

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2020, №1, Том 12 / 2020, No 1, Vol 12 <https://esj.today/issue-1-2020.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/56SAVN120.pdf>

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Стельмах С.А., Щербань Е.М. Сравнение стойкости к ударным нагрузкам опытных образцов вибрированного и центрифугированного тяжелого бетона // Вестник Евразийской науки, 2020 №1, <https://esj.today/PDF/56SAVN120.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

**For citation:**

Stel'makh S.A., Shcherban' E.M. (2020). Comparison of resistance to shock loads of experimental samples vibrated and centrifuged heavy concrete. *The Eurasian Scientific Journal*, [online] 1(12). Available at: <https://esj.today/PDF/56SAVN120.pdf> (in Russian)

УДК 691

ГРНТИ 67.09.33

**Стельмах Сергей Анатольевич**

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия  
Доцент кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты»  
Кандидат технических наук, доцент  
E-mail: [sergej.stelmax@mail.ru](mailto:sergej.stelmax@mail.ru)

**Щербань Евгений Михайлович**

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Россия  
Доцент кафедры «Инженерная геология, основания и фундаменты»  
Кандидат технических наук  
E-mail: [au-geen@mail.ru](mailto:au-geen@mail.ru)

## **Сравнение стойкости к ударным нагрузкам опытных образцов вибрированного и центрифугированного тяжелого бетона**

**Аннотация.** Поведение бетона при ударных нагрузках, особенно при сочетании удара с такими воздействиями внешней среды, как увлажнение и высушивание, а также замораживание и оттаивание, представляет большой практический интерес. Это требует разработки практических рекомендаций по повышению долговечности таких конструкций с учетом совокупного воздействия внешних факторов, включающих ударное воздействие. Решение такой задачи возможно на основе поиска общих закономерностей процесса разрушения, с учетом которых можно будет предложить конструктивные и технологические решения поставленной задачи. Рядом исследователей установлено, что повышение ударной прочности бетона может быть обеспечено путем рационального подбора компонентов бетона, обеспечивающих наиболее выгодное для бетона сочетание упругих и неупругих свойств и, в частности, использованием разномодульных заполнителей. Проведен ряд экспериментальных исследований, целью которых явилось выявление зависимости стойкости к ударным воздействиям от технологии получения таких бетонов. При этом проверялось также влияние исходного состава, запроектированного под определенный класс бетона по номинальному ряду. В результате проведенной работы – анализа литературных источников, а также по полученным экспериментальным данным, был сделан вывод о влиянии технологии изготовления на стойкость бетона к ударным воздействиям, на примере трех исследованных классов, а именно, превосходство центрифугирования над вибрированием. При надлежащем рецептурно-технологическом обеспечении качества производственного процесса

целесообразно применение получаемых конструкций из центрифугированного бетона в гидротехнических и транспортных сооружениях, таких как опоры мостов, эстакад, а также для изготовления забивных свай.

#### **Вклад авторов.**

Стельмах Сергей Анатольевич – автор осуществил написание статьи.

Щербань Евгений Михайлович – автор одобрил окончательную версию статьи перед ее подачей на публикацию.

**Ключевые слова:** тяжелый бетон; компоненты бетонной смеси заполнители; технология изготовления; вибрирование; центрифугирование; ударные воздействия

При эксплуатации различных инженерных сооружений отдельные его конструкции зачастую подвергаются случайным или периодически повторяющимся ударным нагрузкам. Особенно часто это наблюдается в гидротехнических и транспортных сооружениях. Причальные стенки, опоры мостов, элементы водозабора подвергаются ударам судов, льдин. В штормовую погоду на море или водохранилище сильное ударное воздействие оказывают волны, кинетическая энергия которых сопоставима с энергией взрывной волны. В связи с этим поведение бетона при ударных нагрузках, особенно при сочетании удара с такими воздействиями внешней среды, как увлажнение и высушивание, а также замораживание и оттаивание, представляет большой практический интерес. Это требует разработки практических рекомендаций по повышению долговечности таких конструкций с учетом совокупного воздействия внешних факторов, включающих ударное воздействие. Решение такой задачи возможно на основе поиска общих закономерностей процесса разрушения, с учетом которых можно будет предложить конструктивные и технологические решения поставленной задачи.

Удар относится к кратковременному виду циклических воздействий. Разрушение материала при ударе происходит вследствие циклического воздействия уплотненного «ядра» в направлении, перпендикулярном действию ударной нагрузки [1; 2].

Согласно опытным данным [2], развитие остаточных деформаций при ударных нагрузках с ростом количества ударов происходит непрерывно у всех испытываемых материалов: горных пород, цементного камня, цементно-песчаного раствора и бетона. Таким образом, и при ударном воздействии внешние признаки разрушения аналогичны вышерассмотренным циклическим механическим воздействиям. Следовательно, удар можно отнести к усталостному разрушению при кратковременных циклах.

Опыты, специально поставленные в [2] по оценке влияния ударного воздействия на развитие остаточных деформаций, изменение динамического модуля упругости и коэффициента внутреннего трения проводились на бетонных образцах. В качестве заполнителей использовались трахилиппарит, мрамор, диабазопорфирит, известняк, в качестве вяжущего – сульфатостойкий и бездобавочный портландцементы, а также шлакопортландцемент.

Испытание бетонных образцов показало, что первоначальные значения динамического модуля упругости бетонов возрастают по мере роста прочности и упругости зерен крупного заполнителя и с повышением расхода цемента.

Опыты показали, что первоначальные значения коэффициента внутреннего трения выше у менее упругих бетонов на менее прочных заполнителях, но с большими значениями коэффициента внутреннего трения. При этом также установлено, что характер изменения

коэффициента внутреннего трения различен и темп роста тем выше, чем ниже начальное его значение. Такой характер изменения коэффициента внутреннего трения показывает, что разрушение происходит тем быстрее, чем меньшая часть энергии удара расходуется на внутреннее трение и не участвует в разрушении образца, а большая ее часть при каждом соударении расходуется на разрушение материала.

Таким образом, коэффициент внутреннего трения характеризует величину той части энергии удара, которая поглощается материалом при каждом соударении и не участвует в его разрушении.

Темп роста  $\Delta\gamma/\gamma$  значительно превышает скорость изменения  $\Delta E/E$ . Следовательно, оценку деформативности и ударной прочности предпочтительнее производить по их неупругой характеристике  $\gamma$ , но и с одновременным учетом упругих свойств материала.

Следует обратить также внимание на то, что ударная прочность зависит также и от свойств крупного заполнителя и в первую очередь от его поглощающей способности: чем она выше, тем большая часть энергии поглощается им и меньше приходится на долю раствора [1–3].

В целом по результатам опытов установлено:

Коэффициент внутреннего трения цементного камня повышается с увеличением водоцементного отношения, но не зависит от вида цемента и его прочности.

Испытания растворов различных составов и пластичности показали, что начальные значения коэффициента внутреннего трения возрастают пропорционально снижению статической прочности образцов, вызванному повышением пластичности смеси и увеличением расхода песка.

При исследовании пород крупного заполнителя установлено, что упругость прямо, а неупругость щебня обратно пропорциональна статической прочности образцов и изменяется в достаточно широких пределах. Наибольшим внутренним трением обладает известняк, а наименьшим – диабазопорфирит.

Испытание бетонов из малоподвижных и подвижных смесей с различными заполнителями позволили установить ряд закономерностей.

Неупругость практически не зависит от вида цемента в случае твердения бетонов в нормальных условиях у образцов длительного хранения. Некоторое понижение неупругости отмечено у бетонов на шлакопортландцементе, по сравнению с образцами на портландцементе после пропаривания.

Наибольшее значение коэффициента внутреннего трения отмечено у пропаренных образцов, наименьшее у образцов длительного твердения.

Коэффициент внутреннего трения не зависит от крупности песка, но возрастает с уменьшением расхода цемента и повышением подвижности бетонной смеси.

При прочих равных условиях неупругость бетона выше на известняковом щебне по сравнению с бетонами на других заполнителях.

Применение заполнителей с высоким коэффициентом внутреннего трения, даже менее прочных, ведет к повышению общей неупругости бетона и в результате повышению сопротивляемости действию удара.

При выборе состава наряду с соблюдением общих принципов выбора рационального состава необходимо устанавливать оптимальное соотношение между цементом и песком, при котором ударная прочность бетона будет наибольшей.

В связи с этим повышение ударной прочности бетона может быть обеспечено путем рационального подбора компонентов бетона, обеспечивающих наиболее выгодное для бетона сочетание упругих и неупругих свойств и, в частности, использованием разномодульных заполнителей.

Особенно важным выводом является указание на полезность применения заполнителей с высоким коэффициентом внутреннего трения, даже менее прочных. Это ведет к повышению общей неупругости бетона и, как следствие, к повышению его ударной стойкости [2].

Важным значением для познания сущности такого процесса являются результаты исследований [4], в которые установлено, что внутреннее трение (поглощающаяся способность твердых тел) является важнейшим динамическим свойством материала. Как показали исследования других авторов, и не только динамических [5; 6].

Благодаря внутреннему трению происходит быстрое затухание свободных колебаний конструкций при резонансном снижении напряжений от импульсов и ударов в конструкциях с большим числом степеней свободы, выравнивание статических напряжений в местах их концентрации, т. е. явление, которое обычно называют релаксацией напряжений. Все это позволяет использовать эти представления для оценки сопротивляемости бетона по отношению и к другим воздействиям, связанным с появлением напряжений в структуре бетона [7; 8].

Первоначальные значения динамического модуля упругости бетонов пропорциональны прочности и упругости зерен крупного заполнителя. С увеличением нагрузок вначале наблюдается небольшое, а затем (перед разрушением) более заметное уменьшение величин  $E$ . Следует отметить, что это изменение выражено более явно при попеременном замораживании и оттаивании, чем при ударе. Однако относительное падение значения динамического модуля упругости примерно одинаково для обоих видов бетонов при испытании на удар и на морозостойкость.

Первоначальные значения коэффициента внутреннего трения (КВТ) бетонов определяются величинами коэффициента внутреннего трения заполнителей. Действие циклической нагрузки сопровождается увеличением значений коэффициента внутреннего трения бетона для всех исследуемых образцов. Относительное возрастание КВТ к моменту разрушения образцов при испытании их на морозостойкость значительно превышает эту же величину при ударе. Степень изменения КВТ при ударном воздействии определяется составом бетонов и обратно пропорциональна начальным значениям КВТ. При испытании на морозостойкость степень изменения КВТ мало зависит от состава и практически одинакова для обоих составов бетонов.

Сравнение величин остаточных деформаций образцов в предразрушающей стадии испытаний показывает, что удар вызывает значительно меньшие остаточные деформации, чем попеременное замораживание и оттаивание. Темп роста деформаций в случае испытания на морозостойкость аналогичен для бетонов обоих составов, а при ударе тем выше, чем больше первоначальная неупругость бетона. Это объясняется тем, что начальный коэффициент внутреннего трения характеризует величину той части энергии, которая не участвует в разрушении бетона.

В целом следует отметить, что попеременное замораживание и оттаивание оказывает значительно большее влияние на изменение  $E$ ,  $\gamma$  и  $\epsilon_{ост}$ , чем удар. Отмеченный характер изменения таких характеристик, по нашему мнению, объясняется тем, что при ударе происходит локальное разрушение образца в результате образования магистральных трещин. При попеременном же замораживании и оттаивании процесс трещинообразования охватывает вначале поверхностный слой образца с постепенным его распространением вглубь. В данном

случае имеет место непрерывное насыщение материала трещинами, которые постепенно разрыхляя материал, вызывают его объемное разрушение.

Исходя из изложенного следует, что упругие и неупругие свойства материала являются важнейшими при оценке его стойкости к удару, а также другим видам циклических воздействий. При этом неупругость следует понимать не как вязко-пластичность, а как способность материала поглощать часть энергии внешнего воздействия. Потеря энергии в этом случае происходит за счет внутреннего трения и связана с необратимостью энергетических процессов перехода механической энергии в тепло при нарушении термодинамического равновесия в деформируемом материале [1; 9; 10].

Авторами был проведен ряд экспериментальных исследований, целью которых явилось выявление зависимости стойкости к ударным воздействиям от технологии получения таких бетонов. При этом проверялось также влияние исходного состава, запроектированного под определенный класс бетона по номинальному ряду [11–15].

Для выполнения программы экспериментальных исследований были приняты:

- щебень гранитный;
- песок кварцевый;
- портландцемент.

Экспериментальная методика определения стойкости к ударным воздействиям включала изготовление образцов и испытание их на автоматическом лабораторном копре. Форма исследуемых образцов принята кубической, размер ребра был принят равным 5 см.

1-я серия образцов-кубов выпилены из образца кольцевого сечения, полученного методом центрифугирования (рисунок 1а).

2-я серия образцов-кубов получена методом вибрирования бетонной смеси на виброплощадке (рисунок 1б).



а



б

*Рисунок 1. Общий вид изготовленных опытных образцов:  
а – центрифугированных, б – вибрированных (составлено авторами)*

Для достоверного установления исследуемого влияния исходные компоненты бетонной смеси, а также условия проведения экспериментов принимались одинаковыми для образцов, изготавливаемых по обоим видам технологий.

Составы бетона подбирались в соответствии с ГОСТ 27006-86.

Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований, представлены в таблицах 1–3 и на рисунке 2.

**Таблица 1**

**Результаты испытаний опытных образцов на экспериментальном составе В20**

№ п/п	Вид технологии	Количество ударов до разрушения
1	Вибрирование	423
2	Центрифугирование	476

*Составлено авторами*

**Таблица 2**

**Результаты испытаний опытных образцов на экспериментальном составе В30**

№ п/п	Вид технологии	Количество ударов до разрушения
1	Вибрирование	567
2	Центрифугирование	681

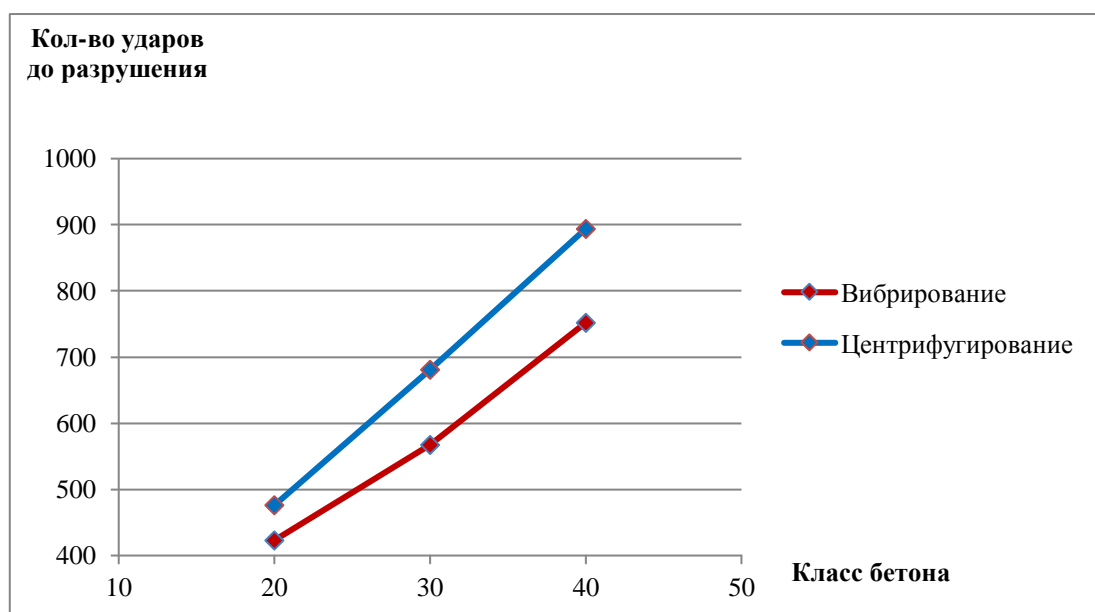
*Составлено авторами*

**Таблица 3**

**Результаты испытаний опытных образцов на экспериментальном составе В40**

№ п/п	Вид технологии	Количество ударов до разрушения
1	Вибрирование	752
2	Центрифугирование	894

*Составлено авторами*



**Рисунок 2.** Результаты экспериментальных исследований (составлено авторами)

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы.

Технология изготовления образца при прочих равных условиях оказывает влияние на его характеристики.

Центробежно уплотненный бетон в целом продемонстрировал лучшие показатели по сравнению с виброуплотненным.

При этом была выявлена следующая тенденция: при повышении класса исследуемого состава повышался прирост показателя стойкости к ударным воздействиям центрифугированных образцов в сравнении с вибрированными.

Таким образом, в результате проведенной работы – анализа литературных источников, а также по полученным экспериментальным данным, был сделан вывод о влиянии технологии изготовления на стойкость бетона к ударным воздействиям, на примере 3 исследованных классов, а именно, превосходство центрифугирования над вибрированием.

Объяснить такие результаты можно тем, что количество ударов до разрушения в соответствии с усталостной природой разрушения в условиях многократных повторных воздействий будет связано с относительным уровнем динамических напряжений в бетоне в момент удара и увязывается с этой характеристикой, а также с коэффициентами динамического упрочнения и выносливости. Очевидно, что повышение ударной выносливости бетона от некоторого уровня до более высокого уровня возможно на основе специальных рецептурно-технологических приемов. Простейшим приемом повышения ударной стойкости будет повышение статической прочности бетона. Увеличению прочности бетона сопутствует повышение динамического модуля упругости, который оказывает влияние на величину динамического напряжения при нагружении свободно падающим грузом. Другие варианты бетонов повышенной ударостойкости – это бетоны с принципиально иной структурой и, в частности, дисперсно-армированные бетоны, полимербетоны, бетоны на основе демпфирующих добавок, обеспечивающие повышение ударной стойкости без существенного увеличения статической прочности [16]. Бетоны же центрифугированные, изготовленные в лабораторных условиях также имеют иную структуру, за счет рационального перераспределения компонентов бетонной смеси при надлежащем соблюдении технологии [11; 12]. В свою очередь, с повышением класса центрифугированного бетона, усиливается и влияние отмеченного выше фактора повышенной статической прочности бетона, что и наблюдается в виде увеличения стойкости центрифугированного бетона к ударному воздействию при увеличении показателя прочности.

Следует отметить, что при надлежащем рецептурно-технологическом обеспечении качества производственного процесса целесообразно применение получаемых конструкций из центрифугированного бетона в гидротехнических и транспортных сооружениях, таких как опоры мостов, эстакад, а также для изготовления забивных свай.

Полученные результаты свидетельствуют об актуальности дальнейших исследований в данном направлении, а именно, проведении серии экспериментов для выявления и сравнения влияния различных факторов на стойкость к ударным воздействиям вибрированных и центрифугированных бетонов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Невский В.А. Усталость и деформативность бетона. М.: Вузовская книга, 2012. 264 с.
2. Пискунов Ю.А. Исследование реологических свойств бетонов при ударных воздействиях: дис. ... канд. техн. наук. Ростов н/Д: РИСИ, 1970. С. 177.
3. Стельмах С.А., Щербань Е.М., Сердюков К.В., Пестриков М.М., Яновская А.В. Влияние некоторых характеристик применяемого крупного заполнителя на свойства тяжелого бетона, предназначенного для изготовления центрифугированных изделий и конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. № 10. С. 15–20.
4. Сорокин Е.С. К теории внутреннего трения при колебаниях упругих систем. М.: Гос. изд-во лит-ры по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. 130 с.
5. Дудин В.Ф., Невский В.А., Пискунов Ю.А. Влияние циклических нагрузок на упругость и неупругость бетонов // Гидротехническое строительство. 1970. № 5.
6. Дудин В.Ф., Невский В.А., Пискунов Ю.А. Влияние неупругости бетонов на сопротивляемость ударным нагрузкам // Бетон и железобетон. 1969. № 8.
7. Pooya Alaei, Bing Li. High-strength concrete exterior beam-column joints with high-yield strength steel reinforcements. *Engineering Structures*. 2017. Vol. 145. Pp. 305–321.
8. Mohamed K. Ismail, Assem A.A. Hassan. An experimental study on flexural behaviour of large-scale concrete beams incorporating crumb rubber and steel fibres. *Engineering Structures*. 2017. Vol. 145. Pp. 97–108.
9. Каранфилов Т.С., Волков Ю.С. Обзор исследований по прочности и деформативности бетона при многократном воздействии нагрузки // Труды Гидропроекта. 1963. № 10.
10. Амбарцумян А.Р. К исследованию закона деформирования бетона при его скоростном и кратковременном нагружении // Вестник ВИА. 1963. № 143.
11. Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Холодняк М.Г., Щербань Е.М., Халюшев А.К. Влияние технологии производства на структурообразование и свойства бетона виброцентрифугированных колонн // Строительство и архитектура. 2017. Том 5. Выпуск 4 (17). С. 224–228.
12. Маилян Л.Р., Стельмах С.А., Холодняк М.Г., Щербань Е.М. Выбор состава центрифугированного бетона на тяжелых заполнителях // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2017. №10. С. 52–57.
13. Shuyskiy A.I., Stel'makh S.A., Shcherban' E.M., Kholodnyak M.G. Investigation of the Influence of the Initial Composition of Heavy Concrete Designed for the Manufacture of Ring-Section Products on its Properties. *Materials Science Forum*. 2018. V. 931 P. 508–514.
14. Парфенов А.В. Ударная выносливость бетонов на основе стальной и синтетической фибры: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа: УГНТУ, 2004. 20 с.



**Stel'makh Sergei Anatol'evich**

Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia  
E-mail: sergej.stelmax@mail.ru

**Shcherban' Evgenii Mikhailovich**

Don state technical university, Rostov-on-Don, Russia  
E-mail: au-geen@mail.ru

## **Comparison of resistance to shock loads of experimental samples vibrated and centrifuged heavy concrete**

**Abstract.** The behavior of concrete under shock loads, especially when combining an impact with such environmental effects as moistening and drying, as well as freezing and thawing, is of great practical interest. This requires the development of practical recommendations to improve the durability of such structures, taking into account the cumulative effects of external factors, including shock. The solution of such a task is possible on the basis of a search for general laws of the process of destruction, taking into account which it will be possible to propose constructive and technological solutions to the problem. A number of researchers have established that increasing the impact strength of concrete can be achieved by rational selection of concrete components that provide the most favorable combination of elastic and inelastic properties for concrete and, in particular, using multi-modular aggregates. A number of experimental studies were carried out, the purpose of which was to reveal the dependence of the resistance to shock effects on the technology for producing such concretes. At the same time, the influence of the initial composition, designed for a certain class of concrete in the nominal row, was also checked. Because of the work done – analysis of literary sources, as well as from the experimental data obtained, a conclusion was made about the impact of manufacturing technology on the resistance of concrete to shocks, using the example of 3 classes studied, namely, the superiority of centrifugation over vibration. With proper prescription and technological quality assurance of the production process, it is advisable to use the resulting centrifuged concrete structures in hydraulic and transport structures, such as bridge supports, overpasses, as well as for the manufacture of driven piles.

**Keywords:** heavy concrete; shock effects; concrete mix components; placeholders; manufacturing technology; vibrating; centrifugation