



# Оптимизация составов полимерных строительных материалов с заданными технологическими и физико-механическими свойствами

Ю.А.Соколова, Д.Е.Жарин

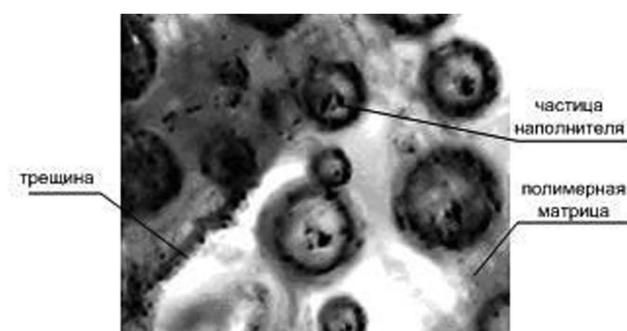
Технический прогресс в строительстве вызывает необходимость создания высокоэффективных полимерных материалов и изделий из них с заданными свойствами [1]. Современными тенденциями развития производства изделий из полимерных композиционных материалов (КМ) являются повышение их технологичности, снижение себестоимости за счет оптимизации составов [2]. В процессе изготовления и применения полимерных композиционных материалов возникает необходимость их механической обработки: резки, фрезерования, сверления [3]. Механическую обработку резанием используют для обеспечения повышенной точности геометрических размеров изделий при их сложной конфигурации, а также при малых объемах производства, когда использование трудоемкой и дорогостоящей технологической оснастки (пресс-форм) экономически нецелесообразно. Применение механической обработки в сочетании с оптимизацией составов полимерных КМ с заданными физико-механическими свойствами отвечает современным требованиям повышения технологичности производства изделий в строительстве.

Экспериментальные исследования проводили на эпоксидных, полиэфирных, эпоксиполиуретановых КМ. В качестве матричных компонентов использовали эпоксидную смолу ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), дибутилфталат (ДБФ) (ГОСТ 8728-88), полиэтиленполиамин (ПЭПА) ТУ 2413-357-00203447-99, полиэфирную смолу 540-М 888, пероксид №1 (раствор перекиси метилэтилкетона в диметилфталате), простой полиэфир (Сарэл А-04) и полизицианат (Сарэл Б-04). Наполнителями КМ служили диабаз ( $\rho_u = 2900 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $S_{уд} = 80 \div 780 \text{ м}^2/\text{кг}$  ( $\rho_u$  – истинная плотность наполнителя;  $S_{уд}$  – удельная поверхность наполнителя), маршалит ( $\rho_u = 2650 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $S_{уд} = 80 \div 780 \text{ м}^2/\text{кг}$ ),

ПЦ 400 ДФ ( $\rho_u = 3100 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $S_{уд} = 80 \div 780 \text{ м}^2/\text{кг}$ ). В рецептуре варьировали объемным содержанием и удельной поверхностью наполнителей. В качестве испытательного оборудования использовали вертикально-сверлильный станок модели 2С132 с применением сверл (ГОСТ 10902-77) Р6М5  $\varnothing 10 \div 20 \text{ мм}$ , вертикально-фрезерный станок модели 6Р11ФЗ с применением концевых цилиндрических фрез Р18  $\varnothing 15 \div 32 \text{ мм}$ . Оценку физико-механических свойств и качества обработанных КМ проводили по измеренным величинам динамического модуля упругости  $E_d$ , предела прочности при одноосном сжатии  $R_{сж}$ , твердости по Бринеллю  $HB_{бр}$ , условно-мгновенного модуля упругости  $E_o$ , равновесного модуля упругости  $E_{yb}$ , шероховатости поверхности  $R_a$  согласно действующим ГОСТам и нормативным документам. Испытания образцов из КМ, полученных механической обработкой с использованием осевого инструмента, проводили на образцах, поверхность которых предварительно фрезеровалась.

Установлено, что введение высокомодульных (маршалит, диабаз, портландцемент) наполнителей в полиэфирный, эпоксидный и эпоксиполиуретановый КМ приводит к существенному повышению физико-механических свойств КМ (для полиэфирных КМ:  $E_d$  до 60%,  $R_{сж}$  до 64%,  $HB_{бр}$  до 60%; эпоксидных КМ:  $E_d$  до 50%,  $R_{сж}$  до 60%,  $HB_{бр}$  до 55%; эпоксиполиуретановых КМ:  $E_d$  до 50%,  $R_{сж}$  до 63%,  $HB_{бр}$  до 61%) и качества обработанных поверхностей (снижение  $R_a$  на 10–20%). В ходе экспериментальных исследований установлено, что механическая обработка КМ возможна при условии, что  $\vartheta \leq 0,4$  ( $\vartheta$  – объемное содержание наполнителя), так как при  $\vartheta > 0,4$  происходит разрушение композита вследствие механодеструкции материала. Даные прочностных исследований образцов, подвергнутых

a)



б)

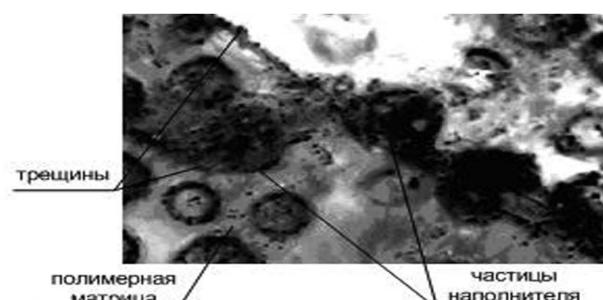


Рис. 1. Микроструктуры образцов, подвергнутых механической обработке ( $\times 200$ ):

а) сверлением; б) фрезерованием: ЭД-20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.; маршалит –  $\vartheta = 0,3$



механической обработке, показывают, что с ростом объемного содержания высокомодульного наполнителя в исследуемом интервале наполнения увеличивается  $R_{\text{сж}}$ . При сжатии основная часть механической энергии рассеивается вследствие ветвления трещин и их торможения частицами наполнителя, что способствует упрочнению КМ (рис. 1).

Получены результаты исследований влияния агрессивных сред на свойства обработанных и необработанных образцов из КМ. В процессе механической обработки в полимерном материале образуются трещины, сколы, внутренние дефекты, в связи с этим массопоглощение полимерных композитов возрастает (для эпоксидных КМ в воде – на 22–31% и в смазочно–охлаждающей жидкости (СОЖ) – на 20–30%; для полиэфирных КМ в воде – на 25–35% и в СОЖ – на 22–32%; для эпокси–полиуретановых КМ в воде – на 20–30% и в СОЖ – на 17–25%).

При формировании структуры полимерных КМ одновременно протекают два процесса: 1) упрочнение за счет перевода матричного материала в контактном пространстве между частицами наполнителя из его объемного состояния в пленочное с более высокой прочностью и структурированностью, что объясняется топологической моделью Шкловского–де Жена [2, 4]; 2) разупрочнение вследствие различия упругих постоянных, а также коэффициентов линейного термического расширения материалов наполнителя и матрицы.

В КМ можно выделить четыре основных структурных элемента [2, 4], которыми являются цепочка из частиц наполнителя, связанных между собой упрочненными пленочными прослойками полимерной матрицы; ячейка, образованная цепочечными элементами; структурный каркас, сформированный из цепочечных и ячеистых элементов; структурный кар-

кас, сформированный в основном из ячеистых элементов. Каждый из четырех элементов характеризуется определенным универсальным критическим индексом:  $\beta_3$  описывает цепочное строение переколяционного кластера, отвечает за изменение массопоглощения КМ;  $\nu_3$  определяет ячеистое строение переколяционного кластера, отвечает за изменение прочностных свойств КМ;  $t_3$  в фрактальном рассмотрении идентифицирует крупноячеистый остов фрактального переколяционного каркаса, отвечает за изменение упругих свойств КМ;  $\gamma^3$  отвечает за тупиковые ветви структурного каркаса переколяционного кластера и объясняет характер изменения физико–механических свойств КМ [2, 4].

В результате проведенного теоретико–экспериментального анализа с учетом переколяционных моделей и классических зависимостей [4] установлено, что для необработанных и обработанных образцов из КМ:

$$E_c = \frac{E_m E_f + [E_m \vartheta + E_f (1 - \vartheta)] \cdot b_{\text{упр}} \cdot S_{\text{уд}} \cdot k_{\text{уд}}}{E_m \vartheta + E_f (1 - \vartheta)}, \quad (1)$$

где  $E_m$  – модуль упругости матричного материала;  $E_f$  – модуль упругости материала наполнителя;  $b_{\text{упр}}$  – постоянный коэффициент, равный тангенсу угла наклона зависимости  $E_{\text{уд}} = f(S_{\text{уд}})$  (аналогично определяется коэффициент  $b_{\text{сж}}$ );  $k_{\text{уд}}$  – поправочный коэффициент:

$$k_{\text{уд}} = \left( 1 - \frac{S_{\text{уд},0}}{S_{\text{уд}}} \right).$$

Предел прочности при одноосном сжатии КМ эффективно описывается переколяционной зависимостью [4]:  $R_{\text{сж},c} = R_{\text{сж},m} (1 + \alpha_{\text{сж}} \vartheta^v)$ , где  $R_{\text{сж},c}$  и  $R_{\text{сж},m}$  – предел прочности при одноосном сжатии композиционного и матричного материала;  $\alpha_{\text{сж}} = \frac{R_{\text{сж},1}}{R_{\text{сж},m}}$  – предел прочности при одноосном сжатии единичного элемента композита;  $v$  – критический индекс. Концентрационная зависимость твердости имеет вид:

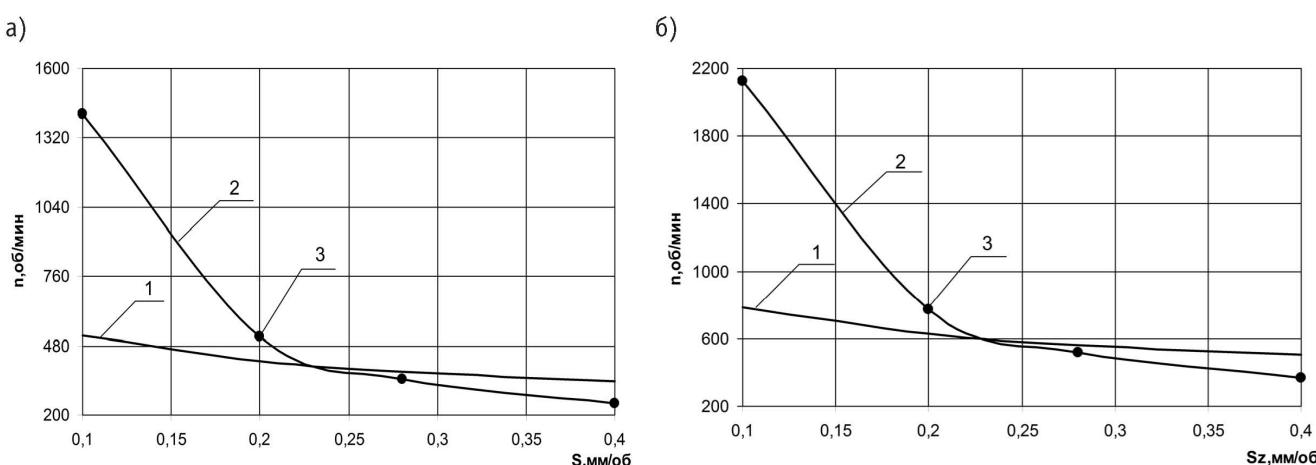


Рис. 2. Технологические параметры механической обработки КМ:  
(а) при сверлении и (б) при фрезеровании (ЭД–20 – 100 мас.ч.; ПЭПА – 11 мас.ч.; ДБФ – 5 мас.ч.; марсалит –  $\vartheta = 0,3$ ):  
1 –  $n(S)$ , построенные по тейлоровской модели; 2 –  $n(S)$ , построенные по модели (6) и (7); 3 – экспериментальные данные



$$HB_{\text{бр.с}}(\vartheta) = \frac{R_{\text{сж.с}}(\vartheta)}{K_{\text{сж}}} = \frac{R_{\text{сж.м}} \cdot (1 + \alpha_{\text{сж}} \cdot \vartheta^n)^3 + b_{\text{сж}} \cdot S_{\text{уд}} \cdot k}{K_{\text{сж}}}, \quad (2)$$

где  $HB_{\text{бр.с}}(\vartheta)$  – твердость КМ;  $K$  – коэффициент пропорциональности между  $R_{\text{сж.с}}(\vartheta)$  и  $HB_{\text{бр.с}}(\vartheta)$ , характеризующий зависимость между объемными и поверхностными свойствами КМ:  $K_{\text{сж}} = \frac{R_{\text{сж.м}}}{HB_{\text{бр.с}}}$ ;  $HB_{\text{бр.м}}$  – твердость матричного материала. Зависимости условно–мгновенного модуля упругости и равновесного модуля упругости полимерных КМ от объемного содержания наполнителей описываются полиномиальными моделями.

В ходе теоретико–экспериментальных исследований получено уравнение (3), описывающее закономерность массопоглощения эпоксидных, полиэфирных, эпоксиполиуретановых дисперсно–наполненных КМ:

$$\Delta m = \Delta m_{\text{m}} [1 - e^{-k(t-\tau)}], \quad (3)$$

где  $\Delta m_{\text{m}}$  – асимптотическое значение массопоглощения полимерного наполненного КМ (в воде –  $\Delta m_{\text{m}} = 0,80\text{--}2,69\%$ ; в СОЖ –  $= 1,18\text{--}3,25\%$ );  $k = \frac{1}{T}$ ;  $T$  – время, за которое параметр  $\Delta m(t)$  изменяется в  $e$  раз (в воде  $T=14\text{--}25$  суток; в СОЖ  $T=15\text{--}22$  суток);  $t$  – текущее значение времени;  $\tau$  – время переходного запаздывания (в воде и в СОЖ  $\tau=0\text{--}2$  суток).

КМ характеризуются многокомпонентностью, что определяет сложность выбора оптимальных составов для производства строительных изделий с заданными свойствами. Задачу оптимизации свойств КМ можно свести к двум последовательным задачам одномерного поиска экстремума [6]. На первом этапе оптимизируется состав полимерной матрицы, находят экстремум целевой функции  $F(x)$ :

$$F(x) = c_1 \cdot \frac{f_1(x)}{f_{n1}(x)} + c_2 \cdot \frac{f_2(x)}{f_{n2}(x)}, \quad (4)$$

где  $x$  – массовое содержание матричных компонентов;  $f_1(x)$  – функция, определяемая эксплуатационными показателями;  $f_2(x)$  – функция, определяемая стоимостью компонентов;  $f_{n1}(x)$ ,  $f_{n2}(x)$  – нормирующие значения соответствующих показателей;  $c_1$ ,  $c_2$  – весовые коэффициенты ( $\sum_{i=1}^2 c_i = 1$ ), которые определяются условиями эксплуатации композитов.

Второй этап оптимизации служит для определения объемного содержания наполнителя. Выбирается функциональный наполнитель и определяется оптимальное содержание из условия максимума целевой функции  $F(\vartheta)$ :

$$F(\vartheta) = c_1 \cdot \frac{f_1(\vartheta)}{f_{n1}(\vartheta)} + c_2 \cdot \frac{f_2(\vartheta)}{f_{n2}(\vartheta)}. \quad (5)$$

Для расчета режимов обработки при сверлении и фрезеровании эпоксидных, полиэфирных, эпоксиполиуретановых КМ в настоящее время используют стойкостные модели тейлоровского типа [7, 8].

В ходе экспериментальных исследований установлено, что технологические параметры обработки КМ, полученные по тейлоровским моделям, плохо коррелируют с экспериментальными данными в области низких подач (где  $n$  – частота вращения шпинделя,  $S_z$  – подача на зуб фрезы) (рис.2).

В этой связи получены экспоненциальные модели стойкости, учитывающие физико–механические свойства и коррозионную стойкость обрабатываемых полимерных КМ:

– для операции сверления

$$V = \frac{C_v \cdot D^{x_v} \cdot K_v \cdot e^w}{T^m \cdot S_z^{y_v}} \cdot \left( \frac{E_c}{E_m} \cdot k_{m, \text{упр}} \right)^{z1} \times \\ \times \left( \frac{R_{\text{сж.с}} \cdot k_{m, \text{сж}}}{R_{\text{сж.м}}} \right)^{z2} \cdot \left( \frac{R_{\text{сж.с}} \cdot k_{m, \text{HB}}}{R_{\text{сж.м}}} \right)^{z3} \cdot k_o^{z4} \cdot k_y^{z5}, \quad (6)$$

– для операции фрезерования

$$V = \frac{C_v \cdot D^{w_v} \cdot K_v \cdot e^w}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{z_v} \cdot z^{g_v}} \cdot \left( \frac{E_c}{E_m} \cdot k_{m, \text{упр}} \right)^{z1} \cdot \\ \times \left( \frac{R_{\text{сж.с}} \cdot k_{m, \text{сж}}}{R_{\text{сж.м}}} \right)^{z2} \cdot \left( \frac{R_{\text{сж.с}} \cdot k_{m, \text{HB}}}{R_{\text{сж.м}}} \right)^{z3} \cdot k_o^{z4} \cdot k_y^{z5} \quad (7)$$

где  $C_v$  – коэффициент факторов, не входящих в уравнение в явном виде (физико–технические свойства обрабатываемого материала и осевого инструмента);  $D$  – диаметр инструмента;  $K_v$  – коэффициент, учитывающий отличие конкретных условий работы инструмента от принятых за основу;  $T$  – лимитируемое время работы инструмента;  $x_v$ ,  $y_v$ ,  $m$ ,  $w_v$ ,  $g_v$ ,  $n_v$  – коэффициенты технологических параметров обработки;  $B$  – ширина срезаемого слоя;  $Z$  – количество режущих кромок инструмента;  $w$  – показатель степени, зависящий от  $D$ ,  $S$ ,  $T$ ;  $k_{m, \text{сж}} \cdot k_{m, \text{HB}} \cdot k_{m, \text{упр}}$  – коэффициенты стойкости в агрессивных средах;  $E_c$  и  $E_m$  – модуль упругости наполненного КМ и матричного материала;  $R_{\text{сж.с}}$  и  $R_{\text{сж.м}}$  – предел прочности при одноосном сжатии КМ и матричного материала;  $k_o$  – коэффициент, характеризующий условно–мгновенный

модуль упругости наполненного КМ:  $k_o = \frac{E_{\text{oc}}}{E_{\text{om}}}$ ,  $E_c$  и  $E_{\text{om}}$  – условно–мгновенный модуль упругости наполненного КМ и матричного материала;  $k_y$  – коэффициент, характеризующий равновесный модуль упругости наполненного КМ:  $k_y = \frac{E_{\text{yuc}}}{E_{\text{ywm}}}$ ,  $E_{\text{yuc}}$  и  $E_{\text{ywm}}$  – равновесный модуль упругости наполненного КМ и матричного материала;  $z_1 \dots z_5$  – соответствующие показатели степени.

Режимы резания КМ, полученные по технологическому критерию [9], оказываются экономически нецелесообразными ввиду повышенного износа режущего инструмента. Разработаны обобщенные критерии для операции сверления ( $F_{\text{ок.св}}$ ) и фрезерования ( $F_{\text{ок.ф}}$ ), учитывающие экономические и технологические показатели:



$$\begin{aligned} F_{ok,ce}(n, S) = & \frac{L}{n \cdot S} \cdot [k_{ct} + k_{zn} + \\ & + \frac{k_{uh} \cdot (n \cdot S^{y_v})^{1/m}}{(k+1)(318 \cdot C_v \cdot D^{x_v-1} \cdot e^w \cdot K_v \cdot \left( \frac{E_c}{E_m} \cdot k_{m,y,np} \right)^{z1})^{1/m}} \times \\ & \times \frac{1}{\left( \frac{R_{cik,c}}{R_{cik,m}} \cdot k_{m,cik} \right)^{z2} \cdot \left( \frac{R_{cik,c}}{R_{cik,m}} \cdot k_{m,H_B} \right)^{z3}} \cdot k_o^{z4} \cdot k_{yb}^{z5})^{1/m}], \quad (8) \\ F_{ok,fp}(n, S_z) = & \frac{L}{n \cdot S_z} \cdot [k_{ct} + k_{zn} + \\ & + \frac{k_{uh} \cdot (n \cdot S_z^{y_v} \cdot B^{n_v} \cdot z^{g_v} \cdot t^{x_v})^{1/m}}{(k+1)(318 \cdot C_v \cdot D^{w_v-1} \cdot e^w \cdot K_v \cdot \left( \frac{E_c}{E_m} \cdot k_{m,y,np} \right)^{z1})^{1/m}} \times \\ & \times \frac{1}{\left( \frac{R_{cik,c}}{R_{cik,m}} \cdot k_{m,cik} \right)^{z2} \cdot \left( \frac{R_{cik,c}}{R_{cik,m}} \cdot k_{m,H_B} \right)^{z3}} \cdot k_o^{z4} \cdot k_{yb}^{z5})^{1/m}], \quad (9) \end{aligned}$$

где  $L$  – длина рабочего хода осевого инструмента;  $k_{cm}$  – стоимость одной минуты работы станка;  $k_{zn}$  – стоимость одной минуты рабочего времени работника;  $k_{uh}$  – стоимость инструмента;  $k$  – число переточек инструмента, зависящее от марки инструментального материала и его конструкции.

При условии однокритериальной задачи для нахождения оптимальных режимов резания композиционных материалов использовали симплекс-метод, а для решения многокритериальной задачи – множество Парето. При этом критериями оптимизации являлись:

$$\text{для сверления } U_{\max} = -F_t(n, S_z) = \frac{t}{n \cdot S_z} \text{ и}$$

$$V_{\max} = -F_{ok,ce}(n, S);$$

$$\text{для фрезерования } U_{\max} = -F_t(n, S) = \frac{t}{n \cdot S} \text{ и}$$

$$V_{\max} = -F_{ok,fp}(n, S_z).$$

Для нахождения компромиссного решения использовали метод идеальной точки, а в качестве координат целевой точки выбирали сочетание наилучших значений.

С применением  $F(x)$ ,  $F(\mathcal{G})$ ,  $F_t(n, S_z)$ ,  $F_{ok,ce}(n, S)$  и  $F_{ok,fp}(n, S_z)$  установлены режимы обработки и определены высокотехнологичные составы композитов для производства строительных изделий с заданными свойствами. Полученные по рекомендуемым режимам механической обработки изделия из полимерных композитов по показателю качества  $R_a$  превосходят изделия, изготовленные по справочным классическим моделям [10].

#### Литература

1. Микульский В.Г. Строительные материалы. М., Издательство «АСВ», 2000.
2. Жарин Д.Е. Научные основы получения вибропоглощающих строительных полимерных композитов: Автореферат докторской. Казань, 2006.
3. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов, Л., «Машиностроение», 1987.
4. Соломатов В.И. Синергетика композитных материалов, М., «ЦКТ», 1999.
5. Борышев А.Н. Структура, свойства и производство композитных материалов, М., «Academia», 2009.
6. Подиновский В.В., Гаврилов В.М. Оптимизация по последовательно применяемым критериям. М., «Сов. Радио», 1975.
7. Штучный Б.П. Обработка пластмасс резанием. Справочное пособие, М., «Машиностроение», 1974.
8. Ящерицын П.И., Фельдштейн Е.Э., Корниевич М.А. Теория резания. Мн., «Новое знание», 2006.
9. Симонова Л.А. Управление процессом обработки партии деталей (с применением математического моделирования на этапе технологического проектирования). Набережные Челны, Изд-во Камского государственного политехнического института, 2004.
10. Кобаяши А. Обработка пластмасс резанием. Перев. с англ. М., «Машиностроение», 1974.

#### Optimisation of Structures of Polymeric Building Materials with the Set Technological and Physicomechanical Properties.

By Yu.A.Sokolova, D.Ye.Zharin

*Epoxy and polyester composites are investigated in the article. Models of calculation of physicomechanical properties and modes of cutting of composite materials are presented. Criteria and methods of optimisation of physicomechanical and technological properties and modes of processing of composite materials are offered.*

**Ключевые слова:** композиты, оптимизация, эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые.

**Key words:** Composites, optimisation, epoxy, polyester, polyuretan



## Виброзащита высокоточного оборудования от низкочастотных колебаний

В.Л.Мондрус, В.А.Смирнов

В настоящее время с развитием прецизионной аппаратуры (электронные туннельные микроскопы, сейсмографы, координатно-расточные станки) резко повысились требования по виброзащите. Зачастую предприятия, использующие такое оборудование, расположены в черте города, который имеет свой естественный уровень низкочастотных вибраций. Для защиты от колебаний обычно используются линейные виброзащитные системы, эффективность работы которых характеризуется коэффициентом передачи силы  $K_c$ , равному отношению наибольшей силы, передаваемой основанию, к амплитуде гармонической возмущающей силы. Коэффициент  $K_c$  становится меньше 1 при  $\eta \geq \sqrt{2}$  (где  $\eta$  – отношение частоты возмущающей силы к частоте собственных колебаний). Для линейных виброизолаторов невозможно успешно гасить колебания ( $K_c > 1$ ) на частотах, когда  $\eta < \sqrt{2}$ . Обычно принимают  $\eta \geq 4$ . При этом  $K_c$  должен быть меньше 1/15 [1]. Естественный фон города представляет собой набор осцилляций с частотами 0,5 – 2 Гц и наибольшими амплитудами до 12–14 мкм как показано на рисунке 1. Кроме того, если предполагаемая установка располагается не у основания сооружения (в подвале), а на каком-либо его этаже, колебания самого здания накладываются на колебания от естественного

фона, что приводит к появлению нескольких резонансных пиков при частотах 0,5–1,5 Гц. Следовательно, применение линейных виброизолаторов в этом случае нецелесообразно.

Для эффективной виброзащиты от низкочастотных возмущений желательно иметь крайне низкую частоту собственных колебаний виброизолированной установки. Изготовление и эксплуатация виброизолированной системы с линейной упругой характеристикой, обладающей собственной частотой колебаний ниже 2 Гц, сопряжены с большими техническими трудностями. Напротив, если упругая характеристика виброизоляции нелинейна, то параметры упругих элементов можно подобрать таким образом, чтобы жесткость системы в некотором диапазоне перемещений виброизолированного объекта равнялась нулю [2].

При выполнении работ по данной тематике были разработаны и исследованы установки с различными упругими элементами [3, 4]. Так, по результатам работы [4] обосновано применение пружин и резиновых элементов в качестве упругих элементов. В ходе исследований и конструкторского анализа предложена следующая принципиальная схема установки.

Она состоит из двух рычагов, шарнирно соединенных с виброизолируемой массой, как показано на рисунке 2. Один конец рычагов шарнирно соединен с корректором жесткости – упругим элементом, работающим на растяжение, жесткостью  $C_1$ . Другим концом рычаги на шарнире крепятся к виброизолируемой массе. Также рычаги имеют на расстоянии  $d_1$  от оси установки шарнирное крепление вертикальных «грузовых» упругих элементов жесткостью  $C_2$ . Такое расположение «грузовых» упругих элементов позволяет, во-первых, использовать «мягкие» пружины или резиновые элементы, так как на каждый из элементов будет приходиться половина нагрузки от виброизолируемой массы. Во-вторых, такое расположение пружин позволяет регулировать вертикальную жесткость системы при изменении нагрузки путем изменения расстояния  $d_1$ .

Данная работа посвящена исследованию поведения системы (рис. 2) с применением в качестве упругих элементов линейных пружин.

Для расчета удобнее иметь приведенную вертикальную жесткость системы –  $C$ . Ее можно получить, если придать

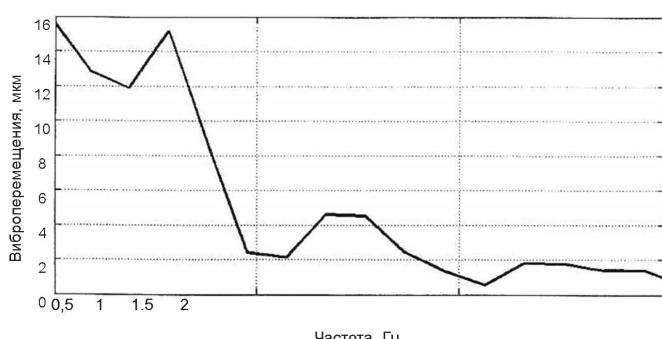


Рис. 1. Виброграмма естественного шума

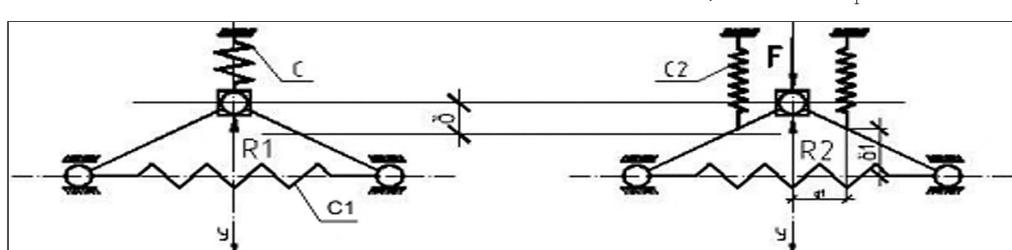


Рис. 2. Принципиальная схема рассматриваемой установки с возможностью регулирования вертикальной жесткости системы