Механика деформируемого твердого тела

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-4>
УДК 691.32: 539.422.22/23: 620.173

А.И. Комаров, А.Ю. Кшнякин, А.К. Масиулла, В.Г. Цуприк

КОМАРОВ АЛЕКСЕЙ ИГОРЕВИЧ – аспирант, e-mail: komarov.ai@dvfu.ru
КШНЯКИН АНТОН ЮРЬЕВИЧ – аспирант, ассистент, e-mail: kshnyakin_ayu@dvfu.ru
МАСИУЛЛА АБДУЛ КАСИМ – аспирант, e-mail: arash786masi@gmail.com
ЦУПРИК ВЛАДИМИР ГРИГОРЬЕВИЧ – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой,
e-mail: tsuprik.vg@dvfu.ru

Кафедра строительных конструкций и материалов Инженерной школы
Дальневосточный федеральный университет
Суханова ул., 8, Владивосток, Россия, 690091

Энергоемкость разрушения автоклавного газобетона в условиях одноосного сжатия

Аннотация: Общепринятые в настоящее время в механике разрушения материалов критерии разрушения основаны на энергетической концепции А.А. Гриффитса. Эта концепция определяет условие возникновения предельного состояния в материале вокруг вершины одиночной трещины в виде равенства скорости роста упругой энергии и скорости ее поглощения в ограниченной зоне, вокруг внутреннего дефекта структуры материала. Но для сложных композитных материалов, таких как бетон, возможность применения этих критериев остается спорной из-за выраженной неоднородности и большого количества дефектов структуры этого типа материалов. Ввиду того что энергетическая природа разрушения справедлива для любых материалов, в том числе для бетонов, то, мы полагаем, должен существовать энергетический критерий разрушения. Такой критерий должен устанавливать факт этого явления как результата интегрального накопления и диссипации поступающей извне упругой энергии внутри напряженного объема материала, насыщенного массой произвольно направленных трещин (дефектов) различной природы и размеров. Предлагаемая в работе эффективная удельная энергия разрушения газобетона как модельного материала рассматривается не только как параметр, обозначающий свершившийся факт разрушения его напряженного объема, но и как характеристика, описывающая процесс накопления и рассеяния энергии в таком объеме. Диапазон возможных значений исследуемой величины для ячеистого бетона был определен по результатам проведенного авторами факторного эксперимента с варьированием таких факторов, как плотность, скорость нагружения и водонасыщенность. Вид зависимости энергозатрат на разрушение кубического образца газобетона во времени от различных факторов обуславливает вязкий или хрупкий тип (механизм) разрушения этого материала и описывает ход накопления дефектов в процессе нарастания упругой деформации до момента разрушения.

Ключевые слова: энергоемкость разрушения газобетона, критерий разрушения, удельное накопление дефектов.

Введение

Развитие механики разрушения материалов стимулировало появление нового подхода к пониманию теории предельного состояния материала, формулируемого как достижение

критических значений энергетических критериев разрушения бетона G_{IC} и K_{IC} . Эти критерии постулируют факт возникновения предельного состояния в упругом материале вокруг вершины одиночной трещины при условии, что связь между параметрами деформирования носит линейный характер. Согласно постулату А.А. Гриффитса, в линейной механике разрушения (ЛМР) определяющим эти критерии физическим параметром является величина удельной энергии, необходимой для развития имеющегося в материале единичной поверхности плоского дефекта. Условием наступления таких критериев является равенство скорости роста упругой энергии и скорости ее поглощения в малой зоне вокруг дефекта: при этом учитывается, что вся энергия затрачивается на образование новой свободной поверхности [2, 4, 14, 16].

Бетон, который применяют в течение 200 лет, и сегодня – самый распространенный строительный материал. Однако в связи с очень сложным строением механические свойства этого искусственного камня (композитного материала) определяются по методикам, не адекватным работе материала в конструкции, а расчетные критерии не отвечают в полной мере необходимым для численных методов расчетов прочности и устойчивости сооружений. Это обуславливает актуальность поиска критерия разрушения бетона, – не только для упрощения расчетов его прочности и долговечности, но и для придания достоверности расчетным моделям, описывающим реальные феноменологические процессы его разрушения.

Проблемы описания разрушения бетона энергетическими критериями ЛМР

Приложениями механики разрушения к проблеме описания процессов разрушения бетона в рамках линейной механики разрушения в разные годы занимались Ачкурин Т.К., Карпенко Н.И., Леонович С.Н., Колчунов, В.И., Микридин Н.И. и др. [1, 3, 5–13, 15]. Установлено, что характер разрушения бетона различен в зависимости от объемных форм, количества и упорядоченности начальных дефектов (пор, полостей, трещин, нарушений сцепления между матрицей и заполнителем и т.д.). Источниками концентрации напряжений, приводящими к разрушению связей на всех уровнях структуры бетона, являются многие из дефектов одновременно.

В связи с этим для сложных композитных материалов, таких как бетон, возможность применения критериев G_{IC} и K_{IC} в расчетах остается спорной из-за выраженной неоднородности его структуры и большого количества ее дефектов для этого типа материалов, в которых размеры отдельных жестких элементов строения соизмеримы с размерами испытываемых образцов. В то же время энергетическая природа разрушения справедлива для любых материалов, поэтому, по нашему мнению, должен существовать энергетический критерий разрушения. Он может констатировать не только факт разрушения как результат выброса упруго запасенной в структуре материала энергии на новые поверхности макротрещин, но и факт диссипации поступающей извне упругой энергии внутри напряженного объема материала на «старых» и новых поверхностях множества произвольно распределенных в структуре дефектов и разнонаправленных трещин (дефектов) различной природы. Поэтому модель разрушения бетона в конструкции «по плоской схеме Гриффитса» может быть только частным случаем. Но, поскольку накопление потенциальной энергии деформации на свободных поверхностях дефектов и ее концентрация в их характерных изгибах также происходит одновременно по всему объему, то, в полном соответствии с постулатом А.А. Гриффитса, такой критерий должен *интегрально учитывать расход накопленной энергии упругой деформации* не только на упругие, но и на пластические процессы, в том числе тепловые.

Результаты экспериментов, выполненных в [18], показали, что такой критерий для материала типа бетона является «эффективным», т.е. осредненным по весьма неоднородному объему с неравномерным нагружением его частей. Он интегрально учитывает удельную

энергоемкость разрушения не «чистого материала» с упорядоченной однородной структурой с конечным количеством микродефектов, а относится либо к единице объема сложной неоднородной структуры искусственного композита с бесконечным числом дефектов различных форм и размеров, хаотично распределенных в его объеме, либо к сложной криволинейной поверхности разрушения.

Таким образом, можно считать установленным, что превышение критического уровня интенсивности (плотности) удельной энергии упругой деформации приводит к началу ее спонтанного высвобождения в одной точке напряженного объема с дальнейшим переходом в эту стадию множества других дефектов с передающейся по цепочке критического уровня концентрации объемных напряжений и их перехода во вновь образующиеся микротрещины, приводящие к разрушению бетона в результате их коалесценции. Учитывая, что разрушение происходит без притока внешней энергии, только за счет накопления упругой энергии в компонентах материала, критерием разрушения бетона, как и большинства конструкционных материалов, следует считать критическое значение удельной потенциальной энергии упругой деформации его единичного объема, при условии, что этот объем может считаться представительным объемом для такого сложного композитного материала, как бетон.

Цель статьи – установление характера изменения энергоемкости макроскопических объемов материала во времени и определение значения энергоёмкости разрушения при сочетании трёх факторов – плотность, скорость нагружения и водонасыщение на примере автоклавного газобетона в условиях одноосного сжатия.

Автоклавный газобетон – один из характерных видов бетонов, имеет конгломератную ячеистую структуру, поэтому может с полным основанием рассматриваться в качестве модельного материала в нашем исследовании.

Эксперименты с автоклавным газобетоном как модельным материалом

Исследование предлагаемого критерия разрушения искусственного конгломерата и влияние на его значения некоторых факторов, определяющих его физическое состояние, в наших экспериментах выполнялось на образцах газобетона. Выбор материала не случаен. Изучением свойств автоклавного ячеистого бетона (АЯБ) занимались ведущие отраслевые институты и лаборатории СССР (например, НИПИСиликатобетон, Таллин и Минск, Проблемная лаборатория автоклавных материалов, Воронеж, и др.) Этот материал обладает невысокой средней плотностью, низкими звукопроницаемостью и теплопроводностью: эти качества обусловили его широкое использование в строительстве. Помимо названных свойств газобетон обладает прочностью, достаточной для того, чтобы использовать его не только в многоэтажном монолитном каркасном строительстве в качестве заполнения блоками ограждающих конструкций и перегородок, но и в малоэтажном строительстве в качестве конструкционных блоков для самонесущих стен. С позиции механики разрушения АЯБ был исследован в [10].

Образцы для испытаний были выпилены из двух блоков газобетона автоклавного твердения завода ООО «СИЛ БЕТ» Приморского края, изготовленных по ГОСТ 31360-2007. По паспорту завода блоки при поставке в «сухом» состоянии имеют 25% влажности, один имеет маркировки: В3,5 – по прочности, D600 – по плотности, F75 – по морозостойкости, другой блок соответственно В2,5, D500 и F75. Далее в работе образцы обозначены как D500 и D600 (рис. 1, а, б и рис. 2). Основа для количественных оценок прочности газобетона – его пористость. Важно знать и общую пористость, и распределение пор по размерам, что определяет плотность этого материала и как следствие – прочность, так как от относительного к объему образца количества пор зависит толщина межпоровой перегородки цементного камня (табл. 1).

а

б

Рис. 1. Вид структуры пор газобетона:
а – марка D500, б – марка D600. Здесь и далее иллюстрации авторов.

а

б

Рис. 2. Графики распределения диаметра пор:
а – марка D500; б – марка D600.

Таблица 1

Результаты анализа пор газобетона марок D500 и D600

D500		D600	
Число полей зрения	1	Число полей зрения	1
Площадь, кв. мкм	18908	Площадь, кв. мкм	18908
Пористость, %	1,6	Пористость, %	1,1
Число пор	143	Число пор	126
Минимальный размер, мкм	0,3	Минимальный размер, мкм	0,3
Максимальный размер, мкм	8,4	Максимальный размер, мкм	7,9
Средний размер, мкм	1,1	Средний размер, мкм	0,9
СКО размеров, мкм	1,3	СКО размеров, мкм	1,1
Максимальное межчастичное расстояние, мкм	91,3	Максимальное межчастичное расстояние, мкм	135,5
Минимальное межчастичное расстояние, мкм	0,6	Минимальное межчастичное расстояние, мкм	0,7
Среднее межчастичное расстояние, мкм	12,4	Среднее межчастичное расстояние, мкм	13,4

Поскольку большинство конструктивных свойств данного материала значительно зависит от плотности, скорости нагружения и степени его насыщения влагой, мы исследуем именно эти параметры – как факторы, определяющие энергоёмкость разрушения газобетона.

Метод исследования

Выбор способа испытания материала, позволяющего на основе эксперимента оценить вклад каждого элемента структуры бетона в конкретное значение характеристики его прочности, был сделан в пользу стандартного метода свободного сжатия кубических образцов, но с обязательной записью процесса деформирования. Накопление экспериментальных данных также можно считать целью исследования, поскольку это станет базой для учета влияния как можно большего количества параметров, характеризующих их структуру, взаимосвязь и степень влияния на прочностные качества бетона. Поставленная цель предполагала проведение полнофакторного эксперимента с выводом уравнения регрессии для анализа методики – как часть большой работы по исследованиям не модельного материала – газобетона, а тяжелого бетона, для которого варьируемыми факторами должны стать параметры его основных компонентов и их сочетаний.

Для предпринятого здесь нами модельного эксперимента мы использовали метод физического моделирования процесса разрушения малых образцов как представительных объемов исследуемого материала. Образцы газобетона кубической формы размерами 100x100x100 мм разрушались путем приложения сжимающей нагрузки на две противоположные грани куба на механическом прессе типа SHIMADZU AG-X, 250kN-300kN. Каждый образец был измерен, взвешен и промаркирован, полученные данные записаны в журнал. Грани, параллельность которых обеспечена заводской распиловкой исходного массива параллельными фрезами (циркулярными пилами), обозначались на образцах в качестве рабочих поверхностей для нагружения. Нагрузка на образец прикладывалась при постоянной скорости перемещения верхней плиты пресса. Пресс оснащен цифровыми датчиками силы и перемещения верхней плиты, тензометрической системой измеряемых величин с подачей сигнала на ПК через интеллектуальный преобразователь интерфейса.

Информационно-измерительная система обеспечивала фиксирование значений силы и перемещения с дискретностью измерений 0,01 с. Датчик силы имеет класс 1 (1%) и разрешение 1/1000, датчик перемещения – также класс 1 (1%). Одновременно с записью файла массива значений исследуемых величин велась видеосъемка процесса разрушения образца цифровой камерой типа AOS/PROMON 500 Streaming High Speed Camera для анализа развития системы трещин, сколов и пр. Полученные значения исследуемых величин после обработки дают возможность построения графиков зависимостей эффективной удельной энергии – критерия разрушения газобетона для выбранных факторов: водонасыщения материала, его плотности и скорости нагружения.

Для исследования влияния полного водонасыщения газобетона на энергоёмкость его разрушения половина образцов были подвергнуты замачиванию. Результаты водонасыщения газобетонных образцов представлены в графике на рис. 3.

Согласно графику кривые водонасыщения вырождаются в горизонтальную прямую, т.е. образцы марки D500 класса 2,5 МПа и марки D600 класса 3,5 МПа поглотили мак-

Рис. 3. График, демонстрирующий процесс водонасыщения образцов марок D500 и D600 в относительных единицах.

симальное количество влаги в течение порядка 2,5 ч. Графики показывают относительное значение массы воды в порах водонасыщенного образца в сравнении с его массой в исходном – «сухом» состоянии. (Напомним, что испытанные образцы при заводском изготовлении в сухом состоянии имеют 25% влажности).

Полученные результаты говорят о том, что в момент времени, когда кривая водонасыщения выродилась в горизонтальную прямую, т.е. скорость водопоглощения стала равна нулю, образцы поглотили максимальное количество влаги. Исходя из этого образцы газобетона выдерживались в воде не менее трех часов, в дальнейшем водонасыщенные образцы испытывались на прессе.

Полученные нами результаты позволили определить изменение прочности на сжатие через показатель энергоемкости разрушения мокрого газобетона (при специальном замачивании образцов) по сравнению с «сухим».

Полнофакторный эксперимент

Модель представляется в виде «черного ящика». Входные параметры (факторы) по определению не коррелируемы, совместимы и варьируются, как показано в табл. 2. Что касается варьирования уровня влажности газобетона, то за минимальный уровень 0 принят «сухой», за максимальный уровень, который обозначен символом 1, – «водонасыщенный».

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

Факторы	x ₁	x ₂	x ₃
	Плотность, кг/м ³	Скорость деформации, мм/с	Влажность
Нулевой уровень	550	3	0,5
Интервал варьирования	50	2	0,5
Верхний уровень (+)	600	0,5	1
Нижний уровень (-)	500	0,1	0

Полнота исследований энергоемкости разрушения определяется числом различных состояний образца, возникающих как результат его нагружения на прессе для испытаний на разрушение при сжатии. Значение энергоемкости разрушения, принимаемое при различных неповторяющихся уровнях варьирования факторов, равно $N = 2^3 = 8$. Таким образом, в матрице планирования эксперимента необходимо иметь 8 строк – по числу опытов (табл. 2).

Эксперименты проводились весной 2019 г. в лаборатории кафедры строительных конструкций и материалов Инженерной школы ДВФУ. Кубический образец газобетона с известной плотностью и влажностью, выбираемый в соответствии с матрицей планирования, располагался между плитами пресса. Верхней плите пресса, имеющей шарнирное крепление к его верхней подвижной раме, задается значение скорости по матрице его планирования, постоянной в каждом эксперименте. В процессе опыта поведение образца регистрируется видеосъемкой. Для исключения случайного выпадения из анализа какого-либо опыта в каждом из них было принято испытывать по 5 образцов. Испытания водонасыщенных образцов проводились не менее чем через 6 ч после их погружения в воду, образец испытывался в мокром состоянии.

Сила воздействия на образец и перемещение нагружающей плиты – основные параметры процесса нагружения образца, считываются с дискретностью 0,1 с и записываются в цифровом формате на ноутбук для дальнейшей обработки результатов. Образец нагружается до полной потери им несущей способности как конструкции, т.е. до разрушения по одному из вариантов раскалывания, о чем делается соответствующая запись в журнале.

Для обеспечения репрезентативности выборки необходимо полученные результаты сравнить с подобными результатами других экспериментов. Однако ввиду того что нами предлагается новый критерий разрушения – его энергоёмкость, подобных экспериментов не имеется. Поэтому в начале исследования нам необходимо определить устойчивость значений нашего критерия разрушения.

Результаты экспериментов

Типовые картины разрушения сухого и мокрого образцов представлены на фотографиях (рисунки 4 и 5).

Рис. 4. Характерный вид разрушения образца сухого газобетона марки D600.

Рис. 5. Характерный вид разрушения образца водонасыщенного газобетона марки D600.

В результате экспериментов были получены значения удельной энергии разрушения газобетона $\epsilon_{ст}$, которые рассчитывались как частное от деления затраченной на разрушение образца энергии U_e испытательной машины к объему испытанного образца W . Выходная величина y_i (удельная энергия разрушения $\epsilon_{ст}$) для трех образцов в каждом эксперименте и статистические характеристики полученных значений исследуемой величины сведены в табл. 3. Максимальная дисперсия энергоёмкости разрушения наблюдается в эксперименте 1, а минимальная – в эксперименте 5. Согласно критерию Кохрена, результаты эксперимента воспроизводимы ($G_\delta = \frac{\max S^2_j}{\sum_{j=1}^8 S^2_j} = 0,272 < G = 0,516$). Значения отклонений обусловлены различной внутренней структурой образцов, а также погрешностями испытательной машины. В водонасыщенном состоянии (эксперименты 5–8) удельная энергоёмкость значительно снизилась из-за воздействия влаги на цементный камень в образцах газобетона.

Принято для данной задачи: математическая модель, связывающая удельную энергию разрушения со значениями факторов в интервале между их верхним и нижним уровнями, имеет вид линейной зависимости вида

$$y = f(x_1, x_2, x_3), \quad (1)$$

где x_1, x_2, x_3 – факторы в интервале между нижним и верхним уровнями.

Таблица 3

Удельная энергия разрушения ($H \cdot \text{мм}/\text{см}^3$), статистические характеристики

№	y_1	y_2	y_3	Среднее $\bar{y}$	Выборочная дисперсия S_j
1	29,56	31,01	33,93	31,50	4,95
2	29,17	25,25	27,79	27,40	3,95
3	18,83	19,43	20,86	19,71	1,09
4	10,52	13,55	13,09	12,38	2,67
5	25,21	24,99	26,08	25,43	0,33
6	16,73	15,30	15,93	15,99	0,51
7	6,86	10,82	9,58	9,08	4,11
8	6,39	6,56	7,81	6,92	0,60
Среднее значение дисперсии					2,28
Среднеквадратичное отклонение коэффициентов $S_{\text{коэф}}$					0,31

Уравнение (2) для случая исследования влияния трех факторов на выходной параметр y (удельная энергия разрушения) записывается в виде линейного уравнения регрессии:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (2)$$

где $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ – коэффициенты уравнения регрессии при выбранных факторах и их сочетаниях.

Значения коэффициентов регрессии, полученные методом наименьших квадратов системы уравнений вида (3), составлены по результатам каждого из проведенных опытов.

Исходя из 5% уровня чувствительности исследуемой величины к изменению отдельного фактора, математическая модель, описывающая удельные затраты энергии на механическое разрушение образца газобетона сжимающей нагрузкой, приобретает вид

$$y = 18,55 + 6,53x_1 + 2,88x_2 - 4,20x_3 + 1,31x_1x_2x_3. \quad (3)$$

Проверка адекватности уравнения (3) со значимыми коэффициентами, выполняемая с помощью критерия Фишера, показала ($F_{\text{расч.}} = 0,76 < F_{\text{табл.}} = 3,2$), что полученное уравнение адекватно отражает результаты эксперимента, т.е. выбранная математическая модель соответствует статистике полученных экспериментальных данных.

Характерные графики изменения энергоемкости разрушения газобетона от скорости деформирования образцов марок D600 и D500 изображены на рисунках 6, 7.

Рис. 6. Графики изменения энергоемкости разрушения газобетона марки D500 в зависимости от хода траверсы: а – сухой; б – мокрый.

Для оценки влияния скорости движения траверсы за пределами рассматриваемого интервала варьирования на энергоёмкость разрушения газобетона были выбраны дополнительные значения скоростей ($v_1 = 0,05$ мм/с и $v_2 = 1,00$ мм/с). Результаты продемонстрированы на рис. 7. Общий график изменения энергоёмкости разрушения образцов бетона марок D500 и 600 в зависимости от влияющих на неё факторов изображен на рис. 8.

Рис. 7. График изменения энергоёмкости разрушения газобетона марки D600 в зависимости от хода траверсы.

Рис. 8. График энергоёмкости разрушения газобетона марки D600 и D500.

Обсуждение результатов экспериментов

Данные табл. 3 показывают, что значения энергоёмкости материала имеют малую дисперсию, и все значения сосредотачиваются вблизи математического ожидания этой величины.

Исходя из полученного линейного уравнения регрессии (3), можно констатировать: все исследуемые факторы – плотность и влажность газобетона, так же как и скорость его нагружения, оказывают влияние на энергоёмкость разрушения. Влияние парных взаимодействий указанных факторов на исследуемый параметр оказалось значимо только в случае взаимодействия сразу трёх факторов.

Графики (рисунки 6–8) иллюстрируют, что удельная энергия разрушения образцов газобетона в сухом состоянии при повышении скорости деформирования растёт. Это объясняется тем, что в областях концентраторов напряжений, таких как микротрещины, поры, полости, происходит разрыхление структуры цементного камня в результате движения дислокаций его кристаллической решетки. Поэтому на продвижение трещины отрыва требуется подвести больше энергии, чтобы достичь предельных напряжений в зонах их концентрации – для разрыва связей структуры цементного камня и образования новых поверхностей.

Поскольку при повышении скорости притока энергии скорость ее поглощения структурой остается постоянной, характерной для этого материала в сухом состоянии, пластические деформации в цементном камне не успевают развиваться пропорционально нарастанию упругих деформаций, поглощая при этом часть поступающей энергии. Поэтому разрушение образцов газобетона происходит по хрупкому типу. При хрупком разрушении газобетона также наблюдалось разрушение с наличием звука, что обусловливается неспособностью поверхности образованной трещины воспринять всю подводимую упругую потенциальную энергию деформации, а это приводит к её высвобождению в виде звуковой волны, которая распространяет энергию в воздушной среде.

В интервале скорости 0,1–1,0 мм/с наблюдается линейное изменение энергоёмкости образцов (рис. 8), однако в интервале 0,05–0,1 мм/с зависимость нелинейна в результате активного развития пластических деформаций.

В водонасыщенном состоянии энергоемкость разрушения газобетона снижается, что соответствует уменьшению его механических характеристик.

В интервале 0,05–0,5 мм/с зависимость нелинейна, а при скорости выше 0,5 мм/с, как и в сухом состоянии, наблюдается линейное изменение энергоемкости разрушения материала образцов.

Однако характер изменения удельной потенциальной энергии деформации образцов в водонасыщенном состоянии (рис. 8) на интервале скорости 0,05–0,5 мм/с кардинально отличается от характера такой же кривой для сухих образцов.

Выводы

Итак, наши экспериментальные исследования зависимостей энергоемкости разрушения автоклавного газобетона от его плотности, влагонасыщения и скорости нагружения образцов позволили получить следующие результаты:

- увеличение плотности газобетона ведет к росту энергоемкости его разрушения;
- разрушение сухих образцов происходит по хрупкому механизму, а водонасыщенных – по вязкому;
- полное водонасыщение образцов значительно снижает удельную энергию разрушения;
- при скорости деформирования в пределах 0,01–0,1 мм/с наблюдается: убывающая нелинейная зависимость между удельной энергией разрушения и скоростью траверсы для водонасыщенного газобетона, но возрастающая нелинейная зависимость – для сухого;
- при скорости деформации в пределах 0,1–0,5 мм/с (0,1–1 мм/с) для образцов марки D600 (D500) наблюдается возрастающая линейная зависимость между энергоемкостью разрушения и скоростью траверсы прессы как для сухого, так и для водонасыщенного газобетона;

Полученные результаты свидетельствуют об аномалии – повышении удельной энергии разрушения марки D500 водонасыщенного газобетона при скорости деформирования в пределах 0,01–0,1 мм/с.

Способ определения величины удельной энергии разрушения газобетона на стандартном лабораторном оборудовании для испытаний на свободное сжатие образцов призматической формы – наиболее доступный и хорошо освоенный для получения массива экспериментальных данных по этой энергетической характеристике прочности, достаточного для прогнозирования ее расчетных нормативных значений.

Полученные результаты экспериментов показывают, что эксплуатация конструкций из газобетона нежелательна. Такие конструкции могут впитывать влагу, поэтому вполне реальна угроза снижения их несущей способности или разрушения.

Дальнейшие направления исследований: расширение диапазона скоростей приложения нагрузки, плотности, соотношений общей пористости и размеров пор для расширенной номенклатуры видов бетона, в частности газобетона, а также получение эмпирических зависимостей деформирования и разрушения бетона от параметров его макро- и микроструктуры.

Вклад авторов в статью: А.И. Комаров – подготовка и обработка данных эксперимента, работа над текстом, оформление статьи; А.К. Масиулла – проведение и анализ данных эксперимента; А.Ю. Кшнякин – формулировка цели и задач, анализ данных, аннотация, заключение и текст статьи в целом, В.Г. Цуприк – общее руководство и направление исследований, гипотеза, аннотация и текст статьи в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акчурин Т.К., Ушаков А.В. Теоретические и методологические вопросы определения трещиностойкости бетона при статическом нагружении. Волгоград, 2005. 408 с. [доступно: РГБ].
2. Албаут Г.Н. Нелинейные задачи механики разрушения // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4(4). С. 1344–1346. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/ne-lineynye-zadachi-mehaniki-razrusheniya-1> (дата обращения: 11.02.2020).
3. Карпенко Н.И. Экспериментальное определение параметров механики разрушения высокопрочных бетонов // Academia. Архитектура и строительство. 2010. № 3. С. 553–558.

- URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-opredelenie-parametrov-mehaniki-razrusheniya-vysokoprochnyh-betonov> (дата обращения: 11.02.2020).
4. Каштанов А.В. Структурно-континуальный подход в задачах механики разрушения // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4(4). С. 1522–1524. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/strukturno-kontinualnyy-podhod-v-zadachah-mehaniki-razrusheniya-1> (дата обращения: 11.02.2020).
 5. Ключева Н.В., Колчунов В.И. Проблемные задачи развития гипотез механики разрушения применительно к расчету железобетонных конструкций // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного ун-та. 2014. № 3(29). С. 41–45. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemnye-zadachi-razvitiya-gipotez-mehaniki-razrusheniya-primenitelno-k-raschetu-zhelezobetonnyh-konstruktsiy> (дата обращения: 11.02.2020).
 6. Леонович С.Н. Алгоритм расчета долговечности бетона по обобщенному критерию // Наука и техника. 2009. № 2. С. 5–12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-raschetadolgozhechnosti-betona-po-obobschennomu-kriteriyu> (дата обращения: 11.02.2020).
 7. Леонович С.Н. Алгоритм расчета трещиностойкости бетона в раннем возрасте при капиллярной усадке по обобщенному критерию // Наука и техника. 2018. № 6. С. 502–507. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-rascheta-treschinostoykosti-betona-v-rannem-vozraste-pri-kapillyarnoy-usadke-po-obobschennomu-kriteriyu> (дата обращения: 11.02.2020).
 8. Леонович С.Н. Коэффициенты интенсивности напряжений в зоне контакта матрицы и заполнителя // Наука и техника. 2010. № 4. С. 13–15. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsi-ent-y-intensivnosti-napryazheniy-v-zone-kontakta-matritsy-i-zapolnitelya> (дата обращения: 11.02.2020).
 9. Леонович С.Н., Пирадов К.А. Длина и ширина раскрытия трещины в бетонном элементе при циклическом нагружении // Наука и техника. 2010. № 5. С. 5–8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dlina-i-shirina-raskrytiya-treschiny-v-betonnomelemente-pri-tsiklicheskom-nagru-zhenii> (дата обращения: 11.02.2020).
 10. Макеев А.И., Чернышев Е.М. Условия управления характеристиками однородности/неоднородности структуры и параметрами поля напряжений в конгломератных строительных композитах // Вестник Волгоградского гос. архитектурно-строительного у-та. Сер. Строительство и архитектура. 2017. № 47(66). С. 111–122.
 11. Макридин Н.И. Механика разрушения песчаного бетона и фибробетона // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного ун-та. 2014. № 3(29). С. 122–126. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mechanika-razrusheniya-peschanogo-betona-i-fibrobetona> (дата обращения: 11.02.2020).
 12. Окольников Г.Э., Курбанмагомедов А.К. Исследование трещиностойкости высокопрочных бетонов методами механики разрушения // Системные технологии. 2017. № 23. С. 42–46. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-treschinostoykosti-vysokoprochnyh-betonov-metodami-mehaniki-razrusheniya> (дата обращения: 11.02.2020).
 13. Орешкин Д.В. Механика разрушения и современные научные исследования строительных материалов // Вестник МГСУ. 2013. № 12. С. 180–183. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mechanika-razrusheniya-i-sovremennye-nauchnye-issledovaniya-stroitelnykh-materialov> (дата обращения: 11.02.2020).
 14. Партон В.З., Морозов Е.М. Механика упруго-пластического разрушения: монография. М.: Наука, 2007. 416 с. URL: https://www.studmed.ru/parton-v3-morozov-em-mechanika-uprugoplasticheskogo-razrusheniya_436ca02a096.html (дата обращения: 11.02.2020).
 15. Саусь А.А., Панченко В.В. Механика разрушения железобетонных балок, усиленных углеродной лентой // Достижения науки и образования. 2019. № 2(43). С. 38–39. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mechanika-razrusheniya-zhelezobetonnyh-balok-usilennyh-uglerodnoy-lentoy> (дата обращения: 11.02.2020).
 16. Черепанов Г.П. Механика разрушения. Сер. Математика и механика. Москва; Ижевск: Изд-во «ИКИ», 2012. 872 с. URL: <https://www.bgshop.ru/catalog/getfulldescription?id=9854805> (дата обращения: 11.02.2020).
 17. Чернышев Е.М., Коротких Д.Н. Определяющие соотношения показателей сопротивления разрушению цементных бетонов и параметров структуры // Строительство и реконструкция. 2015. № 2(58). С. 167–174.
 18. Tsuprik V. Mathematical Model of Failure Process of Concrete as Three-Component Structure. Conference: The 24th Annual International Ocean and Polar Engineering Conference, At Busan, Korea, 2014, 220–222 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/306357974_Mathematical_Model_of_Failure_Process_of_Concrete_as_Three-Component_Structure – 11.02.2020.

DOI: <http://www.dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2020-1-4>

Komarov A., Kshnyakin A., Masiulla A., Tsuprik V.

ALEXEY KOMAROV, Postgraduate, e-mail: komarov.ai@dvfu.ru

ANTON KSHNYAKIN, Postgraduate, Assistant, e-mail: kshnyakin_ayu@dvfu.ru

ABDUL MASIULLA, Postgraduate, e-mail: arash786masi@gmail.com

VLADIMIR TSUPRIK, Candidate of Engineering Sciences, Head of the Department,
e-mail: tsuprik.vg@dvfu.ru

Department of Building Structures and Materials, School of Engineering

Far Eastern Federal University

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

Energy intensity of destruction of autoclaved aerated concrete during uniaxial compression

Abstract: Today's conventional criteria in the mechanics of material fracture are based on Griffith's energy concept. This concept constitutes that specific limit state in the material around the tip of a single crack occurs when the rate of elastic energy growth and the rate of its absorption in bounded areas around the material's internal structural defect are equal. Yet, for complex composite materials such as concrete the practical possibility of applying these criteria remains controversial due to considerable heterogeneity and significant number of structural defects. Seeing as the energy nature of destruction is fair and obvious for any materials including concretes, there must be an energy criterion of destruction, which states the fact of destruction as a result of integral accumulation and dissipation of external elastic energy within the strained material volume saturated with multiple cracks (defects) of random directions, nature and sizes. The proposed effective specific energy of destruction of the aerated concrete as a model material is viewed not only as a parameter to evidence the accomplished fact of strained material volume destruction, but also as a feature outlining the process of accumulation and dissipation of energy in such a deformable volume. To determine the possible range of the investigated value for cellular concrete, a factorial experiment was performed with variation of such factors as density, loading speed and water saturation. The type of dependence of energy consumption for destruction of a cubic sample in time when exposed to various factors determines the specific mechanism of destruction of this material – viscous or brittle, and describes the process of accumulation of defects in the process of increasing elastic deformation till the moment of destruction.

Keywords: energy intensity of aerated concrete destruction, destruction criterion, specific accumulation of defects.

REFERENCES

1. Akchurin T.K., Ushakov A.V. Theoretical and methodological issues of determining the crack resistance of concrete under static loading, Volgograd. 2005, 408 p.
2. Albaut G.N. Nonlinear problems of fracture mechanics. Bulletin of the Nizhny Novgorod University. N.O. Lobachevsky. 2011(4);4:1344–1346. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/nelineynye-zadachi-mehaniki-razrusheniya-1> – 11.02.2020.
3. Karpenko N.I. Experimental determination of the parameters of fracture mechanics of high-strength concrete. Academia. Architecture and construction. 2010(3):553–558. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/eksperimentalnoe-opredelenie-parametrov-mehaniki-razrusheniya-vysokoprotchnykh-betonov> – 11.02.2020.

4. Kashtanov A.V. Structural-Continuum Approach in Problems of Fracture Mechanics. Bulletin of the Nizhny Novgorod University. 2011(4):1522–1524. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/struk-tu-rno-kontinualnyy-podhod-v-zadachah-mehaniki-razrusheniya-1> – 11.02.2020.
5. Klyueva N.V., Kolchunov V.I. Problem problems of developing hypotheses of fracture mechanics as applied to the calculation of reinforced concrete structures. Bulletin of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2014(29);3:41–45.
URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemnye-zadachi-razvitiya-gipotez-mehaniki-razrusheniya-primenitelno-k-raschetu-zhelezobetonnnyh-konstruktsiy> – 11.02.2020.
6. Leonovich S.N. Algorithm for calculating the durability of concrete by a generalized criterion. Science and Technology. 2009(2):5–12. URL: <https://cyberleninka.com/article/n/algoritm-rascheta-dolgovechnosti-betona-po-obobschennomu-kriteriyu> – 11.02.2020.
7. Leonovich S.N. Algorithm for calculating the crack resistance of concrete at an early age with capillary shrinkage by a general criterion. Science and Technology. 2018(6):502–507. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/algoritm-rascheta-treschinostoykosti-Betona-v-rannem-voztaste-pri-kapillyarnoy-usadke-po-obobschennomu-kriteriyu> – 11.02.2020.
8. Leonovich S.N. Stress Intensity Coefficients in the Contact Zone of the Matrix and Aggregate // Science and Technology. 2010(4):13–15. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsientyintensivnosti-napryazheniy-v-zone-kontakta-matritsy-i-zapolnitelya> – 11.02.2020.
9. Leonovich S.N., Piradov K.A. Length and width of crack opening in a concrete element under cyclic loading. Science and Technology. 2010(5):5–8. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/dlina-i-shirina-raskrytiya-treschiny-v-betonnom-elemente-pri-tsiklicheskom-nagruzhenii> – 11.02.2020.
10. Makeev A.I., Chernyshev E.M. Conditions for controlling the characteristics of structure homogeneity / heterogeneity and stress field parameters in conglomerate building composites. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2017(66):11–122.
11. Makridin N.I. Mechanics of destruction of sand concrete and fiber-reinforced concrete. Bulletin of Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. 2014(29):122–126. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mechanika-razrusheniya-peschanogo-betona-i-fibrobetona> – 11.02.2020.
12. Okolnikova G.E., Kurbanmagomedov A.K. Investigation of crack resistance of high-strength concrete using fracture mechanics. System Technologies. 2017(23):42–46. URL: <https://cyberleninka.com/article/n/issledovanie-treschinostoykosti-vysokoprochnyy-betonov-metodami-mehaniki-razrusheniya> – 11.02.2020.
13. Oreshkin D.V. Mechanics of destruction and modern scientific research of building materials. Vestnik MGSU. 2013(12):180–183. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mechanika-razrusheniya-i-sovremennye-nauchnye-issledovaniya-stroitelnykh-materialov> – 11.02.2020.
14. Parton V.Z., Morozov E.M. Elastic-plastic fracture mechanics : monograph. Moscow. Nauka. 2007. 416 p. URL: https://www.studmed.ru/parton-v3-morozov-em-mechanika-uprugoplasticheskogo-razrusheniya_436ca02a096.html – 11.02.2020.
15. Saus A.A., Panchenko V.V. Mechanics of destruction of reinforced concrete beams reinforced with carbon tape. Achievements of Science and Education. 2019(43):38–39.
URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mechanika-razrusheniya-zhelezobetonnyh-balok-usilennyh-uglerodnoy-lentoy> – 11.02.2020.
16. Cherepanov G.P. Mechanics of destruction. Series Mathematics and Mechanics. Moscow, Izhevsk. Publishing house IKI, 2012, 872 p. URL: <https://www.bgshop.ru/catalog/getfulldescription?id=9854805> – 11.02.2020.
17. Chernyshev E.M. Korotkikh D.N. Defining ratios of indicators of resistance to destruction of cement concrete and structural parameters. Construction and reconstruction, 2015(58):167–174. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23304695> – 11.02.2020.
18. Tsuprik V. Mathematical Model of Failure Process of Concrete as Three-Component Structure. Conference: The 24th Annual International Ocean and Polar Engineering Conference, At Busan, Korea. 2014, 220–222 p. URL: https://www.researchgate.net/publication/306357974_Mathematical_Model_of_Failure_Process_of_Concrete_as_Three-Component_Structure – 11.02.2020.