

Научная статья

УДК 539.3

DOI: 10.31857/S0869769824020112

EDN: lculgu

Механическая прочность домиков усоногих рачков из отряда Balanomorpha

А. Л. Попов✉, А. И. Чава, Н. М. Осипенко, В. М. Козинцев✉,
Д. А. Челюбеев, Е. И. Шифрин, В. О. Мокиевский

Александр Леонидович Попов

доктор физико-математических наук, профессор,

ведущий научный сотрудник

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского, Москва, Россия

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

popov@ipmnet.ru

<http://orcid.org/0000-0002-4841-5657>

Александра Ивановна Чава

инженер

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

cribrilina@gmail.com

Николай Михайлович Осипенко

кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского, Москва, Россия

osipnm@mail.ru

Виктор Михайлович Козинцев

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского, Москва, Россия

kozincev@mail.ru

Дмитрий Анатольевич Челюбеев

ведущий инженер

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского, Москва, Россия

da-ch@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0003-0594-1785>

Ефим Ильич Шифрин

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией

Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского, Москва, Россия

shifrin@ipmnet.ru

<http://orcid.org/0000-0002-4826-5062>

Вадим Олегович Мокиевский

доктор биологических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия

cribrilina@gmail.com

<http://orcid.org/0009-0003-2873-0638>

Аннотация. Механические испытания фрагментов домиков *Chirona evermanni* из Охотского моря и прикрепленных к каменному субстрату домиков *Balanus eburneus* из Баренцева моря позволили определить размер усилий, необходимых для разрушения фрагментов домиков и целых домиков, прикрепленных к субстрату, а также прочность и трещиностойкость материала раковин. Испытания показали почти десятикратный разброс разрушающего усилия. По уровню трещиностойкости и характеру разрушения материалы домиков *C. evermanni* и *B. eburneus* оказались близки к осадочным горным породам. Разброс значений, полученный в ходе эксперимента, определяется топологическими и морфологическими особенностями домиков.

Ключевые слова: усоногие рачки, обрастания, раковина, субстрат, прочность, разрушение

Для цитирования: Попов А. Л., Чава А. И., Осипенко Н. М., Козинцев В. М., Челюбеев Д. А., Шифрин Е. И., Мокиевский В. О. Механическая прочность домиков усоногих рачков из отряда Balanomorpha // Вестн. ДВО РАН. 2024. № 2. С. 123–132.
<http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020112>, EDN: lculgu

Благодарности. Авторы благодарны Д. А. Онищенко за постановку задачи и помощь в работе, М. И. Симакову, Г. А. Колючкиной и В. Л. Сёмину за предоставленные образцы усоногих рачков.

Original article

Mechanical strength of barnacle houses of Balanomorpha

A. L. Popov, A. I. Chava, N. M. Osipenko, V. M. Kozintsev,
D. A. Chelyubeev, E. I. Shifrin, V. O. Mokievsky

Aleksander L. Popov

Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Leading Researcher
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia
Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia
popov@ipmnet.ru
<http://orcid.org/0000-0002-4841-5657>

Alexandra I. Chava

Engineer
Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia
cribrilina@gmail.com

Nikolai M. Osipenko

Candidate of Sciences in Technics, Senior Researcher
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia
osipnm@mail.ru

Viktor M. Kozintsev

Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Senior Researcher
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia
kozincev@mail.ru

Dmitri A. Chelyubeev

Leading Engineer
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia
da-ch@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0003-0594-1785>

Efim I. Shifrin

Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Head of Laboratory
Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Moscow, Russia

shifrin@ipmnet.ru
http://orcid.org/0000-0002-4826-5062

Vadim O. Mokievsky
Doctor of Sciences in Biology, Principal Researcher, Head of Laboratory
Shirshov Institute of Oceanology, RAS, Moscow, Russia
cribrilina@gmail.com
http://orcid.org/0009-0003-2873-0638

Abstract. Mechanical tests of fragments of *Chirona evermanni* houses from the Sea of Okhotsk and *Balanus eburneus* houses attached to the stone substrate from the Barents Sea made it possible to determine the amount of effort required to destroy fragments of houses and whole houses attached to the substrate, as well as the strength and crack resistance of the shell material. The tests showed an almost tenfold spread of the destructive force. According to the level of crack resistance and the nature of destruction, the materials of the houses *Chirona evermanni* and *Balanus eburneus* turned out to be close to sedimentary rocks. The spread of values obtained during the experiment is determined by the topological and morphological features of the houses.

Keywords: barnacle, fouling, shell, substrate, strength, destruction

For citation: Popov A. L., Chava A. I., Osipenko N. M., Kozintsev V. M., Chelyubeev D. A., Shifrin E. I., Mokievsky V. O. Mechanical strength of barnacle houses of *Balanomorpha* *Vestnik of the FEB RAS*. 2024;(2):23–132. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.31857/S0869769824020112>, EDN: lculgu

Acknowledgments. The authors are grateful to D. A. Onishchenko for setting the task and helping with the work. The authors are grateful to M. I. Simakov, G. A. Kolyuchkina and V. L. Semin for the provided samples of barnacles.

Введение

Любые конструкции, погруженные в воду, служат субстратом для многочисленных организмов, формирующих плотный и прочный покров обрастания. Этот покров может препятствовать нормальному функционированию подводных сооружений, приводя к необходимости регулярной очистки поверхности. Для очистки поверхностей под водой важно иметь представление о механической прочности организмов, доминирующих в обрастании конструкций. Одной из ведущих групп в сообществах обрастания являются усоногие рачки *Cirripedia*. Работа посвящена представителям одного из отрядов усоногих рачков – *Balanomorpha*. Эти организмы обладают прочными известковыми домиками в форме усеченного конуса, состоящего из нескольких пластин. Пластины подвижны, что позволяет рачку по-разному вести себя в зависимости от внешних условий. При сильном воздействии волн или в отлив пластины закрывают отверстие в домике, защищая рачка, а при благоприятных условиях они раздвигаются, позволяя ему фильтровать пищевые частицы из толщи воды. Домики прочно прикреплены к поверхности субстрата с помощью выделений особых цементных желез. Прямых измерений механической прочности организмов-обрастателей проведено очень мало. Химическому составу и свойствам цемента, выделяемого усоногими рачками для прикрепления к субстрату, посвящено много публикаций (см. обзор [1]). Гораздо меньше данных имеется о прочности самих домиков и об усилии, необходимом для их разрушения при очистке [2]. Г. Б. Зевина [3] приводит оценки прочности домиков усоногих в диапазоне от 23–57 до 135–145 Н. Напряжение отрыва от субстрата для *Balanus balanoides* составляет до 0,93 МПа [4]. Помимо прямых измерений были попытки моделирования нагрузки на домики усоногих рачков при разной ориентации усилия [5]. При расчете нагрузок следует различать механическую прочность самих домиков, прочность прикрепляющего цемента и силу сцепления цемента с субстратом.

Для проведения механических испытаний домиков рачков были предоставлены две группы образцов. Первая группа состояла из отдельных фрагментов домиков усоногих

рачков *Chirona evermanni*, снятых с подводных конструкций в Охотском море. Вторая группа – домики *Balanus eburneus* из Баренцева моря на доломитовых и песчаниковых камнях. Домики отрывали от камней при нагрузках, ориентированных под разными углами к основаниям. Часть домиков располагалась на каменных субстратах поодиночке, но большинство образовывало колонии-сростки от 2 до 13 особей.

Задачей работы была оценка механической прочности стенок домиков двух видов усонюгих рачков – *Chirona evermanni* из Охотского моря и *Balanus eburneus* из Баренцева моря. Была определена прочность как фрагментов домиков, так и одиночных особей и колоний-сростков на природном субстрате.

Материал и методы экспериментов

В экспериментах были использованы фрагменты домиков усонюгих рачков *Chirona evermanni*, собранных с глубины около 100 м в Охотском море у берегов о-ва Сахалин, зафиксированные 4%-м формальдегидом, а затем высушенные (рис. 1, а), и домики *Balanus eburneus*, собранные в юго-восточной части Баренцева моря с глубины 20–30 м, зафиксированные 70%-м этанолом (рис. 1, б). Материал из Баренцева моря включал как отдельные домики, так и группы баянусов на природном субстрате (галька песчаника и доломита величиной 10–15 см).

Нагружение фрагментов проводилось на прессе ДТС-06–100. Выполнялись испытания четырех видов: два – на неподготовленных образцах (рис. 2, а, б) и два – разрушение специально подготовленных образцов (рис. 2, в, з). Для второй группы (*Balanus eburneus* в сростках), учитывая особенности прикрепления домиков к субстрату и сложность их формы, была собрана испытательная установка с датчиками силы и перемещения, в которую помещались образцы с основаниями, предварительно закрепленными эпоксидной смолой на металлических подложках. Подложки крепились в установке.

Результаты испытаний



Рис. 1. Экспериментальный материал: а – фрагменты домиков усонюгих рачков *Chirona evermanni* (и шарик для локального нагружения), б – образцы *Balanus eburneus* на природном субстрате

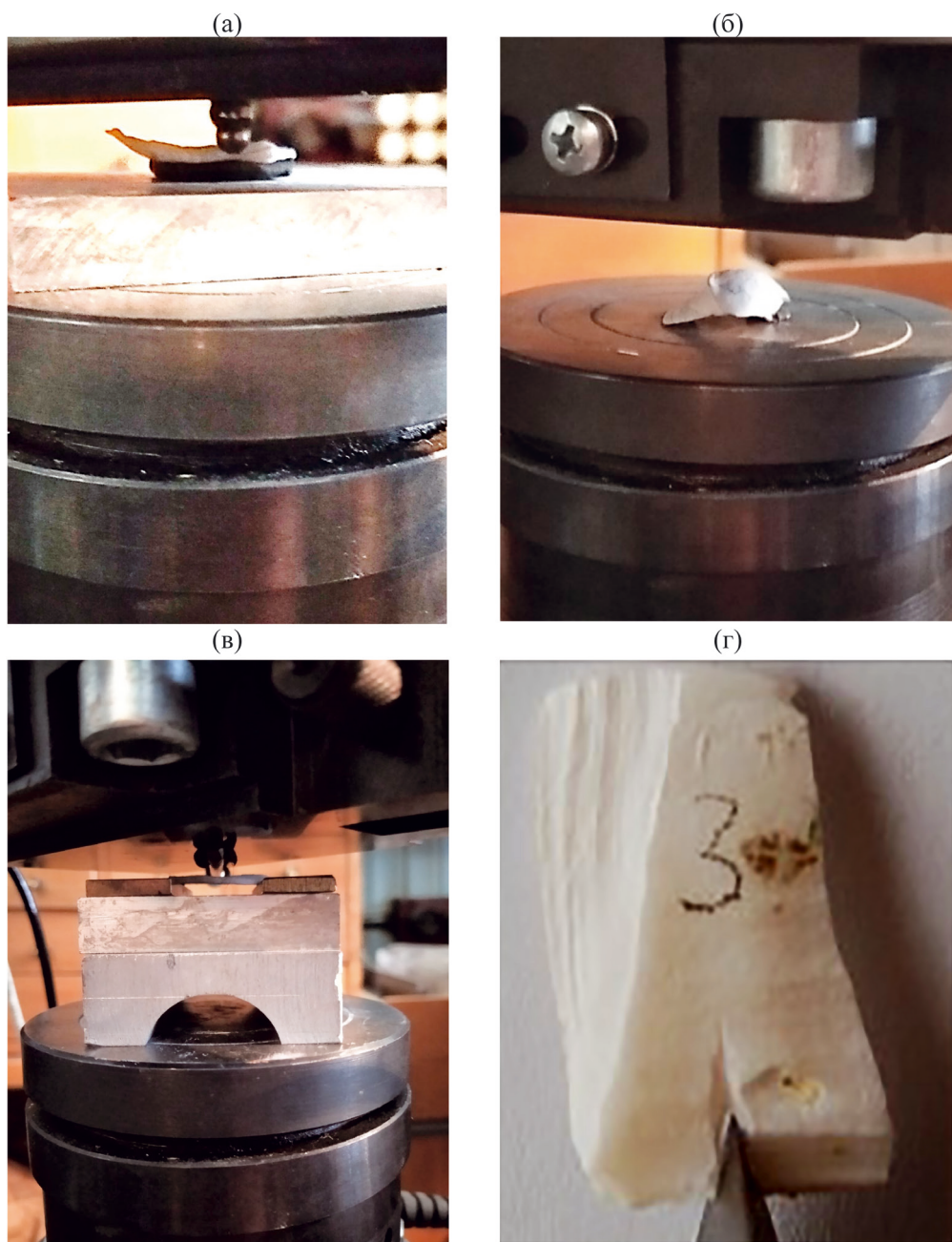


Рис. 2. Виды испытаний фрагментов: локальное нагружение шариком (а), сдавливание плоскими штампами (б), изгиб балочных образцов (в), расклинивание стальным клином (г)

В табл. 1 представлены результаты испытаний на разрушающее усилие фрагментов домиков *Chirona evermanni* (из Охотского моря), приведены значения средних толщин фрагментов, их массы и разрушающие усилия. Эти фрагменты имели значительную толщину – до 4 мм.

Результаты испытаний на разрушающее усилие фрагментов домиков *Chirona evermanni*

№	Толщина, мм	Масса, г	Усилие разрушения, Н	Условия разрушения
1	1,6	2,15	192 (до первой трещины)	Давление плоским штампом, крепление на тонком слое пластилина
2	2,8	1,6	104 (до первой трещины)	Давление шариком Ø6 мм на вогнутую сторону. Крепление на пластилине
3	2,9	1,2	300 (до первой трещины)	Давление шариком Ø6 мм на вогнутую сторону. Крепление на пластилине
4	1,2–3,6	2,2	160 (до разламывания пополам)	Давление плоским штампом. Без крепления
5	1,9	0,35	40, 22, 32, 30, 100, 130 (до разламывания на мелкие фрагменты)	Давление плоским штампом. Без крепления

Из имевшегося набора фрагментов были изготовлены два образца-балки. Испытание первого образца шириной $b = 7$ мм и толщиной $h = 2,4$ мм при расстоянии между опорами $L = 20$ мм показало величину разрушающего усилия $F = 67$ Н. Разрушение второго образца, поменьше (ширина 4,4, толщина 2,5, расстояние между опорами 14 мм), произошло при меньшем усилии $F = 37$ Н. Рассматривая нагружаемые элементы как балки прямоугольного сечения, можно оценить максимальное напряжение, т.е. локальную прочность, при их изгибе: $\sigma_{\max} = M_{\max}/W$; $M = FL/4$; $W = bh^2/6$. Оно представляет собой оценку сверху прочности материала раковины при растяжении. Для первого образца $\sigma_{\max} = 53$ МПа, а для второго – 28,5 МПа.

Также на образцах, имеющих форму, близкую в плане к прямоугольной, была проведена оценка трещиностойкости K_{1C} материала раковин. Это параметр, характеризующий сопротивляемость хрупкому разрушению. Образец с надрезом и расклинивающим устройством показан на рис. 2, з. Проведенные эксперименты показали, что величина K_{1C} для данного типа раковин находится в диапазоне 2–4 МПа $m^{0,5}$. Такой уровень трещиностойкости близок к этому показателю у осадочных горных пород, которые являются обычным природным субстратом для усонгих рачков.

Для имитации прикрепления к природной основе наиболее крупный фрагмент домика с размером в основании 30 мм и высотой 35 мм был приклеен в вертикальном положении к толстой металлической подложке при помощи эпоксидной смолы. Глубина погружения в смолу нижнего края фрагмента была около 5 мм.

Сечение домика имело сложную волнообразную форму: толщина по сечению менялась от 1,5 до 3,2 мм, а максимальный габаритный размер сечения менялся от 3 до 6,5 мм. Установка для испытания образцов на действие боковой нагрузки состояла из рычага для приложения давления к образцу, неподвижной опоры, толкателя с измерителем силы в виде S-образного датчика и измерителя линейного перемещения с точностью 0,1 мкм. Цена деления датчика силы составляла 10 Н. По результатам испытаний был построен график зависимости силы F от перемещения и стенки образца в точке приложения силы (рис. 3). Из этого графика видно, что начальный этап нагружения сопровождался частыми сбросами силы, свидетельствовавшими о появлении мелких трещин и отламывании кусочков стенки образца. Окончательное разрушение произошло при изломе раковины в основании. Максимальная нагрузка, которую выдержал образец, была 220 Н.

Партия образцов из Баренцева моря (рис. 1, б) состояла из трех групп домиков *Balanus eburneus* на природном субстрате – камнях, к которым прикрепились рачки. При испытаниях камни с домиками приклеивались эпоксидной смолой к металлическим подложкам так, чтобы плоский пуансон при движении давил только на домик. В качестве иллюстрации показан образец № 1 (рис. 1, б) перед испытанием (рис. 4, а) и после отрыва домика от субстрата (рис. 4, б). Стрелкой показано направление нагружения.

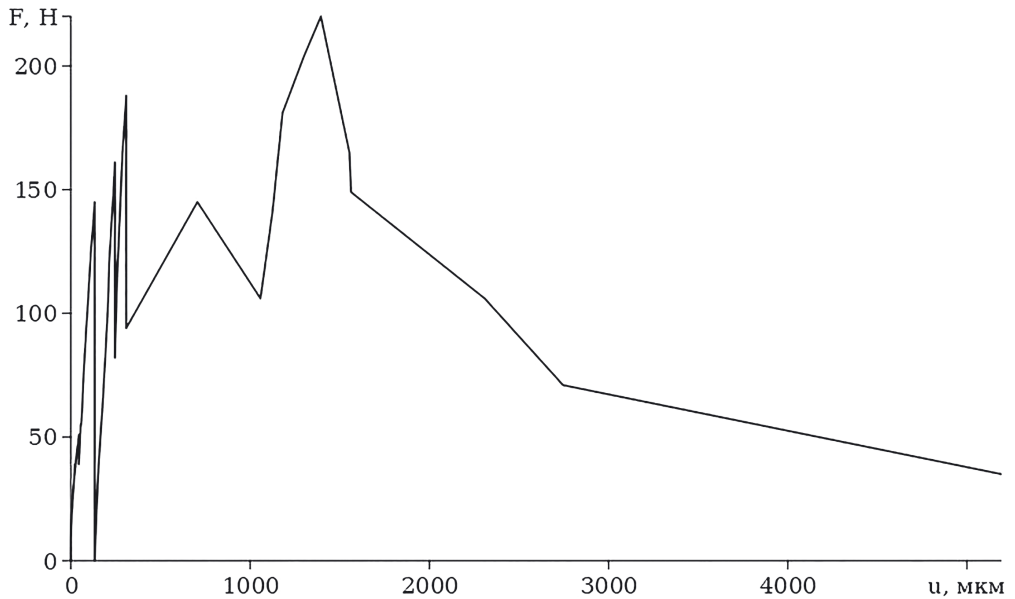


Рис. 3. Диаграмма нагружения крупного фрагмента раковины

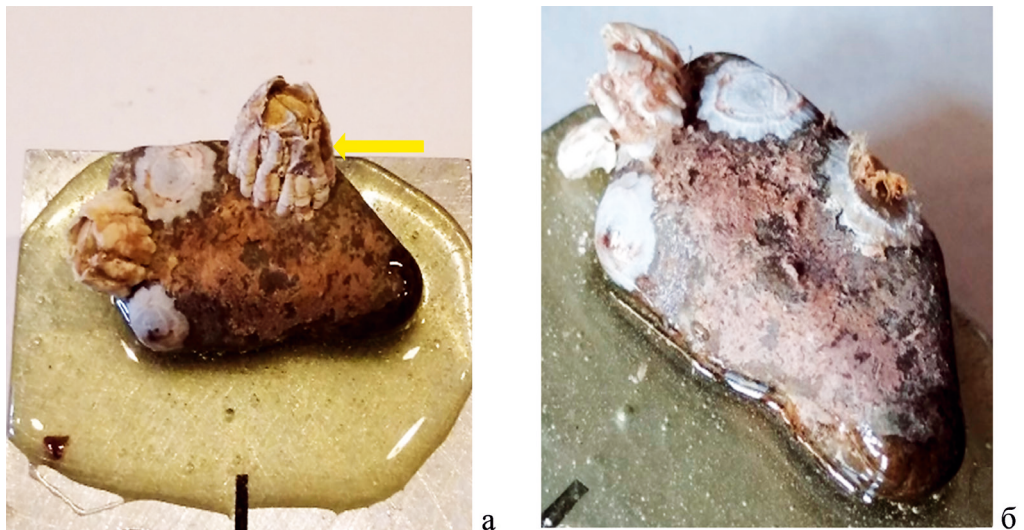


Рис. 4. Образец № 1 (см. рис. 1, б) до (а) и после (б) разрушения нагруженного домика; стрелкой показано направление усилия

Результаты измерений разрушающей нагрузки домиков *Balanus eburneus*, прикрепленных к камням, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений разрушающей нагрузки домиков усоногих рачков *Balanus eburneus* на камнях из Баренцева моря

Образец	Максимальная разрушающая нагрузка, Н	Количество домиков в группе. Характерные размеры: диаметр вершины / диаметр основания / высота, мм	Примечание
1	60	Один домик. 12 / 16 / 14.	–
2	60	Два. 12 / 15 / 16 и 12 / 13 / 16	–
3	65	Один. 11 / 12 / 15	–
3	85	Один. 10,5 / 11,5 / 14	Ориентация домика – под углом 45° к вертикали
4	90	Сросток из трех домиков. 13 / 13 / 16	–
4	165	Два. 12 / 12 / 16 и 12 / 12 / 16	–
4	28	Один. 12 / 14 / 15	Ориентация под углом 30° к основанию
5	40/40/27/ 210	Сросток из семи домиков. (10–15) / (10–12) / (14–20)	Четыре стадии разрушения при нагружения
6	60 и 46	Девять в сростке. (6–8) / (7–12) / (7–11)	Две стадии разрушения
7	40/40/28/16/28	Тринадцать в сростке. (9–11) / (6–15) / (17–19)	Сросток из 13 домиков, пять стадий разрушения
8	23/65/42/26/46/ 16/50/50	Тринадцать в сростке. (9–13) / (7–15) / (13–22)	Сросток из 13 домиков, восемь стадий разрушения
9	130	Один. 23 / 14 / 30	Один крупный домик
10	125/80	Три в сростке. (6–9) / (8–10) / (9–10)	Сросток из 3 домиков, две стадии разрушения

Испытания показали большой разброс разрушающего усилия – от 23 до 210 Н.

Обсуждение результатов

Ранее в экспериментах с *Balanus balanoides* [4] было показано, что напряжение отрыва домика от субстрата находится в пределах от 0,17 до 0,90 МПа. Сходные величины получены и для другого вида, *Balanus improvisus*: сдвиговые нагрузки при отрыве домика от субстрата были в пределах 0,05–0,30 МПа [6]. В этом исследовании авторы не выявили связи между прочностью прикрепления и шероховатостью поверхности субстрата. Близкий результат был получен и для *Balanus amphitrite*: 0,02–0,30 МПа [7].

Наши данные показали большой разброс прочностных характеристик домиков двух видов усоногих рачков из отряда Balanomorpha – *Chirona evermani* и *Balanus eburneus*. Разброс уровней нагрузки при отрыве объясняется видовой принадлежностью, индивидуальными размерами, структурой домиков и пространственной организацией поселений баянусов на субстрате. Прочностные характеристики стенок домиков, прочность их соединения с донцем и сила сцепления донца с субстратом

находятся в одном и том же диапазоне значений. Аналогичные испытания других авторов [8, 9] показали, что по уровню трещиностойкости и характеру разрушения материал фрагментов домиков *Chirona evermanni* и домиков *Balanus eburneus* близок к осадочным горным породам, таким как известняк, песчаник, сланец.

Вторая группа – домики *Balanus eburneus* из Баренцева моря с естественным прикреплением к камням – испытывалась на отрыв от каменного субстрата при нагрузках, ориентированных под разными углами к основаниям. Общее количество домиков во всех образцах – 57. Часть домиков располагалась на каменных субстратах изолированно, но большинство образовывало колонии от 2 до 13 особей. Испытания на разрушение этой группы образцов показали следующие результаты: изолированные домики выдерживали максимальную нагрузку с большим разбросом – от 30 до 90 Н, а наиболее крупные – до 130 Н. Сростки домиков обычно разрушались постепенно, частями по несколько домиков в течение одного нагружения. Домики только двух образцов сростков разрушились одновременно. Процесс протекал как постепенное дробление домика на части, так и отрыв целого корпуса или выступающей части домика от доньшка-основания. Донце (основание домика) иногда разрушалось без существенного остатка, когда на камне оставалось только пятно – след от домика, но иногда оставался довольно прочно прикрепленный остаток донца, хорошо видный на камнях после разрушения домиков, например, как на рис. 4. Разброс разрушающих нагрузок для сростков аналогичен разбросу этих нагрузок для изолированных домиков.

Заключение

Фрагменты домиков усонюгих рачков *Chirona evermanni*, снятых с подводных конструкций, расположенных в Охотском море, с толщиной раковины до 3–4 мм, обладают достаточно высокой прочностью: максимальное разрушающее усилие при изломе в основании одного из образцов было 220 Н. Для более мелких и тонкостенных домиков *Balanus eburneus* максимальные разрушающие усилия были 130 Н для изолированных домиков и 210 Н для сростков из нескольких домиков. Разброс значений, полученный в ходе эксперимента, зависел также от топологических и морфологических особенностей домиков.

Результаты экспериментов с этими образцами показывают хрупкий характер разрушения домиков при квазистатическом нагружении.

Разброс разрушающих нагрузок для сростков сходен с таковым для изолированных домиков. Из совокупности проведенных экспериментов можно также заключить, что прочность частей домиков при сдвигающих нагрузках немного превышает прочность их связей с каменным основанием, что, однако, не требует задействования дополнительных процессов при очистке субстрата от оснований домиков.

По уровню трещиностойкости и характеру разрушения материал домиков обрастания близок к осадочным горным породам, таким как известняк, песчаник, сланец. Этот факт может быть полезным при анализе способов механического воздействия на продукты обрастания и выборе наиболее эффективного способа очистки поверхностей от обрастаний.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kamino K. Mini-review: Barnacle adhesives and adhesion // Biofouling. 2013. Vol. 29, N6. P. 735–749.
2. Yule A. V., Walker G. Barnacle biology. Ch. Adhesion in barnacles. Routledge, 1987. P. 389–402.
3. Зевина Г. Б. Биология морского обрастания. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1994. 134 с.
4. Yule A. V., Walker G. The adhesion of the barnacle, *Balanus balanoides*, to slate surfaces // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 1984. Vol. 64, N1. P. 147–156.

5. Li C., Wang G., Chen K., Yun F., Wang L. Mechanical analysis of a scraping method to remove attached barnacles // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020. Vol. 8, N3. P. 150.
6. Petersen D., Gorb S., Heepe L. The influence of material and roughness on the settlement and the adhesive strength of the barnacle *Balanus improvisus* in the Baltic Sea // *Frontiers in Marine Science*. 2020. Vol. 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00664>.
7. Holm E.R., Kavanagh C.J., Orihuela B., Rittschof D. Phenotypic variation for adhesive tenacity in the barnacle *Balanus amphitrite* // *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 2009. Vol. 380, iss. 1–2. P. 61–67.
8. Баклашов И.В. Деформирование и разрушение породных массивов. М.: Недра, 1988. 271 с.
9. Roy D.G., Singh T.N., Kodikara J., Talukdar M. Correlating the mechanical and physical properties with mode-I fracture toughness of rocks // *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017. Vol. 50. P. 1941–1946.

REFERENCES

1. Kamino K. Mini-review: Barnacle adhesives and adhesion. *Biofouling*. 2013;29(6):735–749.
2. Yule A.B., Walker G. Adhesion in barnacles. In: *Barnacle biology*. Routledge, 1987. P. 389–402.
3. Zevina G.B. *Biologiya morskogo obrastaniya = [Biology of marine fouling]*. Moskva: Izd-vo Moskovskogo universiteta; 1994. 134 s. (In Russ.).
4. Yule A.B., Walker G. The adhesion of the barnacle, *Balanus balanoides*, to slate surfaces. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. 1984;64(1):147–156.
5. Li C., Wang G., Chen K., Yun F., Wang L. Mechanical analysis of a scraping method to remove attached barnacles. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2020;8(3):150.
6. Petersen D., Gorb S., Heepe L. The influence of material and roughness on the settlement and the adhesive strength of the barnacle *Balanus improvisus* in the Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science*. 2020;7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00664>.
7. Holm E.R., Kavanagh C.J., Orihuela B., Rittschof D. Phenotypic variation for adhesive tenacity in the barnacle *Balanus amphitrite*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 2009;380(1–2):61–67.
8. Baklashov I.V. *Deformirovaniye i razrusheniye porodnyh massivov = [Deformation and destruction of rock massifs]*. M.: Nedra; 1988. 271 s. (In Russ.).
9. Roy D.G., Singh T.N., Kodikara J., Talukdar M. Correlating the mechanical and physical properties with mode-I fracture toughness of rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2017;50:1941–1946.