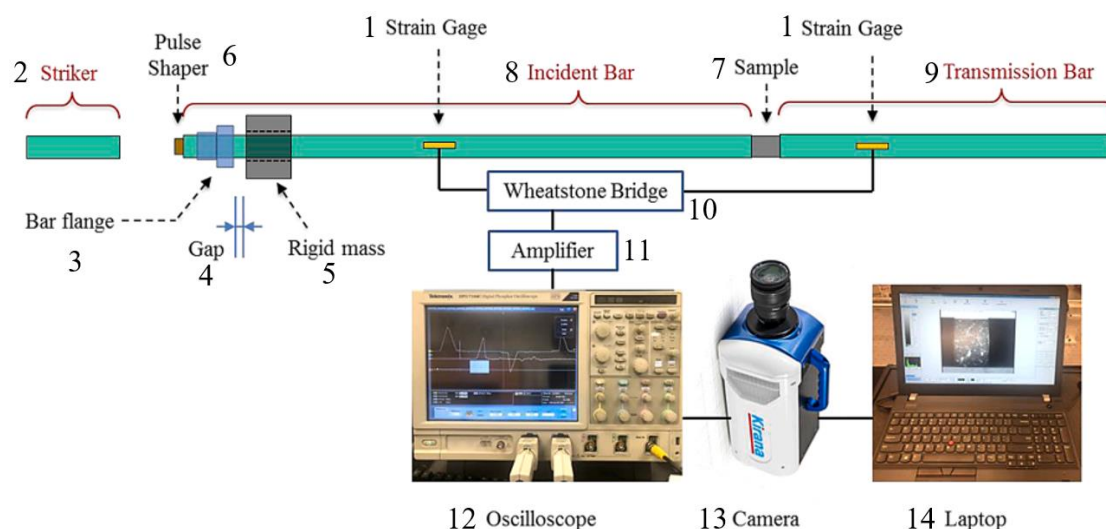


Рис. 2. Схема модифицированной установки компрессионного стержня Кольского: 1 – тензометрический датчик; 2 – ударник; 3 – фланец; 4 – зазор; 5 – жесткая масса; 6 – формирователь импульсов; 7 – образец; 8 – падающий стержень; 9 – передающий стержень; 10 – мост Уитстоуна; 11 – усилитель; 12 – осциллограф; 13 – камера; 14 – ноутбук

Fig. 2. Scheme of a modified installation of the Kolskiy compression rod: 1 – strain gage; 2 – striker; 3 – bar flange; 4 – gap; 5 – rigid mass; 6 – puls shaper; 7 – sample; 8 – incident bar; 9 – transmission bar; 10 – Wheatstone Bridge; 11 – amplifier; 12 – oscilloscope; 13 – camera; 14 – laptop

К следующему типу испытательных установок можно отнести огнестрельные и взрывные. В огнестрельных и взрывных установках воздействие на

экспериментальные образцы осуществляется в основном за счет воспламенения (высокого нагрева) пороховых газов или других взрывчатых веществ.

В огнестрельных стендах на опытный образец воздействуют различной формы снаряды, выпускаемые из разных баллистических пушек [38]. Такие исследования проведены, например, в работах [39, 40],

где испытывались простые бетонные образцы цилиндрической формы диаметром 0,8 м и длиной 0,5 м (рис. 4). Скорости полета снарядов при таких испытаниях составляли от 500 до 1700 м/с.

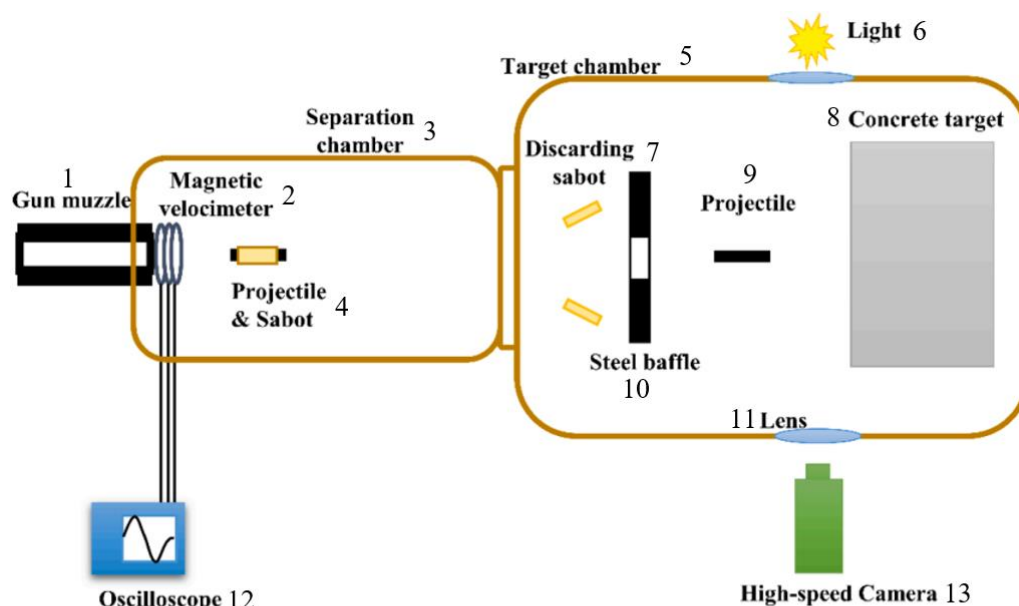


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – дуло; 2 – магнитный велосиметр; 3 – разделительная камера; 4 – снаряд и оболочка; 5 – камера цели; 6 – источник света; 7 – отбрасывание оболочки; 8 – бетонная цель; 9 – снаряд; 10 – стальная заслонка; 11 – линза; 12 – осциллограф; 13 – высокоскоростная камера

Fig. 3. Scheme of the experimental installation: 1 – gun muzzle; 2 – magnetic velocimeter; 3 – separation chamber; 4 – projectile and sabot; 5 – target chamber; 6 – light; 7 – discarding sabot; 8 – concrete target; 9 – projectile; 10 – steel baffle; 11 – lens; 12 – oscilloscope; 13 – high speed camera



Рис. 4. Испытания при помощи огнестрельных орудий

Fig. 4. Tests with firearms

Взрывные испытания проводятся в основном по схеме детонации заряда взрывчатого вещества, расположенного на некотором расстоянии от экспериментальной конструкции [41–44]. При таких испытаниях экспериментальный образец закрепляют на специальных опорах, исключающих его передвижение в этих местах. Заряд подвешивают в необходимом положении на заданном расстоянии

от образца. Расставляют необходимое оборудование и после этого производят детонацию заряда. Примером таких исследований может служить работа [45] (рис. 5), где испытывалась броневая стальная пластина размерами 1,5×1,5 м на действие взрыва. Мощность заряда составляла 2 кг в тротиловом эквиваленте, размещенном на высоте 300 мм непосредственно над центром пластины.



Рис. 5. Испытания стальной пластины на действие воздушного взрыва: 1 – заряд 2 кг тротила; 2 – верхняя крепежная пластина; 3 – бронева стальная пластина (экспериментальный образец); 4 – зажимная рама

Fig. 5. Testing of a steel plate for the effect of air explosion: 1 – 2 kg TNT; 2 – top fixing plate; 3 – armor steel plate; 4 – clamp frame

Такие испытания только условно можно назвать стендовыми, так как чаще они выполняются на специальных полигонах. Ограничения накладывают воздействия окружающей среды, невозможность использовать стационарное оборудование, а также высокие риски для безопасности людей при проведении такого рода испытаний.

Третий основной тип установок – стенды, сконструированные на базе копра. В них воздействие на экспериментальный образец осуществляется за счет энергии перемещения груза. Такие экспериментальные стенды создают в основном в лабораторных условиях, они бывают трех основных видов: ротационные, маятниковые и самые распространенные с падающим грузом.

Пример ротационного копра приведен на рис. 6 [46], его действие основано на ударе по экспериментальному образцу специального ножа (бойка), закрепленного на массивном диске. Линейная скорость ножа здесь может составлять до 125 м/с.

Примером маятникового копра может служить установка, описанная в работах [47, 48], где исследовался динамический ответ на воздействие железобетонных подпорных стен. В таких стендах подвешенный груз отклоняется от вертикального положения в сторону и затем отпускается. Стремясь вернуться в положение равновесия груз наносит удар по экспери-

ментальному образцу. Масса и форма груза при этом могут быть различные (рис. 7).

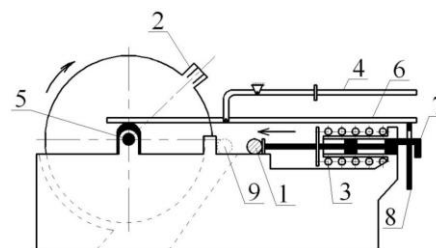


Рис. 6. Ротационный копер Г.И. Погодина-Алексеева: 1 – экспериментальный образец; 2 – нож; 3 – пружина; 4 – рукоятка; 5 – кулак; 6 – левый конец рычага; 7 – стержень; 8 – фиксирующая защелка

Fig. 6. Rotary copper of G.I. Pogodin-Alekseev: 1 – experimental sample; 2 – knife; 3 – spring; 4 – handle; 5 – fist; 6 – left end of lever; 7 – rod; 8 – locking latch

Копер с падающим грузом приведен, например, в работе [49] и на рис. 8. Здесь воздействие на конструкцию осуществляется при помощи энергии падающего груза, который свободно падает на экспериментальный образец вдоль направляющих. Также подобные стенды можно встретить в работах [50–53].



Рис. 7. Маятниковый копер и варианты ударяющего груза

Fig. 7. Pendulum copper and variants of the striking load

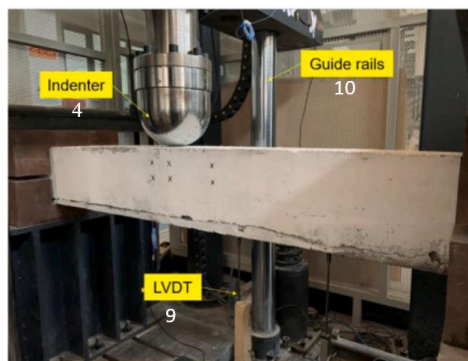
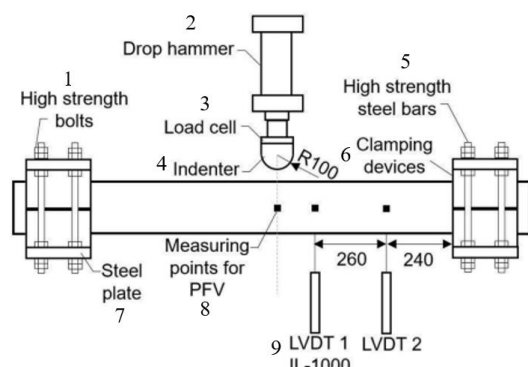


Рис. 8. Копровая установка: 1 – высокопрочные болты; 2 – ударный молот; 3 – датчик силы; 4 – твердый наконечник; 5 – высокопрочная шпилька; 6 – зажимное устройство; 7 – стальная пластина; 8 – место фиксации высокоскоростной видеокамеры; 9 – датчики перемещений; 10 – направляющий рельс

Fig. 8. Drop-weight stand: 1 – high strength bolts; 2 – drop hammer; 3 – load cell; 4 – indenter; 5 – high strength steel bars; 6 – clamping devices; 7 – steel plate; 8 – measuring points for PFV; 9 – LVDT; 10 – guide rails

Анализ конструктивных решений экспериментальных установок, применяющихся в мировой практике для изучения действия кратковременных динамических нагрузок, показал, что наибольшей простотой создания, а также вариативностью исследования различных конструкций обладают копровые установки с падающим грузом.

Собственный опыт применения экспериментальных стенов

Сотрудники кафедры железобетонных и каменных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета (ТГАСУ) имеют многолетний опыт разработки различных модификаций стенов для испытания железобетонных конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок, которые реализуются на базе копровой установки.

Жестким основанием для установки служит силовой пол с ручьями для крепления направляющих штанг и опор элементов. Базой всех стенов является копровая установка, которая включает две направляющих трубы, поперечную траверсу с закрепленной лебедкой и груз. Груз состоит из двух крайних пластин со сферическими вырезами для перемещения вдоль направляющих и набора пластин для регулировки массы груза. Все пластины имеют отверстия для пропуска стяжных болтов. В качестве узла закрепления и отпуска груза используется устройство по типу авиационного бомбосбрасывателя.

Опоры для экспериментальных образцов модифицируются в зависимости от типа испытания и крепятся к силовому полу. Они в общем виде представляют собой металлические жесткие элементы и содержат устройства для измерения опорных реакций.

На опоры устанавливается экспериментальный образец, а сверху через распределительные элементы устанавливается силоизмеритель.

В качестве стандартного набора датчиков используются тензорезисторы, акселерометры и прогибомеры (в различных конфигурациях). Все датчики подключаются к регистрирующей системе. Для одновре-

менного запуска всех приборов и отпуска груза спроектирован узел синхронизации.

Все модификации стенов также содержат системы страховки для обеспечения безопасности людей и сохранности датчиков.

Несколько модификаций стенов приведены на рис. 9. На все стенов и вспомогательные устройства получены патенты РФ на изобретения или полезные модели [54–63].

Опыт проектирования и использования стенов на базе копровой установки позволил выделить следующие преимущества и недостатки таких решений.

К преимуществам таких установок можно отнести:

- простое конструктивное решение (две направляющих, падающий груз, система его подъема и отпуска, силовое основание, опоры для опирания образцов);
- высокая вариативность создания различных видов напряженно-деформированного состояния в образцах (центральное и внецентренное сжатие, центральное и внецентренное растяжение, изгиб, косой изгиб, кручение);
- возможность испытания широкого класса конструкций (балки с разрушением по нормальным и наклонным сечениям, колонны, узлы сопряжения колонн и ригелей и др.);
- широкий диапазон создаваемых нагрузок за счет различной высоты подъема груза и его массы;
- возможность распределения нагрузки по образцу через дополнительные элементы;
- простой способ увеличения массы груза путем добавления дополнительных пластин или блоков;
- малая площадь, занимаемая такой установкой, в лаборатории;
- простые устройства опор (чаще не требуется ограничение горизонтальных смещений, а вся нагрузка уходит в стационарный силовой пол или фундамент);
- отсутствие потребления электрической энергии (в случае механических узлов подъема груза и замыкания системы подвески груза);

- хороший обзор экспериментального образца и процесса его работы под нагрузкой (нет острой необходимости в наличии защитных кожухов);
- широкие возможности по установке необходимого оборудования и датчиков;
- относительная безопасность при испытаниях (отсутствие взрыва, воспламенения, значительной скорости и диапазона разлета осколков и т. д.);
- возможность создать относительно простую систему страховки;
- отсутствие отходов (кроме экспериментального образца);
- относительно малая себестоимость стенов и малая стоимость проведения эксперимента (нет необходимости восполнять ресурсы – заряды взрывчатого вещества, снаряды, газ, сжатый воздух и др.).

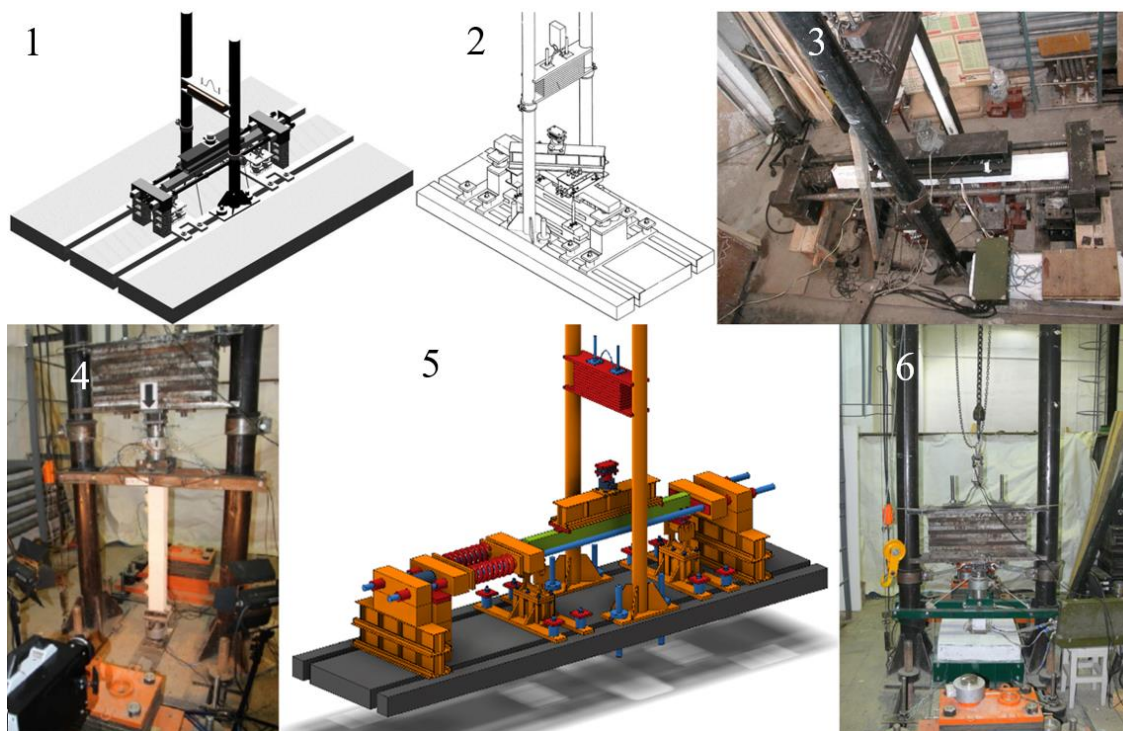


Рис. 9. Экспериментальные стенов на базе копровой установки: 1 – косоое внецентренное кратковременное динамическое растяжение; 2 – кратковременное динамическое кручение с изгибом; 3 – косоое внецентренное кратковременное динамическое сжатие; 4 – кратковременное динамическое сжатие колонн; 5 – продольное статическое обжатие с кратковременным динамическим поперечным воздействием; 6 – испытания на продавливание при действии кратковременной динамической нагрузки

Fig. 9. Experimental installations based on a drop-weight stand: 1 – oblique off-center short-term dynamic stretching; 2 – short-term dynamic torsion with bending; 3 – oblique off-center short-term dynamic compression; 4 – short-term dynamic compression of columns; 5 – longitudinal static compression with short-term dynamic transverse action; 6 – punching tests under the action of short-term dynamic load

В качестве недостатков можно отметить следующее:

- невозможность создать условия с высокими скоростями нагружения;
- возможность создания в основном только вертикальной динамической нагрузки;
- ограничения по габаритам экспериментальных образцов (расстояния между направляющими копра, параметры силового пола);
- сложности с созданием равномерно-распределенных нагрузок.

Одной из проблем, требующих более глубокого изучения, при применении таких стенов является зависимость формы сигнала нагрузки от различных параметров. Проявляется это при испытаниях конструкций в том, что наблюдается несколько характерных форм сигнала (рис. 10):

- однократный непродолжительный всплеск сигнала нагрузки;
- несколько непродолжительных всплесков сигнала нагрузки (отскоки груза);
- сигнал с одним пиком и длительным плавным затуханием;
- сигнал с основным пиком и плато.

При этом временные показатели в полученных графиках варьируются в достаточно широких диапазонах. Например, для проводимых в лаборатории кафедры железобетонных и каменных конструкций испытаний время прохождения первого всплеска в среднем варьировалось от 10 до 15 мс, время прохождения плато составляло 20...40 мс. Общее время прохождения сигнала нагрузки в среднем составляло от 30 до 60 мс. Некоторые другие показатели по параметрам графиков нагрузки приведены в работах [64, 65]. Указанные цифры и диапазоны получены при ис-

пытаниях различных конструкций с разными видами напряженно-деформированного состояния (сжатие, изгиб, продавливание).

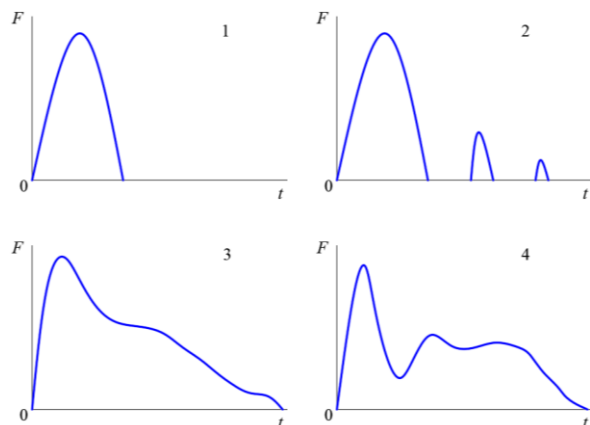


Рис. 10. Характерные формы сигнала при испытаниях железобетонных конструкций на копровой установке: 1 – однократный непродолжительный всплеск сигнала нагрузки; 2 – несколько непродолжительных всплесков сигнала нагрузки; 3 – сигнал с одним пиком и длительным плавным затуханием; 4 – сигнал с основным пиком и плато

Fig. 10. Characteristic waveforms when testing reinforced concrete structures on a drop-weight stand: 1 – a single short burst of the load signal; 2 – several short bursts of the load signal; 3 – a signal with a single peak and a long smooth attenuation; 4 – a signal with a main peak and a plateau

В целом можно отметить, что при высокой жесткости и несущей способности экспериментального образца график сигнала нагрузки меньше растянут по времени, возможно появление повторных всплесков (теоретические отскоки и повторные падения грузов). В случае же имеющейся податливости (меньшей жесткости) график сигнала более растянут по времени и на графике может наблюдаться плато.

Таким образом, характер формы сигнала зависит от динамических жесткостных параметров системы: испытательный стенд – экспериментальный образец. Здесь в качестве некоторых влияющих параметров можно выделить:

- соотношения весов и жесткостей падающего груза и экспериментального образца;
- соотношение высоты образца и высоты падения груза;
- форма ударника падающего груза;

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Вопросы расчета и конструирования специальных сооружений. – М.: Стройиздат, 1980. – 190 с.
2. Попов Н.Н., Расторгуев Б.С. Расчет железобетонных конструкций на действие кратковременных динамических нагрузок. – М.: Стройиздат, 1964. – 151 с.
3. Плевков В.С. Динамическая прочность бетона и арматуры железобетонных конструкций. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 1996. – 64 с.

- наличие различного рода прокладок между грузом и образцом.

Для получения информации о влиянии данных параметров на форму сигнала необходимо проведение специальных калибровочных экспериментальных исследований, в которых они будут варьироваться в необходимых диапазонах.

Целью таких исследований должно стать получение данных для модернизации и создания стендов с достоверно прогнозируемой и моделируемой формой сигнала нагрузки при проведении испытаний.

В таких стендах силовое воздействие может быть сформировано на основе применения электромеханических устройств. При этом образование необходимой формы сигнала нагрузки в процессе испытания предлагается производить путем применения системы управления электроприводом с заданными алгоритмами. Формирование сигнала нагрузки должно происходить в реальном времени с корректировкой давления механической части установки на экспериментальный образец через прописанные алгоритмы управления.

Только такая реализация испытательного стенда позволит проводить экспериментальные исследования с достоверным воспроизведением на строительные конструкции реальных динамических нагрузок, что в последующем позволит правильно их учитывать при проектировании и избежать гибели людей при возникновении чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса класса ОПО.

Выводы

1. Проанализированы особенности кратковременных динамических нагрузок и строительных материалов для объектов нефтегазового комплекса, показана необходимость проведения экспериментальных исследований, выполнен обзор испытательных стендов, применяемых в мировой практике.
2. Приведено описание стендов, созданных на базе копровой установки в лаборатории кафедры железобетонных и каменных конструкций ТГАСУ, выявлены их основные преимущества и указаны недостатки. Сформулированы дальнейшие пути развития в области проектирования и реализации таких стендов.
3. Предложено создание стендов на основе электромеханических устройств с формированием сигнала нагрузки через алгоритмы управления электроприводом.

Работа выполнена при поддержке госзадания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0004.

4. Кумпяк О.Г., Галютдинов З.Р., Кокорин Д.Н. Прочность и деформативность железобетонных конструкций на податливых опорах при кратковременном динамическом нагружении: монография. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2016. – 272 с.
5. Calculation of reinforced-concrete frame strength under a simultaneous static cross section load and a column lateral impact / N. Belov, D. Kopanitsa, A. Yugov, S. Kaparulin, A. Plyaskin, A. Kalichkina, A. Ustinov, N. Yugov, G. Kopanitsa // AIP Conference Proc. Advanced Materials in Technology and Construction. – Tomsk, 2016. – P. 47–53.

6. Galyautdinov Z.R. Deformation of reinforced concrete slabs on yielding supports under short-time dynamic loading // AIP Conference Proc. Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects. – Tomsk, 2017. – P. 40–44.
7. Trekin N.N., Krylov V.V. On the issue of punching shear capacity of reinforced concrete slabs under dynamic loading at ground space infrastructure facilities // Scientific Aspect. – 2018. – V. 7. – № 4. – P. 771–778.
8. Strength and deformability of reinforced concrete elements under oblique eccentric short-term dynamic compression, tension and bending / D. Sarkisov, N. Gorlenko, Y. Sarkisov, T. Shepelenko, G. Gorynin, G. Izmailov // E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering, TPACEE 2019. – 2020. – P. 14008.
9. Short and long term cracking behavior of GFRP reinforced concrete beams / C. Mias, L. Torres, M. Guadagnini, A. Turon // Composites Part B: Engineering. – 2015. – V. 77. – P. 223–231.
10. Lou T., Lopes S.M.R., Lopes A.V. FE analysis of short- and long-term behavior of simply supported slender prestressed concrete columns under eccentric end axial loads causing uniaxial bending // Engineering Structures. – 2015. – V. 85. – P. 52–62.
11. Correlation analysis of accelerated aging and natural aging of GFRP in reinforced concrete beams / J. Dong, X. He, H. Zhang, J. Zhang, Y. Yang, Y. Song, J. Rao // Journal of Wuhan University of technology (Transportation Science and Engineering). – 2017. – V. 41. – № 2. – P. 312–317.
12. Method of measurement of the dynamic strength of concrete under explosive loading / A.S. Savinykh, G.V. Garkushin, S.V. Razorenov, G.I. Kanel // International Journal of Fracture. – 2018. – V. 209. – P. 109–115.
13. Comment on the calculation models for reinforced concrete under intense dynamic loading / F. Gao, M. Wang, X. Zhang, Y. He, M.A. Li // Baozha Yu Chongji. – 2017. – V. 37. – № 2. – P. 365–376.
14. Demyanov A., Kolchunov V.I. The dynamic loading in longitudinal and transverse reinforcement at instant emergence of the spatial crack in reinforced concrete element under the action of a torsion with bending // Journal of Applied Engineering Science. – 2017. – V. 15. – № 3. – P. 381–386.
15. Mesoscopic simulation of the dynamic tensile behaviour of concrete based on a rate-dependent cohesive model / W. Zhou, L. Tang, G. Ma, X. Liu, M. Chen // International Journal of Impact Engineering. – 2016. – V. 95. – P. 165–175.
16. Li H.-Y., Teng J., Li Z.-H. An efficient platform HSNAS (GPU) for nonlinear static and dynamic analysis of reinforced concrete frames-II. Program verification and analysis // Zhendong yu Chongji. – 2016. – V. 35. – № 14. – P. 54–60.
17. Dynamic flexural strength of concrete under high strain rates / X. Chen, C. Chen, L. Xu, Y. Shao // Magazine of Concrete Research. – 2017. – V. 69. – № 3. – P. 109–119.
18. Гениев Г.А. О влиянии продолжительности действия нагрузки на прочность материала // Бетон и железобетон. – 1996. – № 4. – С. 19–22.
19. Кумпяк О.Г., Галаяутдинов З.Р. Расчет железобетонных плит на кратковременные динамические нагрузки с учетом реальных свойств материалов // Бетон и железобетон. – 2007. – № 6. – С. 15–18.
20. Yekai Yang, Chengqing Wu, Zhongxian Liu. Rate dependent behaviour of 3D printed ultra-high performance fibre-reinforced concrete under dynamic splitting tensile // Composite Structures. – 2023. – V. 309. – 116727.
21. Xiaoli Wei, Xiaodan Ren. Coupled viscosity-damage model for concrete under high strain rate // Engineering Fracture Mechanics. – 2023. – V. 277. – 108985.
22. High-strain rate compressive behavior of concrete with two different substituted recycled plastic aggregates: Experimental characterization and probabilistic modeling / B. Xiong, D. Falliano, L. Restuccia, F. di Trapani, C. Demartino, G.C. Marano // Construction and Building Materials. – 2023. – V. 368. – 130279.
23. Dynamic increase factors of concrete-like materials at very high strain rates / Z.H. Wang, H.M. Wen, H. Zheng, J.S. Cheng // Construction and Building Materials. – 2022. – V. 345. – 128270.
24. Hassan M., Wille K. Direct tensile behavior of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete at high strain rates using modified split Hopkinson tension bar // Composites Part B: Engineering. – 2022. – V. 246. – 110259.
25. Lai D., Demartino C., Xiao Y. High-strain rate tension behavior of Fiber-Reinforced Rubberized Concrete // Cement and Concrete Composites. – 2022. – V. 131. – 104554.
26. High-strain rate compressive behavior of concrete made with substituted coarse aggregates: recycled crushed concrete and clay bricks / B. Xiong, C. Demartino, J. Xu, A. Simi, G.C. Marano, Y. Xiao // Construction and Building Materials. – 2021. – V. 301. – 123875.
27. Lai D., Demartino C., Xiao Y. High-strain rate compressive behavior of fiber-reinforced rubberized concrete // Construction and Building Materials. – 2022. – V. 319. – 125739.
28. Rezaei M., Issa M.A. Specimen and aggregate size effect on the dynamic fracture parameters of concrete under high loading rates // Engineering Fracture Mechanics. – 2022. – V. 260. – 108184.
29. Albertini C., Cardoni E., Labibes K. Study of the mechanical properties of plain concrete under dynamic loading // Exp. Mech. – 1999. – № 39. – P. 137–141.
30. Experimental and mesoscopic study of dynamic tensile properties of concrete using direct-tension technique / L. Chen, C. Yue, Y. Zhou, J. Zhang, X. Jiang, Q. Fang // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – P. 155. – 103895.
31. Gerard G., Patrice B. Behavior of quasi-brittle material at high strain rate. Experiment and modeling // Eur. J. Mech. A. – 1998. – № 17-3. – P. 403–420.
32. Comparative study of strength-based damage evolution in ultra-high-performance concrete (UHPC) and conventional concrete (CC) under dynamic loading / Q. Sun, B. Williams, C. Loeffler, B. Martin, W. Heard, D. Frew, Nie X. // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – P. 155. – 103893.
33. Zhang F., Poh L. H., Zhang M.-H. Resistance of cement-based materials against high-velocity small caliber deformable projectile impact // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – 103629.
34. Projectile penetration of reinforced concrete considering the effect of steel reinforcement: experimental study and theoretical analysis / X. Zhang, H. Wu, S. Zhang, F. Huang // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – 103653.
35. Effect of reinforcing steel on the impact resistance of reinforced concrete panel subjected to hard-projectile impact / S. Lee, C. Kim, Y. Yu, J.-Y. Cho // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – P. 148. – 103762.
36. A study on the resistance of SC walls subjected to missile impact using large-scale impact tests / K. Kim, K. Lee, J. Shin, J. Lee, A. Varma // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – P. 139. – 103507.
37. Hypervelocity penetration of concrete targets with long-rod steel projectiles: experimental and theoretical analysis / Y. Lu, Q. Zhang, Y. Xue, X. Guo, C. Shang, W. Liu, ... R. Long // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – 103742.
38. Li P.P., Brouwers H.J.H., Yu Q. Influence of key design parameters of ultra-high performance fibre reinforced concrete on in-service bullet resistance // International Journal of Impact Engineering. – 2019. – 103434.
39. The composite damage effects of explosion after penetration in plain concrete targets / S. Sun, H. Lu, S. Yue, H. Geng, Z. Jiang // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – P. 153. – 103862.
40. Experimental and theoretical study on steel long-rod projectile penetration into concrete targets with elevated impact velocities / C. Liu, X. Zhang, H. Chen, J. Wang, H. Wei, W. Xiong // International Journal of Impact Engineering. – 2019. – 103482.
41. Experimental and numerical studies on dynamic behavior of reinforced UHPC panel under medium-range explosions / Q. Su, H. Wu, H. Sun, Q. Fang // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – P. 148. – 103761.
42. Shi Y., Wang J., Cui J. Experimental studies on fragments of reinforced concrete slabs under close-in explosions // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – 103630.
43. Experimental and numerical analysis of CFRP strengthened RC columns subjected to close-in blast loading / J. Yan, Y. Liu, Z. Xu, Z. Li, F. Huang // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – 103720.
44. Failure analysis of reinforced concrete slab under impact loading using a novel numerical method / J. Ning, F. Meng, T. Ma, X. Xu // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – 103647.

45. Scaling the response of armor steel subjected to blast loading / T. Fu, M. Zhang, Q. Zheng, D. Zhou, X. Sun, X. Wang // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – 153. – 103863.
46. Погодин-Алексеев Г.И. Динамическая крепость и хрупкость металлов. М.: Машиностроение, 1966. – 242 с.
47. Majeed Z.Z.A., Lam N.T.K., Gad E.F. Predictions of localized damage to concrete caused by a low-velocity impact // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – 149. – 103799.
48. Cantilevered RC Wall Subjected to Combined Static and Impact Actions / A.C.Y. Yong, N.T.K. Lam, S.J. Menegon, E.F. Gad // International Journal of Impact Engineering. – 2020. – 103596.
49. Impact resistance of ultra-high performance concrete strengthened reinforced concrete beams / Jie Wei, Jun Li, Chengqing Wu, Zhong-xian Liu, Jiangang Fang // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – 158. – 104023. – P. 1–23.
50. Zhu X.-C., Zhu H., Li H.-R. Drop-weight impact test on u-shape concrete specimens with statistical and regression analyses // Materials. – 2015. – № 8. – P. 5877–5890.
51. Behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) filled steel tubular members under lateral impact loading / W. Wang, C. Wu, J. Li, Z. Liu, Y. Lv // International Journal of Impact Engineering. – 2019. – 103314.
52. Constitutive modelling of UHPCC material under impact and blast loadings / S. Yang, X. Kong, H. Wu, Q. Fang, H. Xiang // International Journal of Impact Engineering. – 2021. – 153. – 103860.
53. Response of ultra-high performance cementitious composites filled steel tube (UHPCC-FST) subjected to low-velocity impact / H. Wu, G.M. Ren, Q. Fang, J.Z. Liu // Thin Wall Struct. – 2019. – 144:106341.
54. Стенд для испытания железобетонных элементов на кратковременное динамическое растяжение: пат. 48225. РФ, МПК G01N 3/00, 3/08, 3/30, № 2005112503/22: заявл. 25.04.2005: опубл. 27.09.2005. – Бюл. № 27.
55. Тензометрическое устройство для измерения деформаций арматуры железобетонных конструкций: пат. 76117. РФ, МПК G01B 7/016, № 2008113329/22: заявл. 07.04.2008: опубл. 10.09.2008. – Бюл. № 25.
56. Установка для экспериментальных исследований строительных конструкций: пат. 66534. РФ, МПК G01N 3/00, № 2007110136/22: заявл. 19.03.2007: опубл. 10.09.2007. – Бюл. № 25.
57. Стенд для испытания железобетонных элементов на кратковременное динамическое сжатие: пат. RU 2401424 C1. РФ, МПК G01N 3/30, № 2009131954/28: заявл. 24.08.2009: опубл. 10.10.2010. – Бюл. № 28.
58. Стенд для испытания железобетонных элементов на действие изгибающих моментов, продольных и поперечных сил при кратковременном динамическом нагружении: пат. RU 90901 U1. РФ, МПК G01N 3/08; 3/30, № 2009136855/22: заявл. 05.10.2009: опубл. 20.01.2010. – Бюл. № 21.
59. Стенд для испытания железобетонных элементов на совместное кратковременное динамическое воздействие изгибающего и крутящего моментов: пат. RU 2570231 C1. РФ, МПК G01N 3/30; G01M 7/08, № 2014136689/28: заявл. 09.09.2014: опубл. 10.12.2015. – Бюл. № 34.
60. Стенд для испытания железобетонных элементов с фиксированной степенью горизонтального обжатия на кратковременный динамический изгиб: пат. RU 147262 U1. РФ, МПК G01N 3/30, № 2014124076/28: заявл. 11.06.2014: опубл. 27.10.2014. – Бюл. № 30.
61. Стенд для испытания железобетонных элементов на динамический изгиб: пат. RU 148397 U1. РФ, МПК G01N 3/00, № 2014117330/28: заявл. 29.04.2014: опубл. 10.12.2014. – Бюл. № 34.
62. Стенд для динамических испытаний изгибаемых железобетонных элементов: пат. RU 158496 U1. РФ, МПК G01N 3/30; G01M 7/08, № 2015134838/28: заявл. 18.08.2015: опубл. 10.01.2016. – Бюл. № 1.
63. Стенд для испытания железобетонных элементов на продавливание при кратковременной динамической нагрузке: пат. RU 2726031 C1. РФ, МПК G01N 3/303; G01M 7/08, № 2020102934: заявл. 24.01.2020: опубл. 08.07.2020. – Бюл. № 19.
64. Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю. Оценка параметров разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 3. – С. 85–95.
65. Однокопылов Г.И., Саркисов Д.Ю., Бутузов Е.А. Оценка степени живучести ответственных строительных конструкций при ударно-волновом нагружении // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 12. – С. 122–135.

Поступила: 19.05.2023 г.

Прошла рецензирование: 04.09.2023 г.

Информация об авторах

Однокопылов Г.И., доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики и электротехники Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Саркисов Д.Ю., кандидат технических наук, доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций Томского государственного архитектурно-строительного университета.

UDC 69.058.8

EXPERIENCE IN CREATING STANDS FOR TESTING REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF CRITICAL OIL AND GAS FACILITIES

Georgy I. Odnokopylov¹,
OGIz@yandex.ru

Dmitriy Yu. Sarkisov²,
Milandd@yandex.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya square, Tomsk, 634003, Russia.

The relevance of the work is caused by the increased probability of short-term shock and explosive dynamic loads due to terrorist acts and other emergency situations affecting the construction structures of critical buildings and structures of oil and gas facilities. An example of such impacts is the recent terrorist attack on the Nord Stream gas pipelines. Due to the large number of parameters affecting the physical process of deformation of structures with this type of impact, an experimental research is currently an integral part of scientific research in this area. Such studies are especially relevant for reinforced concrete structures, which, on the one hand, are very widely used in construction, and on the other, have a complex nonlinear nature of deformation. To conduct experimental research, it is necessary to design and implement specialized stands, with the help of which it is possible to create a short-term dynamic effect on the structure. A review of the literature data has shown that test stands based on drop-weight stands are most often created for conducting such studies. In such stands, the energy of a falling load is used to destroy structures. It follows from the above that the design and improvement of stands for research of reinforced concrete structures on the effect of short-term dynamic loads is an urgent task of practical importance.

The aim of the work is to describe the structures of the test stands created on the basis of the drop-weight stand in the laboratory of the Reinforced Concrete and Stone Structures Department, Tomsk State University of Architecture and Building, to identify their main advantages and indicate disadvantages; as well as to state further development paths in the field of design and implementation of such stands.

Methods: theoretical analysis of literature and Internet sources, modeling, experimental research.

Results. Various modifications of test stands based on a drilling rig for research of reinforced concrete structures have been designed and implemented. The main advantages and disadvantages of such stands are shown and further ways of their development are formulated.

Key words:

Test stand, drop-weight stand, load signal form, short-term dynamic loading, reinforced concrete, experimental studies.

This work was carried out within the government contract FEMN-2022-0004 of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

REFERENCES

1. Popov N.N., Rastorguev B.S. *Voprosy rascheta i konstruirovaniya spetsialnykh sooruzheniy* [Issues of calculation and design of special structures]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1980. 190 p.
2. Popov N.N., Rastorguyev B.S. *Raschet zhelezobetonnykh konstruksiy na deystvie kratkovremennykh dinamicheskikh nagruzok* [Calculation of reinforced concrete structures for short-term dynamic loads]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1964. 151 p.
3. Plevkov V.S. *Dinamicheskaya prochnost betona i armatury zhelezobetonnykh konstruksiy* [Dynamic strength of concrete and rebar reinforced concrete structures]. Tomsk, TSUAB Publ., 1996. 64 p.
4. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. *Prochnost i deformativnost zhelezobetonnykh konstruksiy na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении*. Monografiya [Strength and deformability of reinforced concrete structures on compliant supports under short-term dynamic loading. Monograph]. Tomsk, TSUAB Publ., 2016. 272 p.
5. Belov N., Kopanitsa D., Yugov A., Kaparulin S., Plyaskin A., Kalichkina A., Ustinov A., Yugov N., Kopanitsa G. Calculation of reinforced-concrete frame strength under a simultaneous static cross section load and a column lateral impact. *AIP Conference Proc. Advanced Materials in Technology and Construction*. Tomsk, 2015. pp. 47–53.
6. Galyautdinov Z.R. Deformation of reinforced concrete slabs on yielding supports under short-time dynamic loading. *AIP Conference Proc. Youth, Science, Solutions: Ideas and Prospects*. Tomsk, 2017. pp. 40–44.
7. Trekin N.N., Krylov V.V. On the issue of punching shear capacity of reinforced concrete slabs under dynamic loading at ground space infrastructure facilities. *Scientific Aspect*, 2018, vol. 7, no. 4, pp. 771–778.
8. Sarkisov D., Gorlenko N., Sarkisov Y., Shepelenko T., Gorynin G., Izmailov G. Strength and deformability of reinforced concrete elements under oblique eccentric short-term dynamic compression, tension and bending. *E3S Web of Conferences. Topical Problems of Green Architecture, Civil and Environmental Engineering*, TPACEE 2019, 2020. pp. 14008.
9. Mias C., Torres L., Guadagnini M., Turon A. Short and long term cracking behavior of GFRP reinforced concrete beams. *Composites Part B: Engineering*, 2015, vol. 77, pp. 223–231.
10. Lou T., Lopes S.M.R., Lopes A.V. FE analysis of short- and long-term behavior of simply supported slender prestressed concrete columns under eccentric end axial loads causing uniaxial bending. *Engineering Structures*, 2015, vol. 85, pp. 52–62.
11. Dong J., He X., Zhang H., Zhang J., Yang Y., Song Y., Rao J. Correlation analysis of accelerated aging and natural aging of GFRP in reinforced concrete beams. *Journal of Wuhan University of technology (Transportation Science and Engineering)*, 2017, vol. 41, no. 2, pp. 312–317.
12. Savinykh A.S., Garkushin G.V., Razorenov S.V., Kanel G.I. Method of measurement of the dynamic strength of concrete under explosive loading. *International Journal of Fracture*, 2017, vol. 209, pp. 109–115.

13. Gao F., Wang M., Zhang X., He Y., Li M. A comment on the calculation models for reinforced concrete under intense dynamic loading. *Baozha Yu Chongji*, 2017, vol. 37, no. 2, pp. 365–376.
14. Demyanov A., Kolchunov V.I. The dynamic loading in longitudinal and transverse reinforcement at instant emergence of the spatial crack in reinforced concrete element under the action of a torsion with bending. *Journal of Applied Engineering Science*, 2017, vol. 15, no. 3, pp. 381–386.
15. Zhou W., Tang L., Ma G., Liu X., Chen M. Mesoscopic simulation of the dynamic tensile behaviour of concrete based on a rate-dependent cohesive model. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, vol. 95, pp. 165–175.
16. Li H.-Y., Teng J., Li Z.-H. An efficient platform HSNAS (GPU) for nonlinear static and dynamic analysis of reinforced concrete frames-II. Program verification and analysis, *Zhendong yu Chongji*, 2016, vol. 35, no. 14, pp. 54–60.
17. Chen X., Chen C., Xu L., Shao Y. Dynamic flexural strength of concrete under high strain rates, *Magazine of Concrete Research*, 2017, vol. 69, no. 3, pp. 109–119.
18. Geniev G.A. O vliyaniy prodolzhitelnosti deystviya nagruzki na prochnost materiala [Effect of duration of load action on material strength]. *Concrete and reinforced concrete*, 1996, no. 4, pp. 19–22.
19. Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R. Raschet zhelezobetonnykh plit na kratkovremennyye dinamicheskie nagruzki s uchedom realnykh svoystv materialov [Calculation of reinforced concrete slabs for short-time dynamic loads taking into account the real properties of materials Concrete and reinforced concrete]. *Concrete and reinforced concrete*, 2007, no. 6, pp. 15–18.
20. Yekai Yang, Chengqing Wu, Zhongxian Liu. Rate dependent behaviour of 3D printed ultra-high performance fibre-reinforced concrete under dynamic splitting tensile. *Composite Structures*, vol. 309, 2023, pp. 116727.
21. Xiaoli Wei, Xiaodan Ren. Coupled viscosity-damage model for concrete under high strain rate. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, vol. 277, pp. 108985.
22. Xiong B., Falliano D., Restuccia L., Di Trapani F., Demartino C., Marano G.C. High-strain rate compressive behavior of concrete with two different substituted recycled plastic aggregates: Experimental characterization and probabilistic modeling. *Construction and Building Materials*, 2023, vol. 368, pp. 130279.
23. Wang Z.H., Wen H.M., Zheng H., Cheng J.S. Dynamic increase factors of concrete-like materials at very high strain rates. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 345, pp. 128270.
24. Hassan M., Wille K. Direct tensile behavior of steel fiber reinforced ultra-high performance concrete at high strain rates using modified split Hopkinson tension bar. *Composites Part B: Engineering*, 2022, vol. 246, pp. 110259.
25. Lai D., Demartino C., Xiao Y. High-strain rate tension behavior of Fiber-Reinforced Rubberized Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 2022, vol. 131, pp. 104554.
26. Xiong B., Demartino C., Xu J., Simi A., Marano G.C., Xiao Y. High-strain rate compressive behavior of concrete made with substituted coarse aggregates: Recycled crushed concrete and clay bricks. *Construction and Building Materials*, 2021, vol. 301, pp. 123875.
27. Lai D., Demartino C., Xiao Y. High-strain rate compressive behavior of Fiber-Reinforced Rubberized Concrete. *Construction and Building Materials*, 2022, vol. 319, pp. 125739.
28. Rezaei M., Issa M.A. Specimen and aggregate size effect on the dynamic fracture parameters of concrete under high loading rates. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, vol. 260, pp. 108184.
29. Albertini C., Cardoni E., Labibes K. Study of the mechanical properties of plain concrete under dynamic loading. *Exp. Mech.*, 1999, no. 39, pp. 137–141.
30. Chen L., Yue C., Zhou Y., Zhang J., Jiang X., Fang Q. Experimental and mesoscopic study of dynamic tensile properties of concrete using direct-tension technique. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 155, pp. 103895.
31. Gerard G., Patrice B. Behavior of quasi-brittle material at high strain rate. Experiment and modeling. *Eur. J. Mech. A.*, 1998, no. 17-3, pp. 403–420.
32. Sun Q., Williams B., Loeffler C., Martin B., Heard W., Frew D., Nie X. Comparative study of strength-based damage evolution in ultra-high-performance concrete (UHPC) and conventional concrete (CC) under dynamic loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 155, pp. 103893.
33. Zhang F., Poh L. H., Zhang M.-H. Resistance of cement-based materials against high-velocity small caliber deformable projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, pp. 103629.
34. Zhang X., Wu H., Zhang S., Huang F. Projectile penetration of reinforced concrete considering the effect of steel reinforcement: experimental study and theoretical analysis. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, pp. 103653.
35. Lee S., Kim C., Yu Y., Cho J.-Y. Effect of reinforcing steel on the impact resistance of reinforced concrete panel subjected to hard-projectile impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 148, pp. 103762.
36. Kim K., Lee K., Shin J., Lee J., Varma A. A study on the resistance of SC walls subjected to missile impact using large-scale impact tests. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 139, pp. 103507.
37. Lu Y., Zhang Q., Xue Y., Guo X., Shang C., Liu W., Long R. Hypervelocity penetration of concrete targets with long-rod steel projectiles: experimental and theoretical analysis. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, pp. 103742.
38. Li P.P., Brouwers H.J.H., Yu Q. Influence of key design parameters of ultra-high performance fibre reinforced concrete on in-service bullet resistance. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, pp. 103434.
39. Sun S., Lu H., Yue S., Geng H., Jiang Z. The composite damage effects of explosion after penetration in plain concrete targets. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 153, pp. 103862.
40. Liu C., Zhang X., Chen H., Wang J., Wei H., Xiong W. Experimental and theoretical study on steel long-rod projectile penetration into concrete targets with elevated impact velocities. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, pp. 103482.
41. Su Q., Wu H., Sun H., Fang Q. Experimental and numerical studies on dynamic behavior of reinforced UHPC panel under medium-range explosions. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 148, pp. 103761.
42. Shi Y., Wang J., Cui J. Experimental studies on fragments of reinforced concrete slabs under close-in explosions. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, pp. 103630.
43. Yan J., Liu Y., Xu Z., Li Z., Huang F. Experimental and numerical analysis of CFRP strengthened RC columns subjected to close-in blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, pp. 103720.
44. Ning J., Meng F., Ma T., Xu X. Failure analysis of reinforced concrete slab under impact loading using a novel numerical method. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, pp. 103647.
45. Fu T., Zhang M., Zheng Q., Zhou D., Sun X., Wang X. Scaling the response of armor steel subjected to blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 153, pp. 103863.
46. Pogodin-Alekseev G.I. *Dinamicheskaya krepost i khrupkost metallov* [Dynamic strength and brittleness of metals]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1966. 242 p.
47. Majeed Z.Z.A., Lam N.T.K., Gad E.F. Predictions of localized damage to concrete caused by a low-velocity impact. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 149, pp. 103799.
48. Yong A.C.Y., Lam N.T.K., Menegon S.J., Gad E.F. Cantilevered RC wall subjected to combined static and impact actions. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, pp. 103596.
49. Jie Wei, Jun Li, Chengqing Wu, Zhong-xian Liu, Jianguang Fang. Impact resistance of ultra-high performance concrete strengthened reinforced concrete beams. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 158, 104023, pp. 1–23.
50. Zhu X.-C., Zhu H., Li H.-R. Drop-weight impact test on u-shape concrete specimens with statistical and regression analyses. *Materials*, 2015, no. 8, pp. 5877–5890.
51. Wang W., Wu C., Li J., Liu Z., Lv Y. Behavior of ultra-high performance fiber-reinforced concrete (UHPFRC) filled steel tubular members under lateral impact loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, pp. 103314.
52. Yang S., Kong X., Wu H., Fang Q., Xiang H. Constitutive modeling of UHPCC material under impact and blast loadings. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 153, pp. 103860.
53. Wu H., Ren G.M., Fang Q., Liu J.Z. Response of ultra-high performance cementitious composites filled steel tube (UHPCC-FST) subjected to low-velocity impact. *Thin Wall Struct.*, 2019, pp. 144:106341.

54. Plevkov V.S., Sarkisov D.Yu. *Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnykh elementov na kratkovremennoe dinamicheskoe rastyazhenie* [Stand for testing reinforced concrete elements for short-term dynamic stretching]. Patent 48225. RF, no. 2005112503/22, 2005.
55. Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu., Tigay O.Yu., Ismailov G.M. *Tenzometricheskoe ustroystvo dlya izmereniya deformatsiy armatury zhelezobetonnykh konstruksiy* [Strain gauge device for measuring deformations of reinforcement of reinforced concrete structures]. Patent 76117. RF, no. 2008113329/22, 2008.
56. Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu., Tigay O.Yu., Odnokopylova O.A. *Ustanovka dlya eksperimentalnykh issledovaniy stroitelnykh konstruksiy* [Installation for experimental studies of building structures]. Patent 66534 RF, no. 2007110136/22, 2007.
57. Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Baldin I.V., Sarkisov D.Yu., Goncharov M.E., Dzuba P.V. *Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnykh elementov na kratkovremennoe dinamicheskoe szhatie* [Stand for testing reinforced concrete elements for short-term dynamic compression]. Patent RF 2401424 C1, no. 2009131954/28, 2010.
58. Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Baldin I.V., Baldin S.V. *Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnykh elementov na deystvie izgibayushchikh momentov prodolnykh i poperechnykh sil pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении* [Stand for testing reinforced concrete elements for the action of bending moments, longitudinal and transverse forces under short-term dynamic loading]. Patent RU 90901 U1. RF, no. 2009136855/22, 2010.
59. Rodevich V.V., Odnokopylov G.I., Arzamastsev S.A. *Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnykh elementov na sovmestnoe kratkovremennoe dinamicheskoe vozdeystvie izgibayushchego i krutyashchego momentov* [Stand for testing reinforced concrete elements for the combined short-term dynamic effect of bending and torques]. Patent RU 2570231 C1. RF, no. 2014136689/28, 2015.
60. Kumpyak O.G., Odnokopylov G.I., Galyautdinov Z.R., Galyautdinov D.R. *Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnykh elementov s fiksirovannoy stepenyu gorizontalnogo obzhatiya na kratkovremenny dinamicheskiy izgib* [Stand for testing reinforced concrete elements with a fixed degree of horizontal compression for short-term dynamic bending]. Patent. RU 147262 U1. RF, no. 2014124076/28, 2014.
61. Kumpyak O.G., Odnokopylov G.I., Meshcheulov N.V., Kondratenko O.O. *Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnykh elementov na dinamicheskiy izgib* [Stand for testing reinforced concrete elements for dynamic bending]. Patent RU 148397 U1. RF, no. 2014117330/28, 2014.
62. Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Kudyakov K.L., Nevsky A.V., Meshcheulov N.V., Galyautdinov D.R. *Stend dlya dinamicheskikh ispytaniy zhelezobetonnykh elementov* [Stand for dynamic testing of reinforced concrete elements]. Patent RU 158496 U1. RF, no. 2015134838/28, 2016.
63. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu., Ergeshev E.T., Krilov V.V., Evstafeva E.B. *Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnykh elementov na prodavlivanie pri kratkovremennoy dinamicheskoy nagruzke* [Stand for testing reinforced concrete elements for punching under short-term dynamic load]. Patent RU 2726031 C1. RF, no. 2020102934, 2020.
64. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu. Evaluation of breaking load parameters under shock wave loading for critical constructions of oil and gas sector facilities. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 3, pp. 85–95. In Rus.
65. Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu., Butuzov E.A. Evaluation of survivability degree of responsible building structures under shock wave loading. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2018, vol. 329, no. 12, pp. 122–135. In Rus.

Received: 19 May 2023.
Reviewed: 4 September 2023.

Information about the authors

Georgy I. Odnokopylov, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Dmitriy Yu. Sarkisov, Cand. Sc., associate professor, Tomsk State University of Architecture and Building.