

УДК 69.058.8

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШАЮЩЕЙ НАГРУЗКИ ПРИ УДАРНО-ВОЛНОВОМ НАГРУЖЕНИИ ДЛЯ ОТВЕТСТВЕННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ СООРУЖЕНИЙ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

Однокопылов Георгий Иванович¹,
OGIz@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, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2.

Актуальность работы обусловлена тем, что в последние годы все чаще возникает необходимость проектирования железобетонных конструкций объектов нефтегазового комплекса, на которые возможно воздействие интенсивных кратковременных динамических нагрузок аварийного типа, носящих ударно-волновой характер. Опасность действия на строительные конструкции зданий и сооружений ударных волн возрастает вследствие возможных взрывов, аварийного падения тяжелых грузов, террористических актов, природных и техногенных катастроф и т. д. Возникающие при этом специфические нагрузки часто вызывают значительные повреждения строительных конструкций, и даже их полное или частичное разрушение, которое может привести к травмам и гибели людей, а также порче дорогостоящего оборудования и, следовательно, значительным материальным затратам. Кроме того, повреждения строительных конструкций ответственных зданий и сооружений нефтегазового комплекса приводят к остановке технологического процесса, что в ряде случаев не только экономически не выгодно, но и недопустимо.

Цель: разработка методики оценки разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса.

Методы исследования: измерения нагрузки и опорных реакций методами тензометрии, графоаналитический метод исследования с применением программы Microsoft Excel, численное интегрирование методом Симпсона.

Результаты. Разработана методика оценки параметров разрушающей нагрузки ударно-волнового характера для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазового комплекса с применением мгновенных и усредненных значений коэффициентов результирующей силы. На примере конкретного испытания изгибаемого железобетонного элемента на кратковременную динамическую нагрузку получены мгновенные и усредненные значения коэффициентов результирующей силы.

Ключевые слова:

Коэффициент результирующей силы, кратковременное динамическое нагружение, ударно-волновое нагружение, железобетон, опорные реакции, экспериментальные исследования.

Актуальность исследований

При технической эксплуатации любого ответственного объекта нефтегазового комплекса всегда существует повышенная вероятность возникновения серьезных чрезвычайных ситуаций, аварий, инцидентов, а также несчастных случаев, в том числе с летальным исходом.

В нефтегазовой сфере подобные ситуации, как правило, проявляются в форме разрушений или повреждений зданий и сооружений, а также технологического оборудования. Происходит это обычно из-за взрывных процессов и последующих выбросов горячих и токсичных веществ, которые зачастую не поддаются контролю.

Основными техническими причинами аварий в этой сфере можно считать: повреждения и дефекты в конструкциях зданий, технические проблемы с оборудованием, отклонения от проектных решений в процессе строительства и монтажа опасного производственного объекта, высокий износ оборудования, недостаточный уровень внедрения новых технологий, низкое оснащение производства автоматическими си-

стемами, активность коррозионных процессов, низкий уровень средств оперативной связи и сигнализации.

По данным Ростехнадзора причинами практически двух третей всех чрезвычайных происшествий, аварий, инцидентов и несчастных случаев на опасных производственных объектах нефтяной и газовой отрасли являются факторы, которые относятся к техническим.

Следовательно, повышенное внимание при проектировании объектов данной отрасли следует уделять совершенствованию методов расчета и анализу напряженно-деформированного состояния строительных конструкций зданий и сооружений при воздействии кратковременных динамических нагрузок аварийного характера.

При анализе разрушающих кратковременных динамических воздействий, необходимом для выработки оптимальных конструктивных решений зданий и сооружений, существуют трудности по определению параметров приложенной нагрузки и выявлению истинных коэффициентов запаса прочности конструкций.

Известные методы оценки для статической нагрузки хорошо проработаны, при действии кратковременных динамических нагрузок при оценке всех параметров должно быть учтено время воздействия, а следовательно, необходимо осуществлять контроль изменения всех факторов с течением времени, что накладывает определенные сложности на применение стандартных методов, используемых при статических нагружениях [1–5].

При проведении практически любых испытаний на динамическую нагрузку (взрывное, ударное, сейсмическое) предполагается наличие узлов входного и выходного контроля параметров действующей нагрузки. Как правило, это различные силоизмерители тензометрического типа.

В работе предложена методика оценки параметров разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций. В качестве примера рассмотрено испытание изгибаемого железобетонного элемента при действии кратковременной динамической нагрузки.

Известно, что процессы, происходящие в железобетоне при кратковременных динамических воздействиях, достаточно сложны [6–12], и для их понимания необходимо проведение экспериментальных исследований, более того, необходимо разрабатывать и апробировать достоверные способы обработки и интерпретации полученных данных. Такие способы должны быть воспроизводимы и применимы при проведении испытаний конструкций с различными динамическими параметрами.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования железобетонных изгибаемых элементов по схеме однопролетной шарнирно-опертой балки на действие кратковременной динамической нагрузки были произведены на основе копровой установки. Общий вид стенда приведен на рис. 1.

Для измерения силовых параметров при испытаниях использовались датчики силоизмерительные тензорезистивные типа ДСТ4126 с максимальным измеряемым усилием при статическом нагружении до 2000 кН (при динамическом нагружении до 200 кН), контроль давлений осуществлялся месдозами – 2 шт.

Датчик для измерения нагрузки, приходящей от падающего груза, устанавливался по центру распределительной траверсы сверху образца. С целью увеличения времени действия нагрузки на датчик сверху устанавливался комплект резиновых прокладок (их наличие, толщина и количество обусловлено целями конкретного исследования). Датчики для измерения опорных реакций устанавливались попарно в каждую из специально сконструированных опор. Общий вид силоизмерительного датчика и опоры приведен на рис. 2.

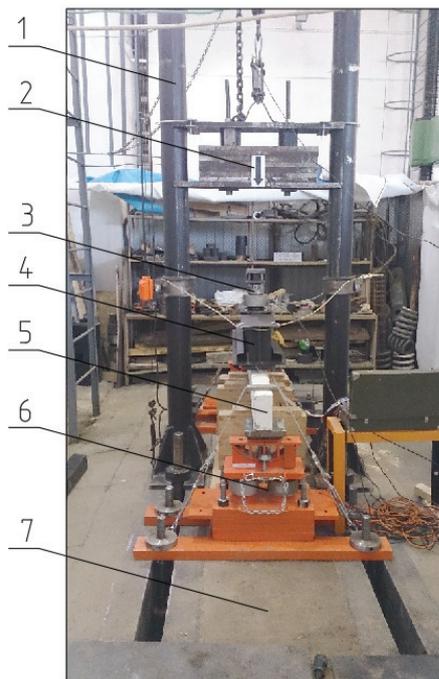


Рис. 1. Общий вид стенда для испытаний: 1 – копровая установка; 2 – груз массой 430 кг; 3 – силоизмеритель; 4 – распределительная траверса; 5 – экспериментальный образец; 6 – опора; 7 – силовой пол

Fig. 1. General view of the stand for tests: 1 is the pile driver installation; 2 is the 430 kg weight; 3 is the dynamometer; 4 is the distribution traverse; 5 is the experimental sample; 6 is the support; 7 is the reinforced floor

Для регистрации показаний датчиков в процессе экспериментального исследования использовалась сертифицированная измерительная система МПС-036, все силоизмерительные датчики были подключены к ней через специальные, имеющие защиту от помех, провода, что обеспечивало необходимую точность при синхронизации данных со всех датчиков во времени. Также при выполнении опытов был задействован комплекс приборов и датчиков, которые обычно используются при проведении экспериментальных исследований железобетонных элементов на кратковременную динамическую нагрузку [13–15].

Анализ экспериментальных данных

После проведения эксперимента зарегистрированные данные со всех силоизмерительных датчиков преобразовывались в формат Microsoft Excel, построение графиков и их дальнейшая обработка производились в данной программе.

Исходные графики с обрезанными начальными и конечными участками приведены на рис. 3. На всех графиках силоизмерительный датчик на траверсе (сверху) обозначен С-5, силоизмерительные датчики в опорах обозначены С-1, С-2 и С-3, С-4 соответственно.

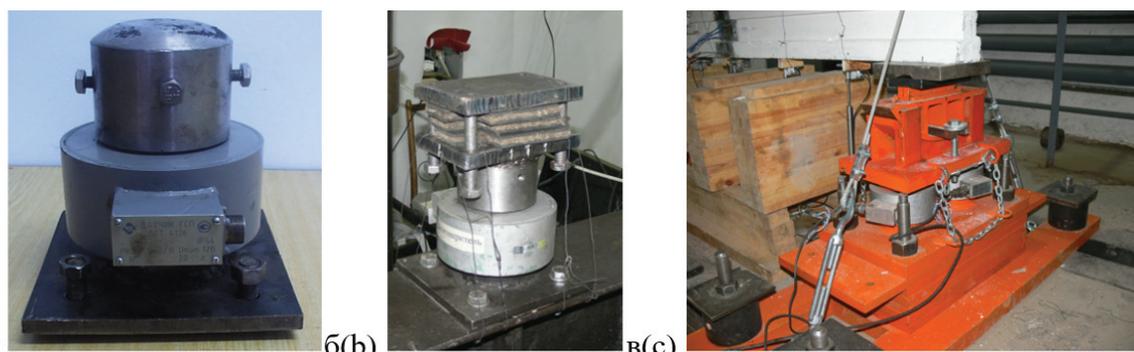


Рис. 2. Общий вид силоизмерительного оборудования: а) силоизмеритель (динамометр); б) силоизмеритель для измерения нагрузки; в) конструкция для измерения опорных реакций в сборе

Fig. 2. General view of the force measuring equipment: a) dynamometer; b) dynamometr to measure the load; c) unit for measuring assembly support reactions

Первичный анализ полученного графика показал (рис. 3):

- по форме график нагрузки (силомер С-5) имеет два выраженных пика, характеризующих падение груза, его отскок и повторное падение (данный эффект явно просматривается при воспроизведении видеозаписи эксперимента в замедленном действии);
- графики опорных реакций по форме не имеют двух ярко выраженных пиков, хотя они просматриваются на кривых С-1 и С-4;
- максимальная кратковременная динамическая нагрузка составила 65,116 кН, максимальное значение было достигнуто за 5,15 мс;
- максимальные значения по графикам опорных реакций составили 19,907 кН (С-1), 16,671 кН (С-2), 17,651 кН (С-3) и 15,298 кН (С-4);
- разброс в максимальных значениях четырех опорных силоизмерительных датчиков не превышает 23,15 %;
- сумма максимальных значений опорных реакций составляет 69,527 кН, что больше, чем пик нагрузки, который составляет 65,116 кН, однако такое сопоставление не совсем корректно, так как пики опорных реакций по графикам (С1–С4) наступают в разные моменты времени и с отстройкой (запаздыванием) относительно пика графика С-5;

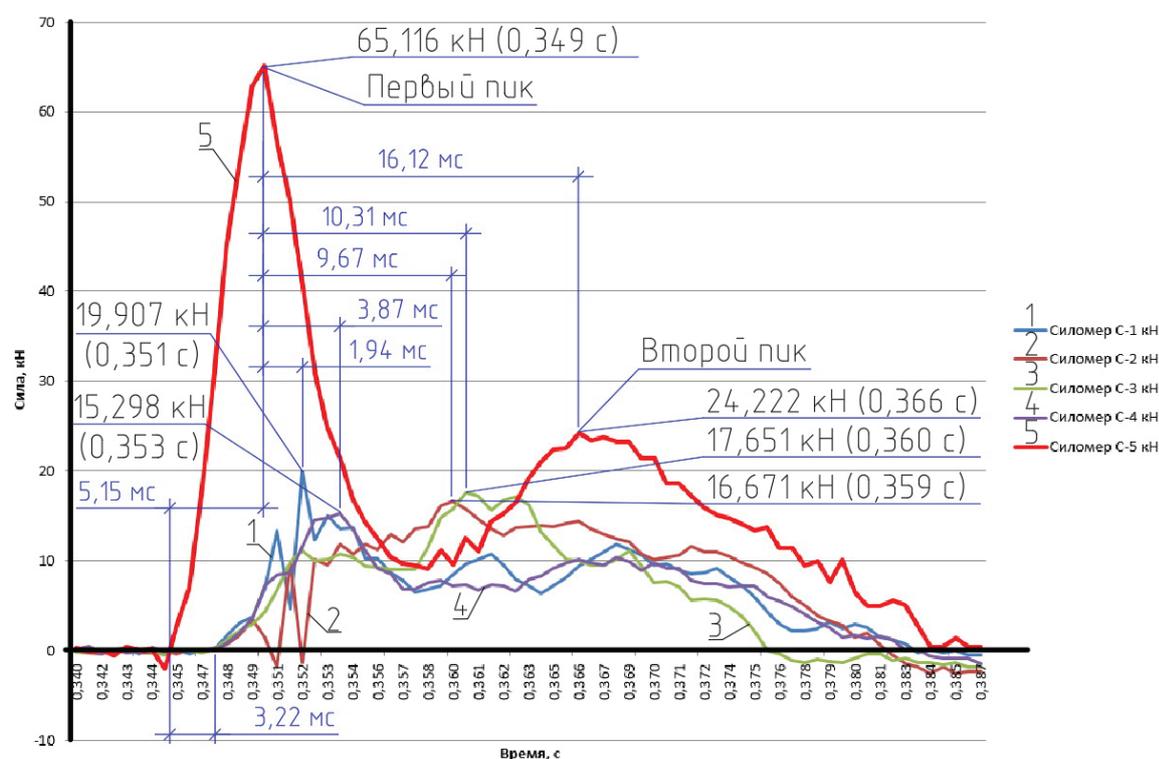


Рис. 3. Исходные графики зависимости нагрузки и опорных реакций от времени

Fig. 3. Baseline graphs of loads and support reactions time dependence

- запаздывание максимальных пиков графиков опорных реакций относительно максимального пика по графику нагрузки составили (мс): 1,94 (С-1); 9,67 (С-2); 10,31 (С-3) и 3,87 (С-4);
- так как датчики С-1 и С-2 были установлены в одной опоре, а датчики С-3 и С-4 – в другой, то по достижению пиков можно предположить некоторое «заваливание» конструкции в одну сторону (влево), а затем выравнивание и достижение пиковых реакций на правых датчиках опор;
- разница во времени между двумя пиками (удар и повторный удар после отскока) для графика нагрузки (С-5) составила 16,12 мс;
- ко времени достижения второго пика на графике нагрузки (С-5) по всем датчикам опорных реакций уже были достигнуты пиковые значения, однако пики реакций по датчикам С-2 и С-3 были достигнуты уже после отскока груза (прохождения промежуточного минимума на графике нагрузки С-5);
- общее время действия кратковременной динамической нагрузки составило около 42,24 мс, время действия первого (однократного) удара составило 13,536 мс.

Далее для сопоставления действующей кратковременной динамической нагрузки с опорной реакцией в каждый момент времени был построен суммарный график опорной реакции (сумма показаний четырех датчиков опор в каждый отсчет времени). Данный график представлен на рис. 4.

В результате анализа данного графика можно отметить:

- суммарный график опорных реакций (сумма показаний С1–С4) имеет три выраженных пика;
- первый пик 51,484 кН соответствует области 1 на графике, то есть области достижения максимальных реакций в датчиках С-1 и С-4;
- второй пик 50,406 кН соответствует области 2 на графике, то есть области достижения максимальных реакций в датчиках С-2 и С-3;
- третий пик 44,816 кН вероятно возникает вследствие повторного удара груза после отскока;
- первый пик на суммарном графике опорных реакций отмечен через 3,87 мс после пика на графике нагрузки (С-5), второй пик на том же графике – через 10,31 мс, запаздывание между двумя пиками оставило 6,44 мс;
- запаздывание между пиками нагрузки и суммарной опорной реакции после повторного удара груза составило 1,93 мс, что меньше, чем запаздывание между первыми пиками нагрузки и суммарной опорной реакции, – 3,87 мс и меньше, чем запаздывание между началом действия нагрузки и опорных реакций, – 3,22 мс (рис. 3);
- таким образом, из предыдущего заключения следует, что величина запаздывания опорной реакции относительно действующей нагрузки при кратковременном динамическом воздей-

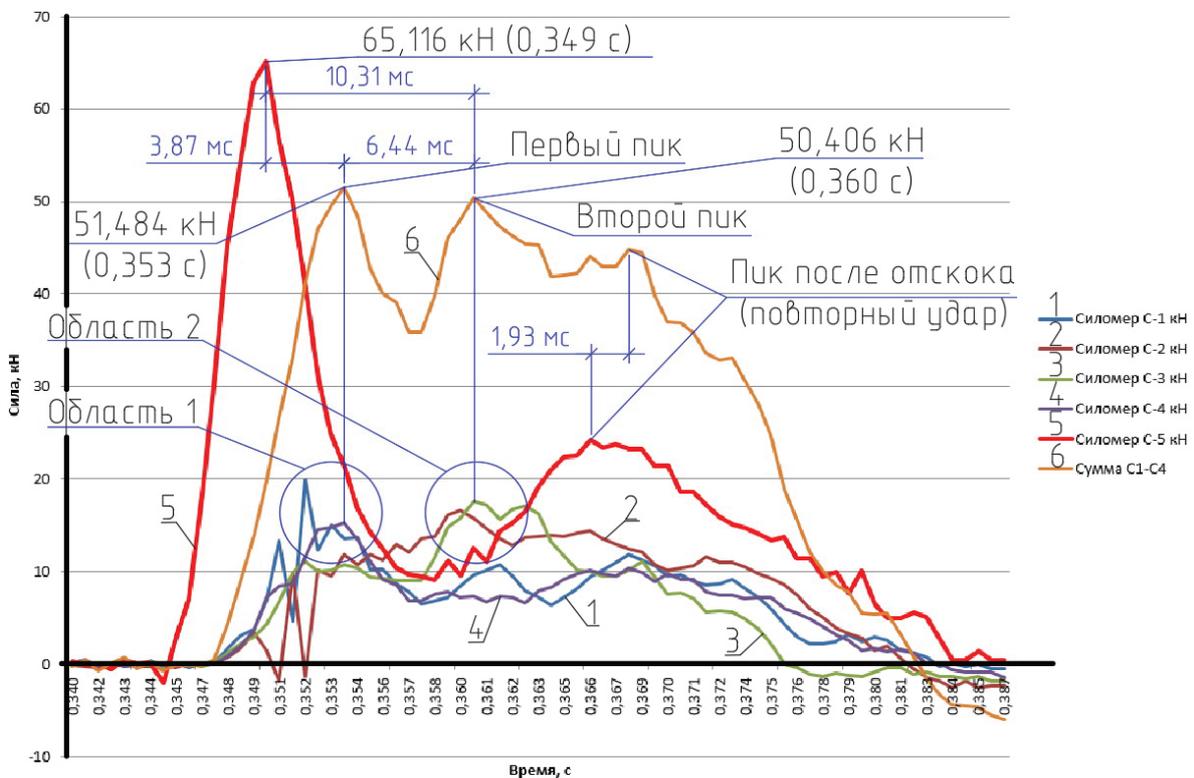


Рис. 4. График зависимости нагрузки и суммарной опорной реакции

Fig. 4. Dependence graph of the total load and support reaction

ствии не является величиной постоянной, а вначале возрастает (от 3,22 до 3,87 мс), а затем падает (от 3,87 до 1,93 мс). Вероятно, такой эффект объясняется изменением скорости нагружения в процессе кратковременного динамического воздействия;

- сравнения абсолютных максимальных значений на графиках нагрузки (65,116 кН) и суммарной опорной реакции (51,484 кН) показывает, что пик нагрузки превышает пик суммарной опорной реакции на 20,93 %, такое сопоставление опять же видится не совсем корректным, так как на графике суммарной опорной реакции имеется еще и второй сопоставимый по величине с первым (50,406 кН) пик;
- суммирование двух пиков с графика суммарной опорной реакции и сравнение этой величины со значением пика нагрузки тоже не даст удобных для анализа результатов, в следствие чего логичным выглядит сравнение площадей под графиками кратковременной динамической нагрузки и суммарной опорной реакции. Следует отметить, что на каждом конечном интервале времени площади под графиками выражают импульс силы и импульс опорной реакции в соответствующей размерности Н*с. В дальнейшем в работе все величины переводятся в относительные значения, при этом предлагаемый подход к анализу графиков не включает оценку величины массы груза и его начальных и конечных скоростей. Целью является нахождение площадей под графика-

ми аналитическим или графическим способом и их сопоставление в относительных единицах, что в итоге дает безразмерный коэффициент.

Перед нахождением площадей, ограниченных графиками и осью времени, были скорректированы начальные и конечные участки графиков. Также можно было вывести в ноль ось времени, но этого сделано не было для удобства сравнения с предыдущими результатами.

Площади, ограниченные графиками и осью времени, определялись путем численного интегрирования методом Симпсона (методом парабол). Расчеты выполнялись в программе Microsoft Excel.

На рис. 5 приведены графики с выделением площадей и численными значениями, а также отклонением площадей графиков кратковременной динамической нагрузки и суммарной опорной реакции.

Выполненные расчеты показали:

- площадь графика кратковременной динамической нагрузки составляет 1,495 Н*с;
- площадь графика суммарной опорной реакции составляет 2,226 Н*с;
- отклонение между площадями, ограниченными графиками и осью времени, составляет 32,839 % в пользу графика суммарной опорной реакции;
- такой эффект может объясняться тем, что датчик С-5 (для определения кратковременной динамической нагрузки) при эксперименте был расположен сверху экспериментального образ-

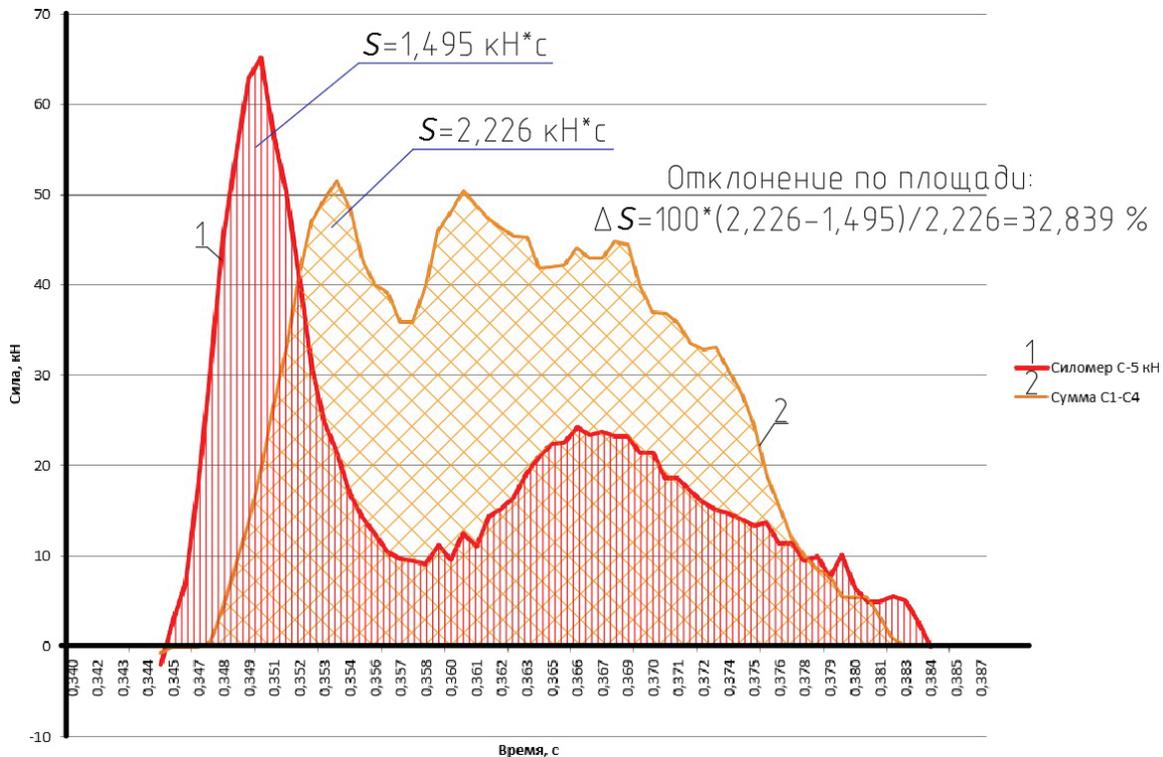


Рис. 5. Графики развития кратковременной динамической нагрузки и суммарной опорной реакции во времени. Нахождение площадей под графиком

Fig. 5. Graphs of transient dynamic loads and the total reaction time reference. Finding area is under graphs

ца и распределительной траверсы и показывал величину нагрузки от падения груза массой 430 кг с высоты 0,5 м, а датчики для определения опорных реакций располагались в специально сконструированных опорах снизу и следовательно на их показания оказывали влияния силы инерции от веса силомера С-5, распределительной траверсы и самого экспериментального образца, возникающие в момент удара груза. Нужно учесть, что вес железобетонного образца, распределительной траверсы и датчика С-5 суммарно около 100 кг, что составляет около 25 % от массы падающего груза (435 кг). Кроме того, часть энергии удара должна расходоваться на деформирование самого образца, а часть – на выделение тепла. Также нельзя исключать влияние на показания датчиков шумов от перемещения опорных пластин и других металлических элементов стенда.

Для обеспечения достоверности выводов, необходимо проведение экспериментальных исследований, исключающих отскок образца, и соответственно анализ данных, полученных при чистом однократном ударе груза. Такие исследования технически более сложны, но их можно провести, если собрать экспериментальный стенд, например, по патенту [16].

В связи с этим для дальнейшей обработки полученных в настоящем исследовании результатов из графиков, представленных на рис. 5, были выделены фрагменты, соответствующие однократному удару, при этом «конечный участок» графика суммарной опорной реакции был аппроксимирован численно. Кроме того, для удобства анализа временная шкала была представлена в мс, а шкала силы переведена в относительные величины путем деления каждого показания всех датчиков на максимальную зафиксированную нагрузку в 65,116 кН.

Из литературных источников, например [17–20], известно, что при кратковременном динамическом нагружении прочность железобетонных конструкций выше, чем при статическом нагружении, что объясняется изменением физико-механических характеристик бетона и арматуры по сравнению со статическим состоянием. При кратковременном динамическом нагружении происходит неравномерное развитие и определенное запаздывание деформаций по сравнению с результатами статических испытаний [21, 22].

Экспериментальные исследования показывают, что также имеет место запаздывание опорных реакций относительно действующей нагрузки, это приводит к смещению по времени друг относительно друга пиковых значений кратковременной динамической нагрузки и опорных реакций.

Методика оценки параметров разрушающей нагрузки

Несмотря на то, что, согласно принципу Даламбера, система при кратковременном динамическом нагружении в любой момент времени находится в

равновесии за счет действия сил инерции, для понимания и корректной оценки результатов экспериментальных исследований, а также обоснования момента наступления предельного состояния в конструкции по зарегистрированным данным необходимо учитывать время запаздывания, а если учесть, что запаздывание во время динамического воздействия не является постоянной величиной, то необходим подход для постоянного отслеживания соотношения значений действующей нагрузки и опорных реакций в процессе динамического воздействия. Такой величиной может служить результирующая сила в каждый момент времени. Под результирующей силой понимается разность между мгновенным значением силы (по показанию силоизмерителя, установленного сверху образца) и суммой мгновенных значений опорных реакций (по показаниям датчиков опорных реакций, установленных снизу образца).

В результате обработки данных проведенного экспериментального исследования получают: мгновенные значения силы приложенного сверхнормативного ударного воздействия по показаниям силоизмерителя – $q_s(t)$ и мгновенные значения показаний каждого из n датчиков опорной реакции – $q_{op,i}(t)$ на интервале времени от t_1 до t_2 (время начала и окончания ударного воздействия).

Нужно отметить, что для регистрации значений сверхнормативной кратковременной динамической нагрузки обычно необходимо и достаточно одного силоизмерителя, а для фиксации значений опорных реакций может использоваться любое четное число датчиков (для линейных конструкций при двух опорах).

Для удобства работы с величинами результирующей силы необходимо перевести ее значения в относительные единицы и таким образом получить мгновенные и усредненные значения коэффициентов результирующей силы. Перевод в относительные величины необходим также для использования данных при сопоставительном анализе с результатами серии аналогичных испытаний.

Для перевода полученных данных в относительные величины каждое из мгновенных значений $q_s(t)$ и $q_{op,i}(t)$ делится на q_{smax} – максимальное значение силы приложенного сверхнормативного ударного воздействия по показаниям силоизмерителя.

Определение мгновенного значения коэффициента результирующей силы $k(t)$ производится путем нахождения разности между мгновенным значением силы и суммой мгновенных значений n датчиков опорных реакций, деленной на максимальное значение силы, т. е.:

$$k(t) = \frac{q_s(t) - \sum_{i=1}^n q_{op,i}(t)}{q_{smax}}$$

Определение усредненного значения коэффициента результирующей силы k на временном интервале от t_1 до t_2 производится путем нахождения разности между площадью, ограниченной графика-

ком силы с временной осью, и площадью, ограниченной графиком суммарной опорной реакции с временной осью, деленной на площадь, ограниченную графиком силы с временной осью, т. е.:

$$k = \frac{\int_{t_1}^{t_2} q_s(t)dt - \sum_{i=1}^n \int_{t_1}^{t_2} q_{op,i}(t)dt}{\int_{t_1}^{t_2} q_s(t)dt}.$$

В выше обозначенных формулах: $k(t)$ – мгновенное значение коэффициента результирующей силы в строительной конструкции при ударном разрушении; k – усредненное значение коэффициента результирующей силы в строительной конструкции при ударном разрушении на интервале времени t_1-t_2 ; t_1, t_2 – времена начала и окончания

ударного воздействия; n – число датчиков опорных реакций при испытаниях; $q_s(t)$ – мгновенное значения кратковременной динамической нагрузки при сверхнормативном ударном воздействии по показаниям силоизмерителя; $q_{op,i}(t)$ – мгновенное значение показания i -го датчика опорной реакции; q_{smax} – максимальное значение динамической нагрузки приложенного сверхнормативного ударного воздействия по показаниям силоизмерителя.

На рис. 6 приведены графики зависимости относительных значений кратковременной динамической нагрузки и суммарной опорной реакции от времени при однократном ударе, а также график изменения значений коэффициента результирующей силы в процессе испытания.

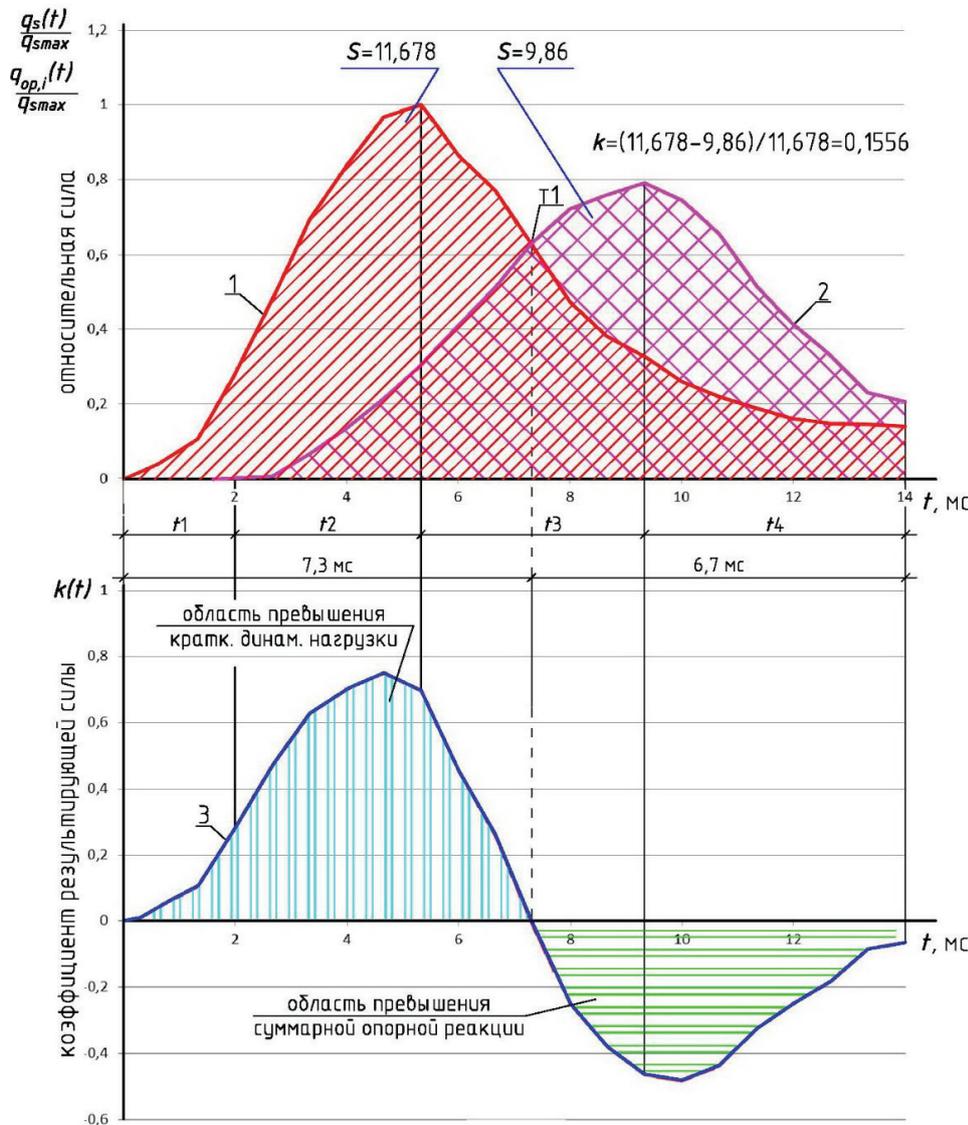


Рис. 6. 1 – график зависимости относительной кратковременной динамической нагрузки от времени; 2 – график зависимости относительной суммарной опорной реакции от времени; 3 – график зависимости от времени значений коэффициента результирующей силы

Fig. 6. 1 – graph of the relative short-term dynamic load versus time; 2 – graph of the relative total response versus time; 3 – graph of the resultant force factor versus time

На представленных графиках можно выделить четыре характерных временных интервала t_1-t_4 , а также характерную точку «статического» равновесия – t_1 . В данный момент времени кратковременная динамическая нагрузка равна по величине суммарной опорной реакции.

- t_1 – временной интервал запаздывания опорной реакции относительно кратковременно динамической нагрузки (зависит в основном от скорости нагружения);
- t_2 – временной интервал развития в экспериментальном образце вначале упругих, а затем пластических деформаций;
- t_3 – временной интервал, характеризующий время разрушения образца (временной участок, на котором деформации бетона достигают своих предельных значений, а напряжения в арматуре достигают предела текучести);
- t_4 – временной интервал значительного развития пластических деформаций.
- t_1 – точка, характеризующая момент равенства значений кратковременной динамической нагрузки и суммарной опорной реакции.

При действии на железобетонный элемент кратковременных динамических нагрузок процессы развития опорных реакций, прогибов, деформаций бетона и арматуры происходят с некоторым запаздыванием относительно развития нагрузки, к тому же, как показывает анализ полученных графиков, запаздывание – величина непостоянная во времени. Величина запаздывания может зависеть от многих факторов: скорости деформирования (массы падающего груза, высоты падения, начальной скорости и ускорения), жесткости балки (качества и вида всех составляющих бетона, качества подготовки бетонной смеси, технологии бетонирования, условий твердения, класса и вида арматуры, процента армирования, схемы расположения ее по сечению и др.), параметров окружающей среды (температура, давление, влажность и др.). Учет всех многочисленных факторов, оказывающих влияние на протекание процесса, не представляется возможным, к тому же все условия слабо воспроизводимы при повторных испытаниях, следовательно, выбор для сопоставительного анализа результатов испытаний, характерного временного момента, когда нагрузка и опорная реакция равны по значению представляется интересным.

Для представленного в качестве примера испытания значения мгновенного коэффициента результирующей силы изменяются в пределах от +0,75 до –0,48. При этом знак «+» показывает превышение нагрузки над опорной реакцией, а знак «–» – наоборот.

Усредненное значение коэффициента результирующей силы, по сути, равно разнице между площадями, ограниченными графиками 1 и 2 и временной осью, на рис. 8. Для представленного в качестве примера испытания площадь под графиком 1 составляет 11,678, а площадь под графиком 2 – 9,86. Усредненный коэффициент резуль-

тирующей силы составляет 0,1556, полученное значение показывает долю энергии, затраченную на деформирование материала и выделение тепла в процессе испытания строительной конструкции на кратковременную динамическую сверхнормативную нагрузку.

Для получения абсолютных значений разности между мгновенными показаниями силоизмерителя и суммарной опорной реакции необходимо помножить мгновенное значение коэффициента результирующей силы $k(t)$ на максимальное значение силы приложенного сверхнормативного ударного воздействия по показаниям силоизмерителя q_{smax} .

Для получения абсолютного значения разности площадей под графиками 1 и 2 на рис. 8 необходимо помножить усредненное значение коэффициента результирующей силы k на абсолютное значение площади под графиком 1.

Использование приведенного подхода к анализу графиков кратковременной динамической нагрузки и графиков опорных реакций позволяет получить качественную и количественную картину о развитии силового фактора в процессе кратковременного динамического воздействия на изгибаемый железобетонный элемент.

Построение графика отношения значений нагрузки к опорной реакции с течением времени позволяет получить характерные точки и участки, описывающие процессы «перетекания» нагрузки в опорную реакцию конструкции в процессе динамического воздействия. График отношения значений (мгновенные и усредненные значения коэффициентов результирующей силы) может быть полезен, например, при разработке и проектировании податливых опор для смягчения динамического воздействия на железобетонные конструкции при сейсмических, аварийных ударных или взрывных воздействиях [2, 7].

Для получения полных данных о процессах, происходящих в ходе кратковременного динамического воздействия на железобетонный элемент, необходимо провести сопоставление полученных результатов с результатами детального анализа графиков зависимости от времени деформаций бетона, арматуры, прогибов и ускорений образца.

Разработанная методика может быть применена для оценки параметров разрушающей нагрузки ударно-волнового характера различных классов строительных конструкций, а также при различных временных интервалах ее действия. При этом существуют ограничения в применении представленной методики, основанные на необходимости наличия входного датчика силы и выходных датчиков опорных реакций.

Выводы

1. Впервые предложена методика оценки параметров разрушающей нагрузки при ударно-волновом нагружении для ответственных строительных конструкций сооружений нефтегазо-

вого комплекса с применением мгновенных и усредненных значений коэффициентов результирующей силы.

2. На примере конкретного испытания изгибаемого железобетонного элемента на кратковре-

менную динамическую нагрузку получены мгновенные и усредненные значения коэффициентов результирующей силы, которые составили соответственно $k(t) = +0,75...-0,48$, $k=0,1556$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Особенности разрушения железобетонных конструкций при динамическом нагружении / В.С. Плевков, А.В. Радченко, И.В. Балдин, П.А. Радченко, М.Е. Гончаров, С.П. Батуев // Вестник Тамбовского Университета. – 2013. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 1578–1579.
2. Кумпяк О.Г., Галаяудинов 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.
3. Tensile behavior of concrete under high loading rates / J. Ozbolt, A. Sharma, B. Irhan et al. // Int. J. of Impact Eng. – 2014. – V. 69. – № 5. – P. 55–68.
4. Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels / J.H. Kim, D. Kim, Han Heung Nam et al. // Materials Science & Engineering A. – 2013. – № 559. – P. 222–231.
5. Shang, S., Song Y. Dynamic biaxial tensile-compressive strength and failure criterion of plain concrete // Construction and Building Materials. – 2013. – V. 40. – № 2. – P. 322–329.
6. Кумпяк О.Г., Копаница Д.Г. Прочность и деформативность железобетонных сооружений при кратковременном динамическом нагружении. Нортхэмптон; Томск: Изд-во STT, 2002. – 336 с.
7. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading / B. Chiaia, O. Kumpyak, L. Placidi et al. // Engineering Structures. – 2015. – № 96. – P. 88–99.
8. Chen X., Wu S., Zhou J. Experimental and modeling study of dynamic mechanical properties of cement paste, mortar and concrete // Construction and Building Materials. – 2013. – V. 47. – P. 419–430.
9. Asprone D., Cadoni E., Prota A. Experimental analysis of tensile dynamic behavior of existing concrete under high strain rates // ACI Structural Journal. – 2009. – V. 106. – № 1. – P. 106–113.
10. Yan D., Lin G. Dynamic properties of concrete in direct tension // Cement and concrete research. – 2006. – № 36. – P. 1371–1378.
11. 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.
12. 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.
13. Установка для экспериментальных исследований строительных конструкций: пат. Рос. Федерация № 66534; заявл. 19.03.2007; опубл. 10.09.2007, Бюл. № 25. – 2 с.
14. Тензометрическое устройство для измерения деформаций бетона железобетонных конструкций: пат. Рос. Федерация № 76118; заявл. 07.04.2008; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 25. – 2 с.
15. Тензометрическое устройство для измерения деформаций арматуры железобетонных конструкций: пат. Рос. Федерация № 76117; заявл. 07.04.2008; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 25. – 2 с.
16. Стенд для испытания железобетонных элементов на однократное кратковременное динамическое воздействие: пат. Рос. Федерация № 76133; заявл. 07.04.2008; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 25. – 2 с.
17. Экспериментальные и численные исследования прочности стыков железобетонных колонн при кратковременном динамическом нагружении / В.С. Плевков, А.В. Радченко, М.Е. Гончаров, П.А. Радченко // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2014. – № 3. – С. 37–41.
18. Гончаров М.Е. Исследование прочности железобетонных колонн и их стыков с учетом пространственной работы зданий // Сборник научных трудов XII Международной конференции студентов и молодых ученых. – Томск, 2015. – С. 1269–1271.
19. Плевков В.С., Гончаров М.Е. Особенности работы стыков сборных железобетонных колонн при кратковременном динамическом нагружении // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 3. – С. 62–67.
20. Гениев Г.А. О влиянии продолжительности действия нагрузки на прочность материала // Бетон и железобетон. – 1996. – № 4. – С. 19–22.
21. Попов Н.Н., Кумпяк О.Г., Плевков В.С. Вопросы динамического расчета железобетонных конструкций. – Томск, Изд-во Том. Ун-та, 1990. – 288 с.
22. Плевков В.С. Динамическая прочность бетона и арматуры железобетонных конструкций. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 1996. – 64 с.

Поступила 14.03.2017 г.

Информация об авторах

Однокопылов Г.И., кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода и электрооборудования Энергетического института 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

EVALUATION OF BREAKING LOAD PARAMETERS UNDER SHOCK WAVE LOADING FOR CRITICAL CONSTRUCTIONS OF OIL AND GAS SECTOR FACILITIES

Georgy I. Odnokopylov¹,

OGlz@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.

Relevance of the research is caused by the fact that in recent years the necessity to design concrete constructions in oil and gas facilities occurs more often. These constructions may be impacted by intensive short-term dynamic loads, emergency bearing of shock-wave character. Risk of shock waves effect on buildings and constructions increases as a result of possible explosions, accidental drop of heavy loads, acts of terrorism, natural and manmade disasters, etc. The occurring specific loads often cause significant damage of building structures, and even their total or partial destruction, which can lead to injury or loss of life, as well as damage of expensive equipment and, therefore, significant material costs. In addition, damage of building structures of critical constructions in oil and gas complex lead to a process shutdown, which is economically inefficient in some cases and even unacceptable.

The main aim of the study is to develop the methodology for assessing the failure load under shock-wave loading for critical building structures of oil and gas complex facilities.

The methods used in the study: measurement of load and support reactions by tensometry methods, graphic-analytical method of research using Microsoft Excel software, numerical integration by Simpson.

The results. The authors have developed the method for estimating the parameters of the shock-wave nature for critical building structures of oil and gas complex facilities applying the instantaneous and average values of resultant force coefficients. By the example of the short-term dynamic load test of reinforced concrete bent element the authors obtained the instant and average values of resultant force coefficient.

Key words:

Resultant force coefficient, short-term dynamic load, shock-wave loading, reinforced concrete, support reactions, experimental study.

REFERENCES

- Plevkov V.S., Radchenko A.V., Baldin I.V., Radchenko P.A., Goncharov M.E., Batuev S.P. Features of destruction of reinforced concrete structures under dynamic loading. *Vestnik Tambovskogo Universiteta*, 2013, vol. 18–4, pp. 1578–1579. In Rus.
- Kumpyak O.G., Galyautdinov Z.R., Kokorin D.N. *Prochnost i deformativnost zhelezobetonnykh konstruksiy na podatlivykh oporakh pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении* [Strength and deformability of reinforced concrete structures on compliant supports at short-term dynamic loading] Tomsk, Tomsk State university of architecture and building Press, 2016. 272 p.
- Ozbolt J., Sharma A., Irhan B. Tensile behavior of concrete under high loading rates. *Int. J. of Impact Eng.*, 2014, vol. 69, no. 5, pp. 55–68.
- Kim J.H., Kim D., Han Heung Nam. Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels. *Materials Science & Engineering A*, 2013, no. 559, pp. 222–231.
- Shang, S., Song Y. Dynamic biaxial tensile-compressive strength and failure criterion of plain concrete. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 40, no. 2, pp. 322–329.
- Kumpyak O.G., Kopanitsa D.G. *Prochnost i deformativnost zhelezobetonnykh sooruzheniy pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении* [Strength and deformability of concrete structures with short-term dynamic loading]. Northhampton; Tomsk, STT Publ. house, 2002. 336 p.
- Chiaia B., Kumpyak O., Placidi L. Experimental analysis and modeling of two-way reinforced concrete slabs over different kinds of yielding supports under short-term dynamic loading. *Engineering Structures*, 2015, no. 96, pp. 88–99.
- Chen X., Wu S., Zhou J. Experimental and modeling study of dynamic mechanical properties of cement paste, mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 47, pp. 419–430.
- Asprone D., Cadoni E., Prota A. Experimental analysis of tensile dynamic behavior of existing concrete under high strain rates. *ACI Structural Journal*, 2009, vol. 106, no. 1, pp. 106–113.
- Yan D., Lin G. Dynamic properties of concrete in direct tension. *Cement and concrete research*, 2006, no. 36, pp. 1371–1378.
- 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.
- 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.
- Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu., Tigay O.Yu., Odnokopylova O.A. *Ustanovka dlya eksperimentalnykh isledovaniy stroitelnykh konstruksiy* [Installation for experimental investigations of building constructions]. Patent RF, no. 66534, 2007.
- Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu., Tigay O.Yu., Ismailov G.M. *Tenzometricheskoe ustroystvo dlya izmereniya deformatsiy betona zhelezobetonnykh konstruksiy* [Strain gauge device for measuring deformation of concrete reinforced concrete structures]. Patent RF, no. 76118, 2008.
- 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 deformation of reinforcement in reinforced concrete structures]. Patent RF, no. 76117, 2008.

16. Plevkov V.S., Odnokopylov G.I., Sarkisov D.Yu., Tigay O.Yu. *Stend dlya ispytaniya zhelezobetonnykh elementov na odnokratnoe kratkovremennoe dinamicheskoe vozdeystvie* [Stand for testing concrete elements for single short-term dynamic effects]. Patent RF, no. 76133, 2008.
17. Plevkov V.S., Radchenko A.V., Goncharov M.E., Radchenko P.A. Eksperimentalnye i chislennye issledovaniya prochnosti stykov zhelezobetonnykh kolon pri kratkovremennom dinamicheskom nagruzhении [Experimental and numerical studies of strength of joints of reinforced concrete columns with short-term dynamic loading]. *Earthquake engineering. Constructions safety*, 2014, no. 3, pp. 37–41.
18. Goncharov M.E. Issledovanie prochnosti zhelezobetonnykh kolon i ikh stykov s uchedom prostranstvennoy raboty zdany [Researching strength of concrete columns and their joints considering spatial work of buildings]. *Sbornik nauchnykh trudov XII Mezhdunarodnoy konferentsii studentov i molodykh uchenykh* [Proc. of the XII International conference of students and young scientists]. Tomsk, 2015. pp. 1269–1271.
19. Plevkov V.S., Goncharov M.E. Features of joints of precast concrete columns with short-term dynamic loading. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, 2014, no. 3, pp. 62–67. In Rus.
20. Geniev G.A. O vliyaniy prodlzhitelnosti deystviya nagruzki na prochnost materiala [Effect of duration of load action on material strength]. *Concrete and reinforced concrete*, 1996, no. 4, pp. 19–22.
21. Popov N.N., Kumpyak O.G., Plevkov V.S. *Voprosy dinamicheskogo rascheta zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Issues of dynamic analysis of reinforced concrete structures]. Tomsk, Tomsk University Press, 1990. 288 p.
22. Plevkov V.S. *Dinamicheskaya prochnost betona i armatury zhelezobetonnykh konstruktsiy* [Dynamic strength of concrete and rebar reinforced concrete structures]. Tomsk, Tomsk State university of architecture and building Press, 1996. 64 p.

Received: 14 March 2017.

Information about the authors

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

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