

## Энергосиловая модель разрушения железобетонных изделий рабочими органами машин

Д.В. Фурманов, Т.А. Краснобаев

Ярославский Государственный Технический Университет, Ярославль, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** В статье рассматривается подход для описания рабочего процесса оборудования статического действия для разрушения железобетонных изделий. Несмотря на широкое распространение машин такого типа в строительной отрасли, их конструктивные и технологические параметры до сих пор остаются теоретически не обоснованными. Отмечается, что по отдельности, ни один из существующих подходов к оценке структурно-прочностных свойств бетона не достаточен для описания рабочего процесса разрушения его рабочими органами машин.

**Цель работы.** В работе решается задача обоснования расчётной модели для наиболее полного описания рабочего процесса оборудования статического действия для разрушения железобетонных изделий.

**Методы.** Предлагается гипотеза для описания рабочего процесса разрушения бетона на основе механики хрупкого разрушения и феноменологических теорий прочности. Верификация предлагаемой гипотезы проводилась путём сравнения расчётной модели, выполненной методом конечных элементов, с результатами эксперимента по разрушению бетонных образцов различной прочности, штампами.

**Результаты.** По результатам проведённого исследования были получены экспериментальные и теоретические зависимости усилия необходимого для разрушения образцов различной прочности. Сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований позволяет сделать вывод о том, что предлагаемая гипотеза позволяет найти решение для задач разрушения бетона рабочими органами машин.

**Заключение.** Результаты, полученные в ходе проведённой работы, могут быть использованы для аналитического решения задач, связанных как с проектированием оборудования статического действия, так и оборудования динамического действия. Используемый подход также может быть применён для других материалов, имеющих хрупкий характер разрушения под воздействием рабочих органов машин.

**Ключевые слова:** железобетонные изделия; оборудование статического действия; механика разрушения; хрупкое разрушение.

### КАК ЦИТИРОВАТЬ:

Фурманов Д.В., Краснобаев Т.А. Энергосиловая модель разрушения железобетонных изделий рабочими органами машин // Тракторы и сельхозмашины. 2025. Т. 92, № 3. С. **x-y**. DOI: 10.17816/0321-4443-633638 EDN: OFVOSM

Рукопись получена: 21.06.2024    Рукопись одобрена: 22.06.2025    Опубликована online: 22.06.2025

## The Energy-force model of destruction of reinforced concrete products by machine working bodies

Denis V. Furmanov, Timofey A. Krasnobaev

Yaroslavl State Technical University (YSTU), Yaroslavl, Russia

### ABSTRACT

**BACKGROUND:** The paper considers an approach to describe the working process of static action equipment for the destruction of reinforced concrete products. Despite the widespread use of machines of this type in the construction industry, their design and technological parameters still remain theoretically unsubstantiated. It is noted that individually none of the existing approaches, to the assessment of structural and strength properties of concrete, is not sufficient individually to describe the working process of its destruction by the working bodies of machines.

**AIM:** Justification of the calculation model for the most comprehensive description of the working process of static action equipment for the destruction of reinforced concrete products.

**MATERIALS AND METHODS:** A hypothesis to describe the working process of concrete destruction on the basis of brittle fracture mechanics and phenomenological theories of strength is proposed. Verification of the proposed hypothesis was carried out by comparing the computational model, performed by the finite element method, with the results of the experiment on the fracture of concrete specimens of different strength, by stamps.

**RESULTS:** Experimental and theoretical dependences of the force required to fracture the samples of different strength were obtained based on the study results. Comparison of the results of theoretical and experimental studies makes it possible to conclude that the proposed hypothesis is helpful to find a solution for the problems of concrete destruction by machine working bodies.

**CONCLUSION:** The results obtained during this study can be used for analytical solution of problems associated with the design of both static-action and dynamic-action equipment. The used approach can also be applied to other materials with brittle fracture behavior under the impact of the working bodies of machines.

**Keywords:** reinforced concrete products; static action equipment; fracture mechanics; brittle fracture.

### TO CITE THIS ARTICLE:

Furmanov DV, Krasnobaev TA. The Energy-force model of destruction of reinforced concrete products by machine working bodies. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2025;92(3):x-y. DOI: 10.17816/0321-4443-633638 EDN: OFVOSM

Submitted: 21.06.2024

Accepted: 22.06.2025

Published online: 22.06.2025

**ОБОСНОВАНИЕ**

В настоящее время, железобетон является основным материалом промышленного и гражданского строительства за счёт своей большой несущей способности и невысокой цены при изготовлении, эксплуатации и утилизации, по сравнению с другими композитными материалами. Из железобетона изготавливают основные элементы зданий и сооружений, такие как плиты перекрытия, фундаментные основания, стеновые панели и многие другие. Потребность в разрушении железобетонных изделий (ЖБИ) может возникнуть на любом этапе жизненного цикла сооружения, будь то формирование фундамента, реконструкция отдельных частей, или полная утилизация в конце срока службы.

Для решения задач, связанных с разрушением ЖБИ, широко применяются различные типы машин и оборудования статического действия. Условно, его подразделяют на специальное, т.е. предназначенное для узкого спектра технологических задач, например, оборудование для срезания оголовков железобетонных свай, утилизации железобетонных шпал и т.п. и универсальное, применяемое в широком спектре технологических операций. К последнему относят как навесное оборудование: гидрожницы, механические и гидравлические измельчители и мультипроцессоры, так и различный ручной инструмент: гидроклин и гидравлические клещи. Все вышеперечисленные типы оборудования весьма широко востребованы в строительной отрасли. Рынок на сегодняшний день переполнен различными моделями как от зарубежных, так и от отечественных производителей.

Однако, проектирование этих машин, на сегодняшний день затруднено. Поскольку теоретической базы для обоснования их параметров в открытых источниках не существует, то рациональность параметров, подобранных под конкретные типы задач, определяется зачастую только опытным путём.

В этой связи параметры режущих элементов, их количество и расположение на рабочем оборудовании подбираются интуитивно, либо копируются уже имеющиеся конструктивные решения. Что же касается разрушающего усилия, то зачастую во многие конструкции на этапе проектирования закладываются большие запасы по его величине. В результате это приводит к тому, что оборудование приобретает большие габаритные размеры и массу, а вместе с тем и необходимость использовать более дорогие базовые машины с большей грузоподъёмностью. Это, в свою очередь, приводит к необоснованно высоким экономическим затратам, которых можно было бы избежать еще на этапе проектирования.

Современные исследования в области расчёта параметров оборудования для разрушения ЖБИ опираются по большей части на корреляционно-регрессионный анализ статистических данных технических характеристик уже имеющегося оборудования [1-3]. Использование такого подхода для обоснования параметров оборудования для разрушения ЖБИ, имеет ряд недостатков, свойственных любому статистическому анализу.

Во-первых, при выборе моделей оборудования для анализа учитывается как позитивный, так и негативный опыт, полученный в результате проектирования. В общем массиве данных технических характеристик машин, анализируемом для выведения разного рода зависимостей, нет возможности учесть спрос на ту или иную модель, что в итоге отрицательно сказывается на достоверности получаемых уравнений регрессии. Во-вторых, при таком подходе, отсутствует возможность теоретического анализа рабочего процесса рассматриваемого оборудования, в связи с чем невозможно оценить влияние различных конструктивных решений на эффективность выполнения конкретных задач.

Целесообразно начинать обоснование параметров оборудования с объекта разрушения и его характеристик. ЖБИ с точки зрения структурно-прочностных свойств, наиболее удобно рассматривать как систему, состоящую из бетонной матрицы с удерживающим её стальным каркасом. Бетонную матрицу следует рассматривать как гомогенную среду с постоянными прочностными и деформационными свойствами.

Наиболее часто для бетона, оценка напряжённо-деформированного состояния при различных видах нагружения производится с применением феноменологических теорий прочности. В рамках таких теорий исследователями предлагаются различные гипотезы прочности [4,5], которые графически представляются поверхностью предельного состояния различной формы, расположенной в пространстве главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ .

Проблемой использования данного подхода при решении задач, связанных с разрушением бетона рабочими органами машин, является то, что процесс разрушения в них представляется как мгновенный и связывается с выходом суммарного вектора возникающих напряжений за границы

поверхности предельного состояния. Так как данное условие зачастую выполняется только в зоне контакта режущего элемента с материалом, то такой подход не позволяет полностью оценить объёмное разрушение материала с формированием хрупких мезотрещин и, возможных, магистральных трещин. Значения напряжений в материале за пределами контактной зоны значительно ниже. Разрушение материала в зоне контакта с режущим элементом будет являться источником только первоначальной, зарождающейся трещины.

Для решения задачи определения момента разрушения материала в объёме воспользуемся одним из следствий механики хрупкого разрушения, основные положения которой были заложены Аланом Гриффитсом [6], а затем доработаны Эгоном Орованом [7]. Исследуя процесс образования и распространения трещин в материале под действием нагрузки, Орован пришёл к выводу, что предельное состояние материала можно описать следующей формулой:

$$\sigma_p = \sqrt{\frac{E \cdot G_c}{\pi \cdot a_{кр}}}, \quad (1)$$

где  $G_c$  — вязкость разрушения, Дж/м<sup>2</sup>;  $E$  — модуль упругости, ГПа;  $a_{кр}$  — критическая длина трещины, м.

Однако данная теория также не лишена недостатков, указанный подход хорошо описывает закономерности развития трещин, но никак не указывает на механизм их зарождения, без первоначального дефекта теория не работает.

Учитывая достоинства и недостатки каждого из подходов, можно прийти к выводу, что наиболее точно задача разрушения ЖБИ рабочими органами машин может быть решена на основе учета особенностей свойств и структуры материала одновременно с позиции механики хрупкого разрушения и феноменологических теорий прочности.

## ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является обоснование расчётной модели для наиболее полного описания рабочего процесса оборудования статического действия для разрушения железобетонных изделий.

## МЕТОДЫ

С помощью проведённого анализа современных подходов к оценке прочностных характеристик бетона с различных точек зрения, была сформулирована гипотеза о необходимых и достаточных условиях, для полного разрушения материала по действием режущего элемента:

- напряжения в зоне контакта должны превышать предел прочности бетона.
- энергии упругих деформаций, накопленной в объёме материала в результате воздействия режущего элемента, должно быть достаточно, чтобы преодолеть вязкость разрушения материала и образовать магистральные трещины с образованием новых поверхностей. Предполагается, что размеры будущих трещин известны.

Данные условия можно записать в виде следующей системы:

$$\begin{cases} \sigma_{экс} \geq \sigma_{вр} \\ E_{упр} \geq G_c \cdot S' \end{cases} \quad (2)$$

где  $\sigma_{экс}$  — значения напряжений, в месте контакта реза с материалом, МПа.,  $\sigma_{вр}$  — предел прочности бетона, МПа.,  $E_{упр}$  — энергия упругих деформаций, Дж,  $S'$  — суммарная площадь образовавшихся магистральных трещин, м<sup>2</sup>.

Учитывая особенности каждого из подходов, при рассмотрении процесса разрушения материала с точки зрения предлагаемой гипотезы возможны следующие варианты, представленные на схеме на рис. 1.

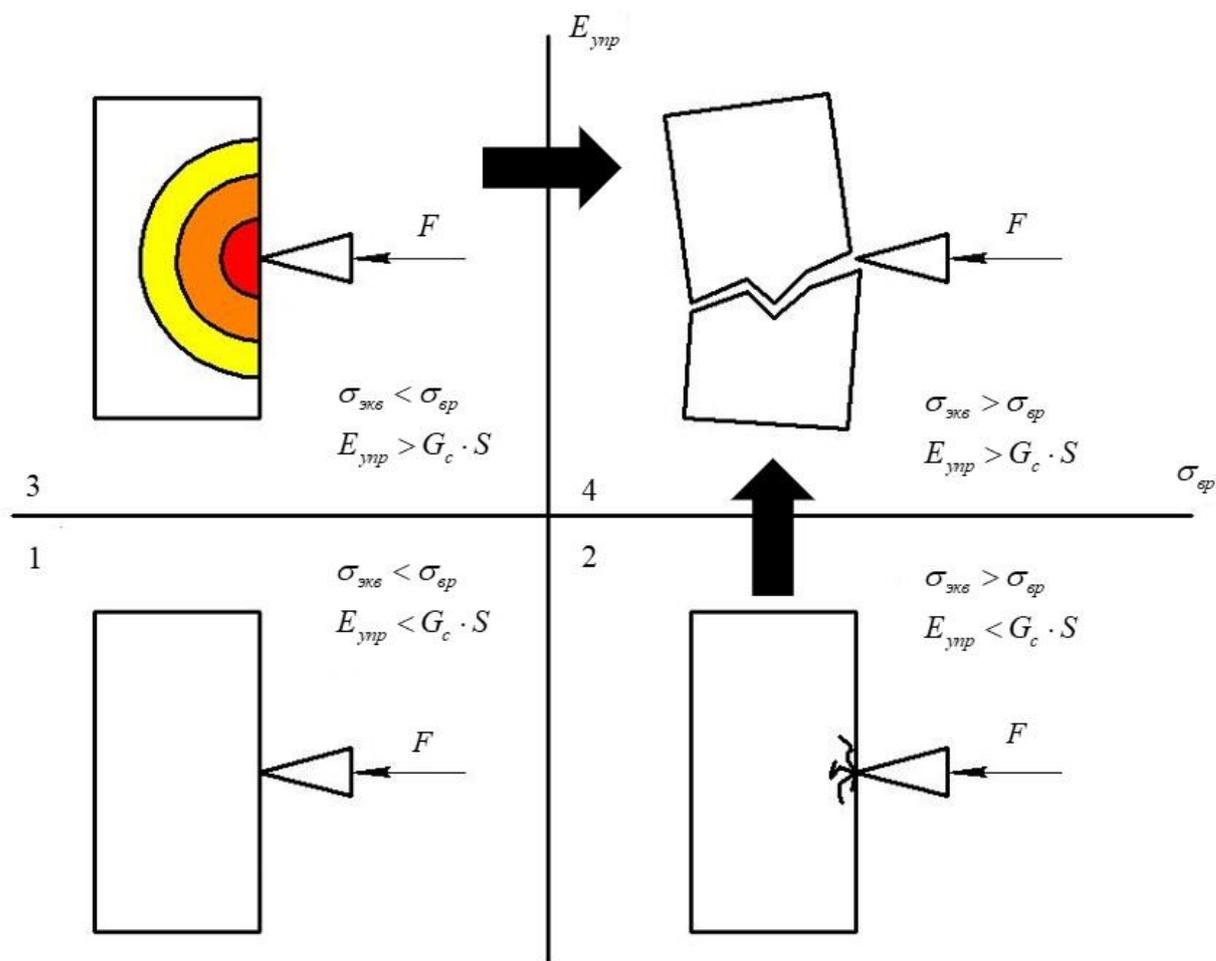


Рис. 1. Декомпозиция рабочего процесса разрушения бетона с точки зрения предлагаемой гипотезы.

Fig. 1. Decomposition of the working process of concrete fracturing in terms of the proposed hypothesis.

1. Прикладываемое к материалу усилие от режущего элемента, не вызывает ни достаточной величины напряжений, для зарождения трещины, ни достаточной величины энергии упругих деформаций, для полного разрушения материала.
2. Предельные значения напряжений достигаются раньше, чем предельные значения энергии. Прикладываемое усилие вызывает поверхностные трещины, однако из-за недостатка сконцентрированной энергии упругих деформаций полноценное разрушение невозможно. С дальнейшим увеличением усилия будет увеличиваться и количество накопленной энергии, что приведёт к разрушению материала.
3. Предельные значения энергии достигаются раньше, чем предельные значения напряжений. Прикладываемое усилие вызывает высокую концентрацию энергии упругих деформаций в материале, которой достаточно для его полного разрушения, однако структурная прочность сохраняется. При появлении первых, относительно небольших поверхностных трещин происходит высвобождение накопленной энергии и мгновенное (взрывоподобное) разрушение материала.
4. Выполняются оба условия, материал разрушается.

С целью проверки данной гипотезы в программном комплексе ANSYS Workbench, в среде Static Structural проведён расчёт (рис. 2 а, б) результаты которого сравнивались со значениями из эксперимента по разрушению бетонных образцов размерами 100x100x100 мм., различной прочности (11,34 МПа., 18,59 МПа., 31,32 МПа., 39,7 МПа.) сферическим и клиновым штампами (рис. 3 а, б).

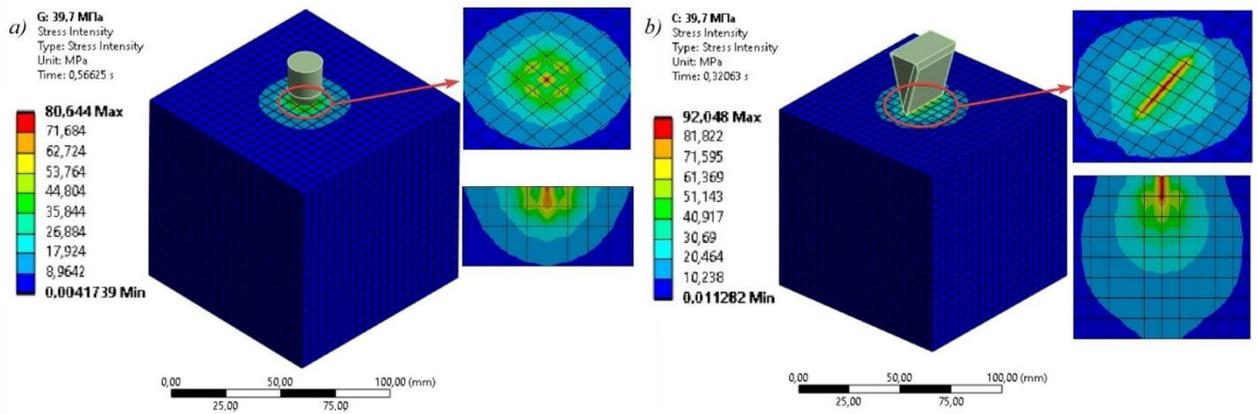


Рис. 2. Расчёт напряжённо-деформированного состояния бетонных образцов при вдавливании штампов в ANSYS Workbench: *a* — штамп сферический; *b* — штамп клиновой. (Stress Intensity – Интенсивность напряжений в МПа)

Fig. 2. Calculation of the stress-strain state of concrete specimens during stamp indentation in the ANSYS Workbench: *a*, a spherical stamp; *b*, a wedge stamp.

Моделирование бетона осуществлялось 20-узловыми гексаэдрическими элементами с квадратичной функцией формы (SOLID186). Поведение и деформация бетона задавались моделью Вильяма-Варнке [14]. Для того, чтобы учитывать изменения свойств только в образцах, штампы были заданы абсолютно жёсткими. Радиус сферического штампа равен 8 мм, длина кромки клинового штампа равна 30 мм, а угол заострения 30°. Нагрузка задавалась кинематическим граничным условием (задание штампу перемещения), после чего наблюдался отклик материала на внедрение в него соответствующего штампа.

Для того чтобы оценить необходимое количество энергии упругих деформаций для полного разрушения экспериментальных образцов в первую очередь нужно знать их вязкость разрушения. Эту величину определяют экспериментальным путём [8]. Существуют работы, как по определению вязкости разрушения конкретных опытных образцов [9-11], так и работы, в которых выводятся аналитические зависимости на основе экспериментальных данных, для примерной оценки её величины, для различных типов бетонов. В частности, в работе [12] предлагается следующая зависимость для определения коэффициента интенсивности хрупкого разрушения:

$$K_{Ic}^e = 3,327 f_c^{0,440} \cdot d_{\max}^{0,145} \cdot \left(\frac{W}{C}\right)^{-0,438}. \quad (3)$$

где  $K_{Ic}^e$  — коэффициент интенсивности хрупкого разрушения,  $f_c$  — предел прочности на одноосное сжатие, МПа.,  $d_{\max}$  — максимальный диаметр фракции щебня, мм.,  $\frac{W}{C}$  — водоцементное соотношение.

Коэффициент интенсивности хрупкого разрушения, в свою очередь связан с вязкостью разрушения следующим соотношением:

$$G_c = \frac{K_{Ic}^2}{E}, \quad (4)$$

где  $E$  — начальный модуль упругости, ГПа, он определяется согласно АСІ-318-19 [13], по формуле:

$$E = 4785 \sqrt{f_c}. \quad (5)$$

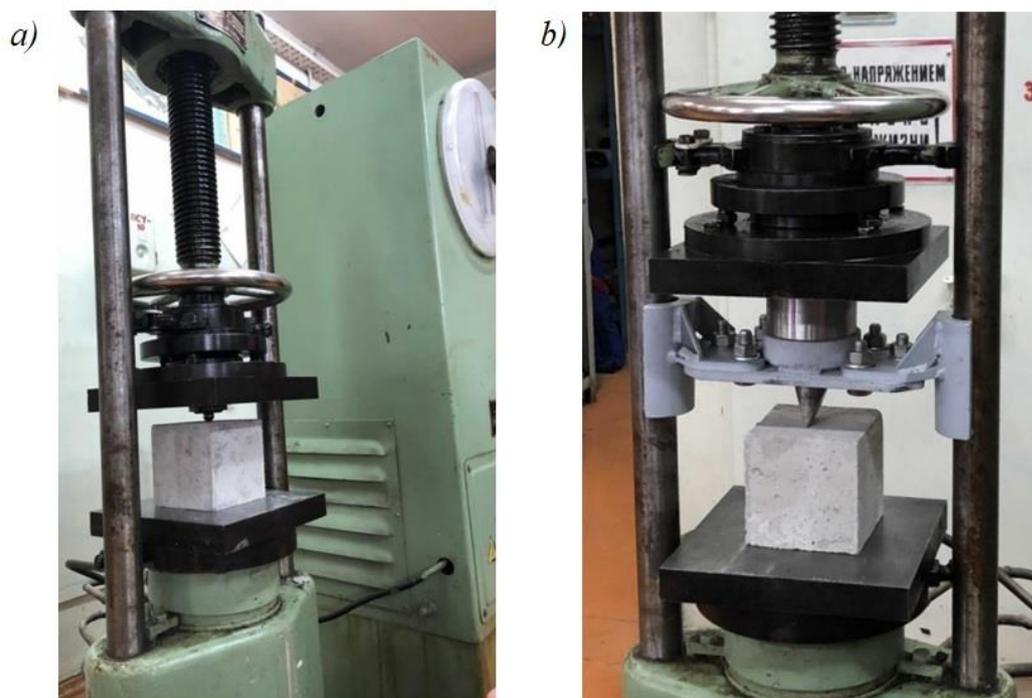


Рис. 3. Эксперимент по разрушению бетонных образцов штампами: а — штамп сферический, б — штамп клиновой.

Fig. 3. Experiment on the destruction of concrete specimens by stamps: a, a spherical stamp, b, a wedge stamp.

По результатам расчёта определялась характерная точка (обозначена жирной линией на графике на рис. 4), соответствующая пределу прочности образца и в ней, рассматривались значения усилия и значения энергии упругих деформаций.

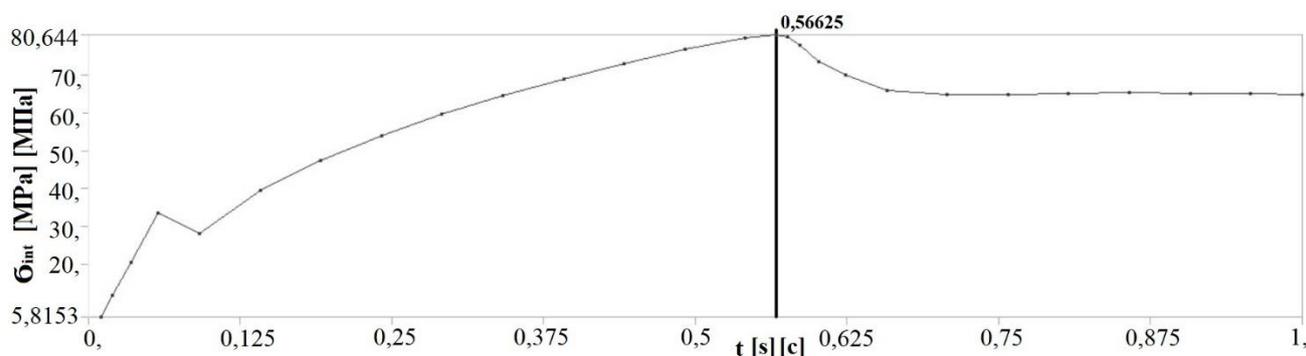


Рис. 4. График изменения напряжений во времени при вдавливании сферического штампа.

Fig. 4. Curve of stress variation in time during indentation of a spherical stamp.

Затем значения усилия, полученные в ходе расчёта, сравнивались с экспериментальными результатами, а значения энергии упругих деформаций с значениями, рассчитанными из второго неравенства из системы 2. После чего определялся характер возможного разрушения согласно схеме, представленной на рис. 1, в случае если разрушение шло по второму варианту, конечное значение разрушающего усилия находилось из следующего соотношения:

$$F_p = F_m \cdot \frac{E_{уп.p}}{E_{уп.m}}, \quad (6)$$

где  $F_m$  — расчётное усилие, Н,  $E_{уп.p}$  — требуемое количество энергии упругих деформаций, Дж,  $E_{уп.m}$  — расчётное количество энергии упругих деформаций, Дж.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

По полученным данным в результате моделирования был построен график зависимости усилия (рис. 5), необходимого для разрушения образца, от предела прочности образца, а затем характер полученной зависимости был сравнен с значениями, полученными в ходе эксперимента.

Сравнение полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что характер протекания процессов, как в модели из комплекса ANSYS Workbench, так и в экспериментальных исследованиях практически одинаков. Благодаря чему мы можем заключить, что предлагаемая гипотеза применима для решения задач, связанных с разрушением бетона рабочими органами машин.

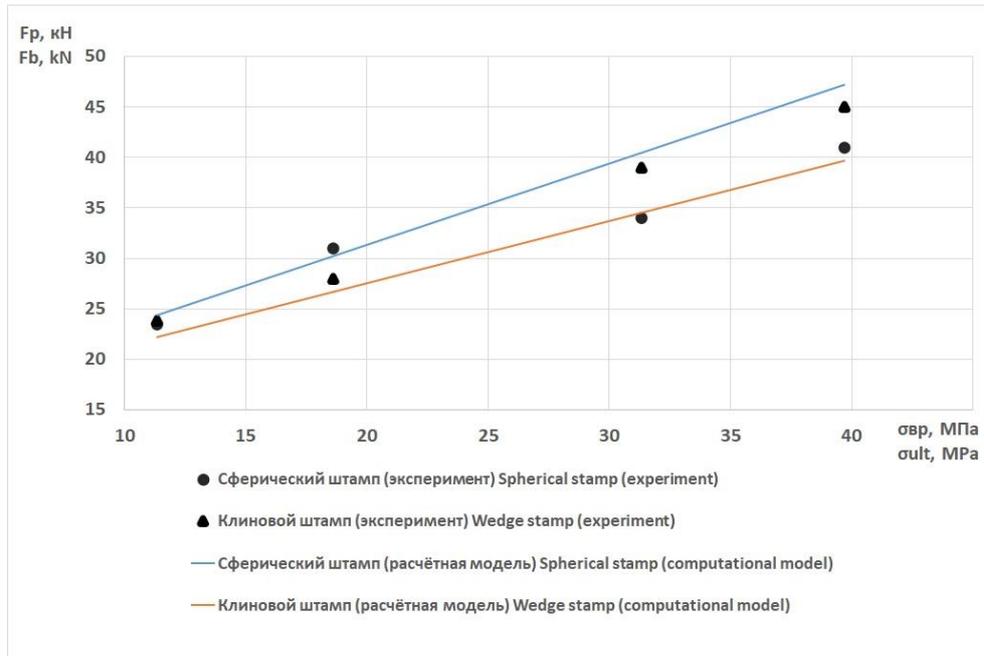


Рис. 5. Сводный график зависимостей разрушающего усилия от предела прочности бетонного образца для экспериментальных и расчётных результатов.

Fig. 5. Summary graph of the dependencies between the breaking force and the tensile strength of the concrete specimen for experimental and calculated results.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведённой работы позволяют нам сделать несколько важных выводов:

- Существующая теоретическая база по расчёту оборудования статического действия для разрушения ЖБИ не позволяет полноценно обосновать его оптимальные параметры, поскольку в ней не учитываются как особенности рабочего процесса разрушения, так и особенности разрушаемого материала.
- По отдельности, ни феноменологические теории прочности, ни механика хрупкого разрушения не позволяют полноценно описать процесс разрушения бетона рабочими органами машин. Феноменологические теории не способны описать процесс разрушения материала в объёме, в то время как механика хрупкого разрушения не работает при рассмотрении тел без первоначальных дефектов.
- Предложена гипотеза для описания рабочего процесса разрушения бетона оборудованием статического действия, учитывающая особенности рабочего процесса.
- Использование феноменологических теорий прочности в сочетании с подходами механики хрупкого разрушения позволяет найти решение для задач разрушения бетона рабочими органами машин.
- Высокая сходимость расчётных и экспериментальных результатов была получена при учёте только упругих деформаций, необходимо также проведение дополнительных исследований с учетом работы пластических деформаций бетонной матрицы, которые безусловно будут возникать в процессе разрушения.

## ТЕОРИЯ, КОНСТРУИРОВАНИЕ, ИСПЫТАНИЯ

- Указанный подход также может быть применим и для других материалов, склонных к хрупкому разрушению, однако это требует дополнительных исследований.

Предлагаемый в работе подход так же может быть, использован для обоснования параметров оборудования динамического действия. В этом случае энергия, необходимая для разрушения, будет реализовываться оборудованием и для её расчёта потребуется только знать основные параметры ударной части оборудования (массу и скорость). Однако проблема будет возникать при оценке силовых факторов, то есть напряжениях в месте контакта. Для чего потребуются динамические расчёты, например методом конечных элементов.

Пока данная гипотеза была проверена лишь на стандартных образцах бетона, для оценки её точности при работе с железобетоном потребуется проведение дополнительных расчётов и экспериментов. Однако предложенный подход уже сейчас позволяет с достаточной точностью аналитически решать задачи связанные с проектированием оборудования для разрушения ЖБИ.

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Вклад авторов:** Д.В. Фурманов — постановка цели и задачи исследования; описание проблемы, с которой связано исследование; разработка алгоритма и методики проведения эксперимента, обработка результатов эксперимента; редактирование и дополнение текста рукописи; окончательное утверждение версии рукописи для публикации; Т.А Краснобаев — построение расчетной модели, проведение расчётов и обработка их результатов, написание текста рукописи; поиск публикаций по теме статьи. Все авторы одобрили рукопись (версию для публикации), а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

**Этическая экспертиза.** Неприменимо.

**Источники финансирования.** Отсутствуют.

**Раскрытие интересов.** Авторы заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

**Оригинальность.** При создании настоящей работы авторы не использовали ранее опубликованные сведения (текст, иллюстрации, данные)

**Доступ к данным.** Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима, новые данные не собирали и не создавали.

**Генеративный искусственный интеллект.** При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

**Рассмотрение и рецензирование.** Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали два внешних рецензента, член редакционной коллегии и научный редактор издания.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Author contributions:** D.V. Furmanov: formulation of the objective and tasks of the study; the study problem description; development of the algorithm and the method of conducting experiment, editing and supplementing the text of the manuscript; final approval of the version for publication; T.A. Krasnobaev: building a computational model, performing calculations and processing their results, writing the manuscript, searching for publications on the topic of the paper. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that issues related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

**Ethics approval:** N/A.

**Funding sources:** No funding.

**Disclosure of interests:** The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

**Statement of originality:** No previously obtained or published material (text, images, or data) was used in this study or article.

**Data availability statement:** The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work as no new data was collected or created.

**Generative AI:** No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

**Provenance and peer review:** This paper was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer review involved two external reviewers, a member of the editorial board, and the in-house scientific editor.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Galdin NS, Semenova IA. Determination of the main parameters of the hydraulic shear excavator. *Construction and road building machinery*. 2021;(6):19-22. (In Russ.) EDN: GHEXWW
2. Galdin NS, Arkhipenko DS. Hydraulic scissors as a subject of modeling. *The Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2010;6(9):96. (In Russ.) EDN: MUKLQP
3. Galdin NS, Semenova IA. Functional dependences of determination of the main parameters of hydraulic excavator shears. *Construction and road building machinery*. 2023;(4):16-20. (In Russ.) EDN: PFBJVI
4. Korsun VI, Karpenko SN, Makarenko SYu, Nedorezov AV. Modern strength criteria for concrete under triaxial stress states. *Stroitel'stvo i rekonstrukciâ*. 2021;(5):16-30. doi: 10.33979/2073-7416-2021-97-5-16-30 (In Russ.) EDN: HYNCLS
5. Oreshko EI, Erasov VS, Grinevich DV, Shershak PV. Review of criteria of durability of materials. *Trudy VIAM*. 2019;9(81):108-126. doi: 10.18577/2307-6046-2019-0-9-108-126 (In Russ.) EDN: WPTYCD
6. Griffith AA. The theory of rupture. In: *Proceedings of the first International Congress for Applied Mechanics*. Delft; 1924:55–63.
7. Orowan E. Fracture and strength of solids. *Reports on Progress in Physics*. 1949;12(1):185-232.
8. GOST 29167-2021 Concretes. Methods for determining crack resistance (fracture toughness) characteristics under static loading. Moscow. Russian Standardization Institute, 2021.
9. Zhang G, Li Z, Nie K, Liu M. Experimental study on fracture toughness of concrete with different moisture contents. *Journal of Hydroelectric Engineering*. 2016;35(2):109-116 doi: 10.11660/slfdbx.20160213
10. Hu S, Xu A. Experimental validation and fracture properties analysis on wedge splitting concrete specimens with different initial seam-height ratios. In: *Procedia Structural Integrity. 21st European Conference on Fracture; 2016 20-24 June, Catania, Italy*. Elsevier; 2016;2:2818-2832. doi: 10.1016/j.prostr.2016.06.353
11. Abdallah MA, Elakhras AA, Reda R, et al. Applicability of CMOD to Obtain the Actual Fracture Toughness of Rightly-Cracked Fibrous Concrete Beams. *Buildings*. 2023;13(8):2010. doi: 10.3390/buildings13082010 EDN: MVEVNY
12. Alyamaç K, Ince R. A prediction formula for fracture toughness of concrete. In: *7th International Fracture Conferences; 2005 Oct. 19-21; Kocaeli, Turkey*.
13. ACI-318-19, Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute, 2019.
14. Dmitriev A, Novozhilov Yu, Mikhalyuk D, Lalin V. Calibration and Validation of the Menetrey-Willam Constitutive Model for Concrete. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2020;88:8804. doi: 10.18720/CUBS.88.4 EDN: WLXNVT

## ОБ АВТОРАХ / AUTHORS' INFO

\* **Краснобаев Тимофей Андреевич**,  
аспирант кафедры «Строительные и дорожные машины»;  
ассистент кафедры строительные и дорожные машины;  
адрес: Россия, 150023, Ярославль, Московский пр-кт, д. 88.;  
ORCID: 0009-0008-0934-6178;  
eLibrary SPIN: 3999-8239;  
e-mail: tima\_k.12@mail.ru

\* **Timofey A. Krasnobaev**,  
Postgraduate of the Building and Road Machines Department;  
Assistant of the Building and Road Machines Department;  
address: 88 Moskovsky ave, Yaroslavl, Russia, 150023;  
ORCID: 0009-0008-0934-6178;  
eLibrary SPIN: 3999-8239;  
e-mail: tima\_k.12@mail.ru

## ТЕОРИЯ, КОНСТРУИРОВАНИЕ, ИСПЫТАНИЯ

Соавтор:

**Фурманов Денис Владимирович,**

канд. техн. наук,

доцент кафедры «Строительные и дорожные  
машины»;

ORCID: 0000-0002-6932-6477;

eLibrary SPIN: 6237-2284;

e-mail: denis\_furmanov@mail.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Co-Author:

**Denis V. Furmanov,**

Cand. Sci. (Engineering),

Associate Professor of the Building and Road  
Machines Department;

ORCID: 0000-0002-6932-6477;

eLibrary SPIN: 6237-2284;

e-mail: denis\_furmanov@mail.ru