

УДК 550.834+622.831

ЭФФЕКТ АНОМАЛЬНО НИЗКОГО ТРЕНИЯ В БЛОЧНЫХ СРЕДАХ

М. В. Курленя, В. Н. Опарин, В. И. Востриков

Институт горного дела СО РАН, 630091 Новосибирск

Исследуются механические условия реализации обнаруженного авторами эффекта аномально низкого трения в блочных средах из различных геоматериалов. Доказывается, что максимальные поперечные (горизонтальные) смещения блоков имеют место только в случаях канонической соподчиненности интервалов задержки между вертикальными и горизонтальными импульсными воздействиями на блочную систему и работающий блок соответственно. В случае статических горизонтальных усилий на работающие блоки значительные смещения последних происходят при абсолютных значениях этих усилий, много меньших соответствующих сил трения.

1. При изучении механизма возникновения волн маятникового типа (μ -волн) в [1] нами отмечен эффект «исчезновения» трения между взаимодействующими блоками из геоматериалов при определенных энергетических уровнях импульсного воздействия на модели блочных сред. Такое «исчезновение» трения наблюдается в ортогональных к линии действия внешнего импульса направлениях. В этой связи возникает ряд вопросов, касающихся механических условий и особенностей проявления эффекта аномально низкого трения в блочных средах.

Цикл проведенных авторами исследований, отраженных в настоящей статье, ограничен изучением следующих проблем:

1) установление связи между поперечными смещениями блоков геоматериалов, находящихся в двусторонних стесненных условиях при совместном действии вертикального импульса на блочную систему и горизонтального импульса (или силы) на работающий блок;

2) влияние временного интервала задержки между горизонтальными и вертикальными импульсными воздействиями на характер поперечных смещений работающих блоков.

2. Для решения указанных проблем выполнен комплекс исследований методом физического моделирования. Эксперименты проводились на двух моделях. Модель 1 представляла собой вертикальную систему из шести блоков, выполненных из оргстекла с размерами $250 \times 125 \times 85$ мм и массой 3,25 кг каждый. Модель 2 представляла собой вертикальную систему из шести блоков с размерами $250 \times 125 \times 85$ мм из силикатного кирпича массой 5,43 кг каждый. Скорости распространения продольных волн в оргстекле и силикатных блоках составили соответственно $V_l = 2814; 2662$ м/с.

Исследования проводились по двум схемам.

Схема 1. Изучение поперечной импульсной реакции блока III в условиях статически приложенных горизонтальных усилий к этому блоку и вертикального импульсного воздействия на поверхность блока I (рис. 1). В этой схеме используется узел задания статического горизонтального усилия 12. К блоку IV при помощи винтов 11 жестко крепится платформа 8 с динамометром 9. В блоке III закрепляется винт, который при помощи регулятора усилия 10 соединяется с динамометром. Этим регулятором создается необходимое

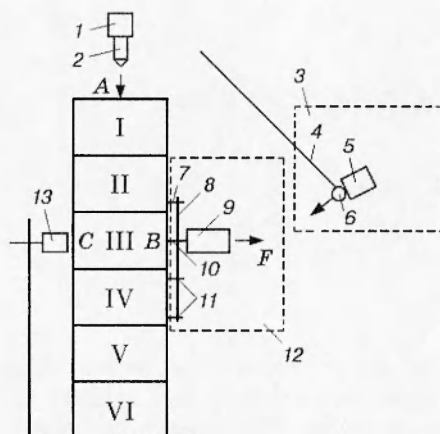


Рис. 1

горизонтальное усилие для блока III относительно блоков II и IV. Для исключения движения блока II совместно с блоком III служит упор 7 на платформе. В точке A блока I по центру установлен закаленный винт, который является «точкой» вертикального импульсного возбуждения. Роль вертикального импульсного воздействия выполняет боек 2 из закаленной стали массой 82,71 г. Для задания различного уровня энергетического воздействия на блочную систему боек сбрасывался с разных высот по отношению к точке A блока I. С учетом величины отскока вычислялась доля кинетической энергии, передаваемой от сбрасываемого бойка блочной системе.

Схема II. Изучение поперечной импульсной реакции блока III (абсолютные сдвиги) в условиях совместного действия горизонтального импульсного воздействия на блок III и вертикального импульсного воздействия на поверхность блока I. В этой схеме применяется узел горизонтального импульсного воздействия 3. Динамическое горизонтальное возбуждение блока III задается стальным шариком 6 массой 226,9 г, подвешенным на нити подвеса 4. Меняя угол отклонения шарика, можно изменять энергию импульсного горизонтального возбуждения. В точке B блока III установлен такой же винт, как и в блоке I, который является «точкой» горизонтального импульсного возбуждения. Электромагниты 1 и 5 удерживают боек и стальной шарик в исходном состоянии и управляются специальной схемой временной задержки, которая задает задержку во времени δt между началом свободного падения бойка и началом движения стального шарика, т. е. между вертикальным и горизонтальным импульсными возбуждениями. Регистрация абсолютных смещений блока III производилась специально разработанным оптическим датчиком смещений 13, описанным в работе [2]. Обработка информации осуществлялась измерительно-вычислительным комплексом, описанным в [3].

3. На первом этапе экспериментов производилось измерение пороговых значений статической горизонтальной силы F^0 для преодоления состояния покоя блока III в моделях 1 и 2 в условиях, когда отсутствует вертикальное импульсное возбуждение блочных систем. Соответствующие результаты измерений представлены в таблице. В схемах 2, 3 блок III (оргстекло, силикатный кирпич) сдвигается вместе с налегающими блоками II или II и I, в схемах 4, 5 блок II упирается в платформу, укрепленную на блоке IV (т. е. блок III двигается между блоками II и IV). Отношения между силовыми характеристиками по преодолению трения для представленных в таблице схем 1–5 движения блоков из силикатного кирпича и оргстекла составляют соответственно 3,08 (1); 3,13 (2); 2,70 (3); 2,82 (4); 2,95 (5); среднее значение примерно равно 2,94. Иными словами, коэффициент трения меж-

Пороговые значения статической горизонтальной силы F^0 , Н

Материал модели	Схема движения блоков				
	без платформы			с платформой	
	1	2	3	4	5
Оргстекло	11,76	22,54	36,26	33,32	64,68
Силикатный кирпич	36,26	70,56	98,00	94,08	191,10

ду силикатными блоками примерно в три раза больше, чем коэффициент трения между блоками из оргстекла. При этом относительный разброс приведенных данных к среднему их значению не превышает 7%.

На втором этапе экспериментальных исследований производилась регистрация величины сдвига блока III для моделей 1 (оргстекло) и 2 (силикатные блоки) при совместном действии статической горизонтальной силы F и вертикального импульсного возбуждения с энергией W_v (см. п. 2, описание схемы I). Полученные результаты измерений представлены на рис. 2, а, б для модели 1 из оргстекла и модели 2 из силикатных блоков.

Из рис. 2, а и таблицы (схема 5) следует, что первые заметные смещения блока III наблюдаются при боковых статических усилиях F , существенно меньших F^0 . Например, при $W_v \cong 42$ мДж (W_v — энергия вертикального импульсного воздействия) смещения $d \cong 10$ мкм происходят уже при $F \cong 17,15$ Н, в то время как $F^0 \cong 64,68$ Н. Таким образом, $F^0/F \cong 3,8$, т. е. имеет место существенный выигрыш в силовых характеристиках для осуществления процессов сдвижения блоков в стесненных условиях. Общими свойствами приведенных графиков поперечных смещений d блока III для различных уровней ($9 \div 42$ мДж) вертикальных импульсных воздействий W_v на блочную систему являются: 1) практически монотонное возрастание сдвиговых значений работающего блока III по мере увеличения энергии вертикального импульса W_v для фиксированных горизонтальных

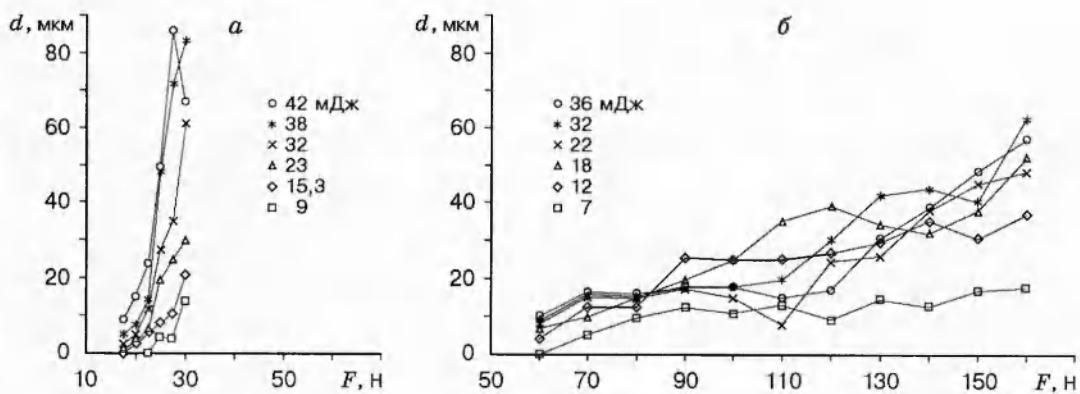


Рис. 2

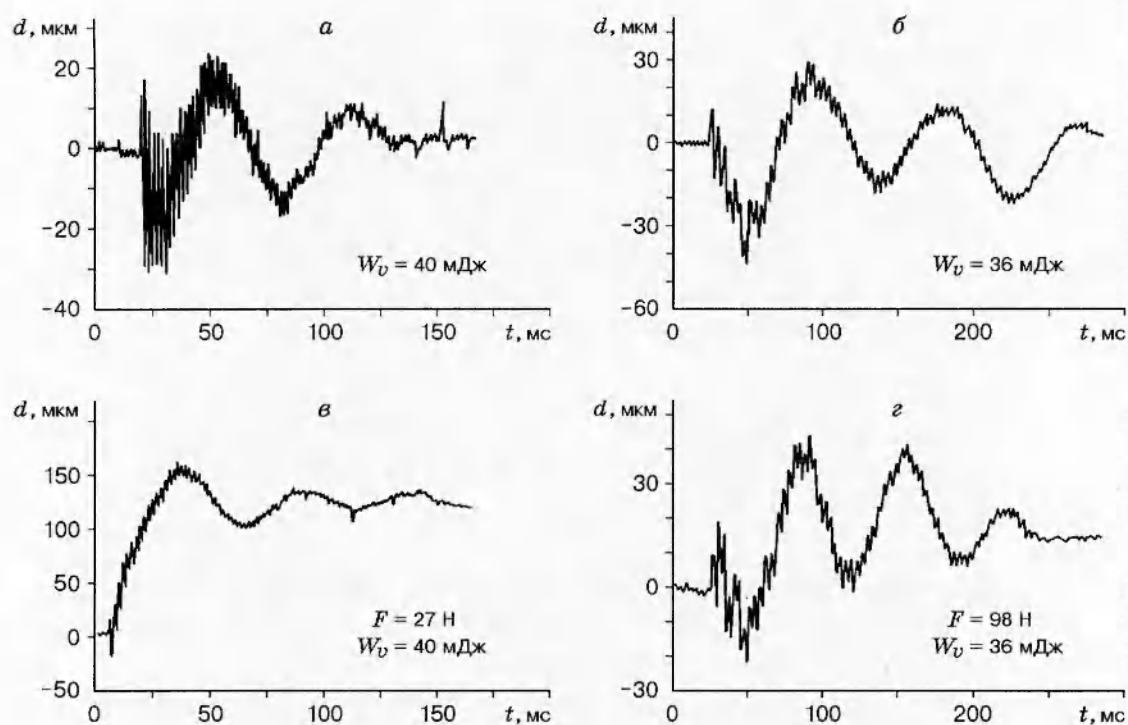


Рис. 3

усилий F ; 2) зависимость величины сдвига d работающего блока от бокового (горизонтального) усилия F , близкая к параболической.

При сравнении рис. 2, б с данными таблицы (схема 5) видно, что основные особенности характеристик смещения работающего блока из силикатного кирпича аналогичны рассмотренным выше для блока из оргстекла. Влияние повышенной шероховатости поверхностей силикатных блоков по сравнению с таковыми для блоков из оргстекла проявляется в квазимоноотонной структуре графиков смещений работающего блока. Учитывая почти двукратное различие F^0/F для силикатных блоков и блоков из оргстекла, можно сделать заключение о том, что среднеамплитудные характеристики шероховатостей соответствующих поверхностей могут различаться примерно в два раза. Подтверждением тому служат результаты третьего этапа экспериментальных исследований, на котором производилась регистрация деформаций блоков III в точке C (см. рис. 1) для моделей 1 и 2 в условиях действия только вертикального импульсного возбуждения блочных систем. Соответствующие результаты измерений представлены на рис. 3, а, в (модель 1 из оргстекла) и рис. 3, б, г (модель 2 из силикатных блоков).

Из рис. 3 следует, что амплитуды смещения блоков из силикатного кирпича и оргстекла в поперечном к импульсным воздействиям направлении при $t \geq 75$ мс отличаются примерно в два раза.

4. На заключительном этапе исследований осуществлялись измерения смещений блока III по описанной в п. 2 схеме II (см. рис. 1) с использованием узла горизонтального импульсного воздействия. В данном случае эксперименты проводились только на модели 2 из силикатных блоков при совместном действии различных по величине энергии вертикального и горизонтального импульсных возбуждений (на рис. 4 кривая 1 соответствует $W_v = 73$ мДж, $W_h = 106$ мДж; кривая 2 — $W_v = 37$ мДж, $W_h = 24$ мДж). Анализ приведенных на рис. 4 графиков позволяет выявить очень важную их особенность — ка-

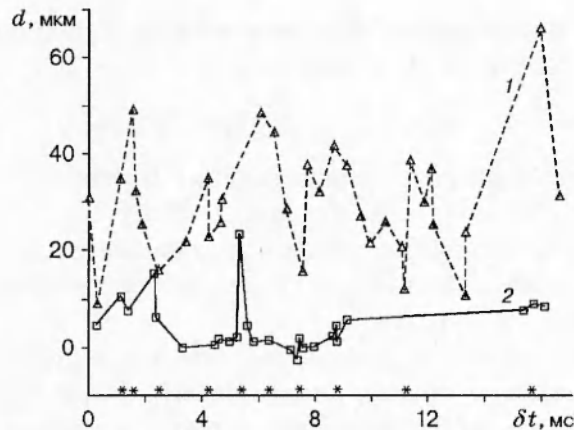


Рис. 4

нонический [1] характер соподчиненности значимых локальных максимумов поперечных смещений работающего блока III по модулю $\sqrt{2}$ в шкале относительной временной задержки вертикального и горизонтального импульсных воздействий. При этом, если за базовое воздействие δt_0 принять 5,4 мс (этому значению на рис. 4 (кривая 2) соответствует ярко выраженный максимум для $d = 23$ мкм), то канонические значения ряда (в миллисекундах) $\delta t_0 = 5,4$; $\delta t_1^- = (1/\sqrt{2})\delta t_0 \cong 3,8$; $\delta t_2^- = (1/2)\delta t_0 \cong 2,7$; $\delta t_3^- = (1/(2\sqrt{2}))\delta t_0 \cong 1,9$; $\delta t_4^- = (1/4)\delta t_0 \cong 1,4$; $\delta t_6^- = (1/8)\delta t_0 \cong 0,7$; $\delta t_1^+ = \sqrt{2}\delta t_0 \cong 7,6$; $\delta t_2^+ = 2\delta t_0 \cong 10,8$; $\delta t_3^+ = 2\sqrt{2}\delta t_0 \cong 15,3$ с относительной точностью не менее 5% совпадают со значимыми локальными максимумами параметра d как функции δt (звездочки над осью δt на рис. 4). При этом энергетические характеристики импульсных воздействий для рассмотренных случаев существенно отличаются. Последнее обстоятельство свидетельствует о фундаментальности зависимости между δt и d , которое важно при задании оптимальных режимов воздействия на блочную систему для эффективного использования явления аномально низкого трения в различных технологических целях. Отметим также интересный факт, следующий из анализа графика для $W_v = 37$ мДж, $W_h = 24$ мДж (кривая 2 на рис. 4). Для $7,0 \text{ мс} < \delta t < 7,3 \text{ мс}$ наблюдается обратная к ожидаемой реакция блока, т. е. при указанном интервале задержки между действиями вертикального и горизонтального импульсов работающий блок начинает двигаться в сторону, противоположную вектору действия горизонтального импульса, что на первый взгляд является парадоксальным. Вне рамок представлений о роли шероховатых поверхностей блоков геоматериалов и резонансном механизме возникновения аномально низкого трения между ними вряд ли можно объяснить отмеченный феномен.

Используя зависимость, представленную на рис. 4, можно вычислить средние значения поперечных смещений работающего блока для случая взаимодействия горизонтального и вертикального импульсных воздействий. Нетрудно показать, что оперирование со средними значениями параметра d_m без учета параметра δt может приводить к неоднозначным заключениям по характеру связи реальных смещений d блоков с энергетическими уровнями импульсных воздействий. Иное дело, когда рассматривается та же взаимосвязь, но уже с позиций канонически соподчиненных по δt значимых локальных максимумов параметра d . Осреднение последних дает монотонно возрастающую зависимость d от энергетических параметров, в чем нетрудно убедиться, используя данные, приведенные на рис. 4.

Таким образом, в условиях совместного действия вертикального (на блочную систему) и горизонтального (на работающий блок) импульсных возбуждений эффект аномально низ-

кого трения наблюдается при обязательном выполнении канонического по модулю $(\sqrt{2})^i$ соотношения интервалов задержки δt_i между ними:

$$\delta t_i = (\sqrt{2})^i \delta t_0, \quad i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad \delta t_0 = 2\chi\Delta/V_i, \quad \chi = (\sqrt{2})^9 \cong 22,63,$$

где Δ — характерный линейный размер работающих блоков; V_i — скорость распространения продольных волн в геоматериалах блоков Δ . Этот вывод с очевидностью следует из работы [1] и сравнения основных несущих гармоник в высокочастотной (285,2 Гц) и низкочастотной (13,7 Гц) областях спектра графиков поперечных смещений силикатных блоков с базовой частотой $f_0 = V_i/(2\Delta)$.

Обнаруженный эффект имеет фундаментальное значение при изучении механизма землетрясений, горных ударов и других динамических форм проявления горного давления, а также может найти широкое применение в технических приложениях для решения задач, связанных с уменьшением трения между взаимодействующими телами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Волны маятникового типа. Ч. 2. Основные результаты физического моделирования // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1996. № 4. С. 3–39.
2. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Об эффекте аномально низкого трения в блочных средах // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1996. № 1. С. 3–16.
3. Курленя М. В., Опарин В. Н., Востриков В. И. Волны маятникового типа. Ч. 1. Состояние вопроса и измерительно-вычислительный комплекс // Физ.-техн. пробл. разраб. полез. ископаемых. 1996. № 3. С. 3–8.

Поступила в редакцию 14/IV 1998 г.
