

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

УДК 622.271:550.34.016: 699.842

А. Г. Новиньков, С. И. Протасов, А. С. Гукин

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КРИТЕРИЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЗДАНИЙ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ ОТ МАССОВЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ

В 2008 году введен в действие ГОСТ Р 52892-2007 [1], определяющий максимально допустимые уровни вибрации, в том числе от сейсмических воздействий при массовых промышленных взрывах. Оценка воздействий в соответствии с указанным документом базируется на риске появления повреждений конструкции, способных снизить ее эксплуатационную надежность, и предназначена для зданий, рассчитанных на статические нагрузки без предъявления специальных требований в отношении сопротивления к действию динамических сил. В рекомендательном Приложении «Б» указанного стандарта приведены критерии безопасных уровней вибрации, принятые в нормативных документах США, Великобритании, Германии [2, 3, 4]. При этом предполагается, что при соблюдении рекомендаций упомянутого приложения риск минимальных повреждений конструкций здания будет незначительным. Причем особо оговаривается, что выбор того или иного критерия должен быть согласован между заинтересованными сторонами. Все рекомендуемые в указанном приложении критерии используют в качестве контролируемого параметра вибрации скорость колебаний в основании защищаемого объекта или на его фундаменте. При этом три из четырех рекомендуемых безопасных параметров колебаний являются частотно-зависимыми, т.е. предельно допустимая скорость колебаний земной поверхности (или фундамента на уровне земной поверхности) зависит от доминирующей частоты колебаний, получаемой в свою очередь из процедуры преобразования Фурье.

Предельно допустимые уровни колебаний по ГОСТ Р 52892-2007 в зависимости от ссылочного зарубежного нормативного документа могут отличаться в несколько раз. Так, например, для жилых зданий с доминирующей частотой колебаний

10 Гц предельно допустимая скорость колебаний согласно [4] составляет 5 мм/с, а по [3] эта величина равна 18 мм/с. Для производственных зданий предельно допустимая скорость колебаний на уровне поверхности земли согласно [4] составляет 20 мм/с для сейсмического воздействия с преобладающей частотой колебаний 10 Гц, а для аналогичного здания по [3] предельно допустимая величина скорости колебаний составляет 50 мм/с. Таким образом, для принятия правильного решения о выборе значения критерия сейсмобезопасности, необходимо знать историю появления и развития этих критериев. Поскольку в нормативной литературе для строительства в районах с высокой природной сейсмической активностью [5 - 7] в качестве параметра, характеризующего интенсивность сейсмического воздействия, используется некоторое «эффективное» ускорение, то первым этапом в исследовании критериев сейсмической опасности при массовых промышленных взрывах стало изучение вопроса о причине использования в качестве критерия именно скорости колебаний грунта или фундамента.

В отечественной литературе не так много достоверных исследований, посвященных статистическому анализу повреждаемости зданий при массовых промышленных взрывах. Одним из наиболее полных исследований является [8]. Указанная работа дает статистическую оценку повреждаемости зданий в зависимости от приведенного расстояния от них до места ведения взрывных работ. После этого полученная статистика повреждений сопоставляется со скоростью колебаний земной поверхности, ссылаясь на работы М. А. Садовского, выполненные в начале 1940-х годов, которые соотносят повреждения зданий с максимальной скоростью колебаний. При этом статистическое обоснование предпочтительности использования

именно скорости колебаний в качестве критерия повреждаемости зданий и сооружений отсутствует и в [8], и в ряде других работ, связанных с данной тематикой.

Так как рекомендуемые безопасные параметры колебаний по [1] приводятся на основании зарубежных нормативных документов, то для подтверждения возможности их применения в отечественных условиях следует обратиться к истории появления и развития этих критериев. Такая попытка была предпринята авторами настоящей статьи на примере нормирования сейсмических воздействий при массовых промышленных взрывах в США. До принятия в 1977 г. Федерального Общественного Закона 95-87 [9] сейсмическая безопасность при промышленных взрывах регулировалась законодательством на уровне отдельных штатов и организаций, при этом общефедеральные критерии сейсмической безопасности отсутствовали. Так, например, в штате Пенсильвания в качестве критерия сейсмической безопасности было принято значение максимального смещения грунта 0,03 дюйма (примерно 0,76 мм). В штатах Нью-Джерси и Массачусетс за критерий безопасности сейсмических колебаний был принят параметр, названный «энергетическим отношением» и соответствующий величине a^3/f^3 (где a – пиковое ускорение грунта, ; f – доминирующая частота, Гц). За безопасный уровень энергетического отношения была принята величина равная 1 фут $^3/c^2$.

После принятия Закона 95-87 Департаментом внутренних дел США было инициировано рассмотрение предложений для обеспечения безопасного ведения взрывных работ, в том числе и по критерию безопасности при сейсмических колебаниях. За основу первоначального варианта Правил ведения взрывных работ были приняты результаты работы [10], в которой была сделана попытка статистически обосновать предпочтительность использования в качестве критерия сейсмической опасности максимальной скорости колебаний земной поверхности в сравнении с другими параметрами колебаний, такими как максимальные ускорения или смещения. Выводы данной работы, в свою очередь, основывались на результатах наиболее полных на тот момент исследований повреждений от сейсмических воздействий при массовых промышленных взрывах [11, 12], а также на анализе ряда собственных исследований Бюро горных работ Департамента внутренних дел США, перечень которых представлен в [10]. Заключение о статистической предпочтительности

использования скорости колебаний земной поверхности было сделано на основании следующей процедуры. Данные о повреждениях, полученные из [11, 12], а также из результатов собственных исследований Бюро горных работ, разбивались на группы в соответствии с зафиксированными уровнями повреждений, полученными в результате сейсмических воздействий от промышленных взрывов. Разбивка производилась по трем группам: здания без повреждений, здания с незначительными (*minor*) повреждениями и здания с существенными (*major*) повреждениями. Далее, для групп с незначительными и существенными повреждениями строились линии регрессии, раздельно как по каждому ссылочному источнику, так и по каждой группе повреждений. Линии регрессии строились в логарифмических шкалах в системе координат «преобладающая частота колебаний, Гц – максимальное смещение грунта, дюймы». Пример линии регрессии с нанесенными исходными экспериментальными точками, взятый из работы [10], представлен на рисунке. После построения линий регрессии выдвигались статистические нулевые гипотезы о том, что тангенсы углов наклона этих линий равны -2, -1 и 0 для каждой группы повреждений. Для гармонических колебаний имеет место связь между максимальной скоростью колебаний и максимальным смещением земной поверхности вида

$$V_{max} = d_{max} \cdot 2\pi f,$$

где f – частота колебаний в Гц.

Кроме того, тангенс угла наклона линии регрессии для смещений и скоростей колебаний земной поверхности можно записать в виде

$$\operatorname{tg}(\alpha_{disp}) = \lg\left(\frac{d_{i+1} - d_i}{f_{i+1} - f_i}\right) \text{ и } \operatorname{tg}(\alpha_{vel}) = \lg\left(\frac{v_{i+1} - v_i}{f_{i+1} - f_i}\right),$$

где d_i, v_i и f_i – максимальные смещения, скорости и преобладающие частоты колебаний соответственно для любой i -ой точки на линии регрессии.

Элементарными преобразованиями можно показать, что тангенс угла наклона линии регрессии для скорости связан с тангенсом угла наклона линии регрессии для смещения как

$$\operatorname{tg} \alpha_{vel} = \operatorname{tg} \alpha_{disp} + 1.$$

Аналогичная зависимость связывает тангенс угла наклона линии регрессии ускорения с тангенсом угла наклона линии регрессии скорости:

$$\operatorname{tg} \alpha_{acc} = \operatorname{tg} \alpha_{vel} + 1.$$

Равенство нулю тангенса угла наклона регрессионной прямой для какого-либо параметра колебаний соответствует отсутствию зависимости этого параметра от преобладающей частоты и, следо-

вательно, отсутствию корреляции между ним и частотой.

Подтверждение нулевой гипотезы $\text{tg } a_{\text{disp}} = -1$ соответствовало согласию с отсутствием корреляции между скоростью колебаний и преобладающей частотой, на основании чего делался вывод, что в этом случае повреждаемость зданий зависит только от скорости. Проверки статистических гипотез выполнялись с использованием критерия Стьюдента при 1%-ом уровне значимости критерия. Тестирование показало, что гипотеза отсутствия корреляции между соответствующим пара-

метром колебаний и преобладающей частотой не может быть отвергнута при тангенсе угла наклона линии регрессии равном -1 только в одном случае из шести. При углах наклона, равных -2 и 0 нулевые гипотезы не должны быть отвергнуты в двух случаях из шести и одном случае из шести соответственно. Так как t-тесты показали неоднозначность результатов – нулевая гипотеза имела право на существование в некоторых случаях и при тангенсе угла наклона регрессии равном -2, и при 0 – то дополнительно был выполнен регрессионный анализ для двух объединенных выборок для не-

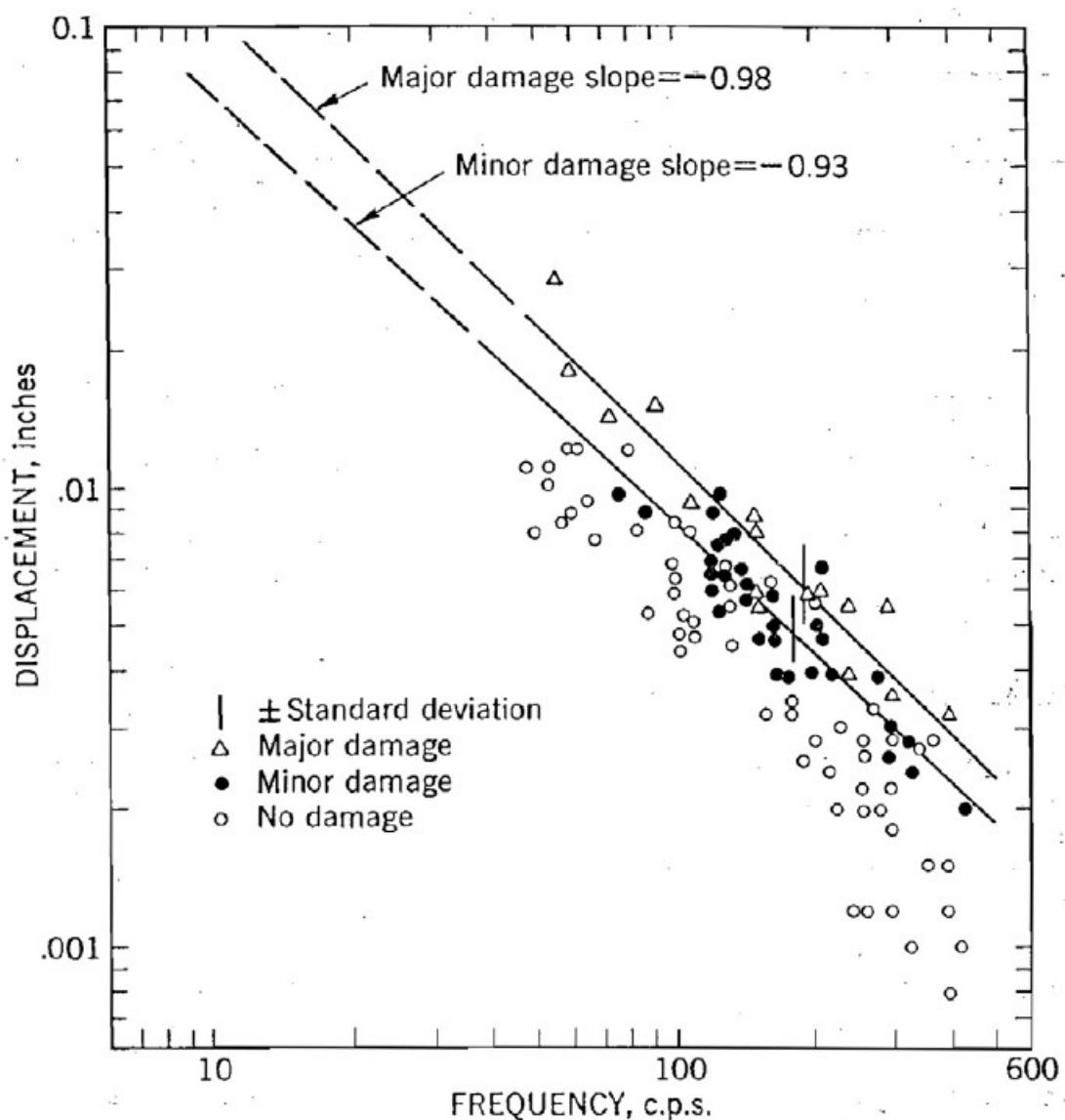


FIGURE 2. - Displacement Versus Frequency for Observed Damage. Lanaefors.

Зависимость максимальных смещений от доминирующей частоты колебаний для наблюденных повреждений [10], по данным из [11]. По оси абсцисс отложена доминирующая частота, Гц, по оси ординат – пиковая скорость колебаний, дюйм/с

значительных и для существенных повреждений. Результаты анализа показали, что результаты всех трех исследований для $\operatorname{tg} \alpha_{disp} = -1$, как для незначительных, так и для существенных повреждений могут быть отнесены к одной выборке. После этого был проведен окончательный анализ этих объединенных выборок, как для незначительных, так и для существенных повреждений, который показал, что в обоих случаях не может быть отвергнута толькунулевая гипотеза $H_0: \operatorname{tg} \alpha_{disp} = -1$, что соответствует отсутствию корреляции между скоростью колебаний и доминирующей частотой. На основании этого был сделан вывод, что максимальная скорость колебаний лучше всего связана с наблюденными повреждениями.

С таким подходом к определению тесноты связи повреждений с параметрами колебаний нельзя согласиться в полной мере. Для этого существуют две основные причины. Прежде всего, при определении корреляции между повреждениями и параметрами колебаний совершенно не учитывались здания, не получившие повреждения. Здравый смысл говорит, что важно не только абсолютное количество зданий, получивших повреждения при данном уровне колебаний, но и частота появления повреждений по отношению к общему числу наблюдавшихся зданий при тех же уровнях сотрясений земной поверхности. Кроме того, использованный в [10] ход решения не соответствует поставленной задаче. По сути дела давался ответ не на вопрос «какой параметр колебаний лучше всего коррелирует с повреждениями», а выяснялось, какой параметр колебаний не зависит от доминирующей частоты при корреляции с наблюдавшимися повреждениями. Т.е. выяснялся параметр колебаний, какой мог бы служить однопараметрическим критерием сейсмической опасности. Однако, последние, действующие, редакции нормативных документов и США, и Великобритании, и Германии используют двухпараметрические критерии сейсмической опасности при массовых промышленных взрывах – максимально допустимую скорость колебаний, как функцию от доминирующей частоты колебаний, что противоречит смыслу указанной статьи.

Таким образом, возникла необходимость дополнительного статистического подтверждения обоснованности выбора максимальной скорости колебаний в качестве критерия сейсмической опасности для зданий. Для решения поставленной задачи использовался критерий ранговой корреляции Спирмена. Выбор данного способа оценки

тесноты связи между параметрами колебаний земной поверхности и полученными повреждениями обусловлен возможностью использования в анализе данных о неповрежденных зданиях. Конечно, переход от номинальной шкалы к порядковой может сопровождаться некоторым снижением точности результатов. Однако точность решения не может быть выше точности исходных данных. Учитывая, что в исходных исследованиях [10-12] скорости и ускорения, как правило, получались не прямым интегрированием уравнений смещения грунта, а с использованием упрощенных зависимостей, характерных только для гармонических колебаний, а оценки доминирующих частот выполнялись достаточно грубым способом, например, по пересечению нулевой линии, то можно считать, что переход на порядковые шкалы не приведет к существенному искажению результатов.

Исходные данные были получены оцифровкой рисунков в [10]. Первому рангу соответствовали здания без повреждений, второму рангу – здания с минимальными (минорными) повреждениями и третьему рангу – здания, получившие существенные (мажорные) повреждения. Возможное искажение исходных данных, которое могло иметь место при оцифровке, оценивалось сравнением статистических характеристик, полученных по данным оцифровки со значениями, приведенными в исходной статье [10]. Результаты сравнения показали хорошую сопоставимость исходных данных, пример сравнения для $\operatorname{tg} \alpha_{disp} = -1$ приведен в табл. 1.

Коэффициент парной ранговой корреляции Спирмена определялся раздельно для каждого исследования по формуле [13]:

$$\rho = 1 - \frac{6 \cdot \Sigma d^2 - A - B}{\sqrt{(n^3 - n - 12A)(n^3 - n - 12B)}}$$

где d – разность рангов в соответствующих строках двух переменных;

A и B – поправки на одинаковые ранги для каждой переменной;

n – количество пар переменных.

Значимость коэффициента корреляции проверялась на основе t -критерия Стьюдента [13]:

$$t = \rho \sqrt{\frac{n-2}{1-\rho^2}}$$

За нулевую гипотезу принималось отсутствие корреляции между параметрами ($\rho=0$). При $t > t_{\alpha/2, n-2}$ нулевая гипотеза отвергалась, а значение ρ считалось статистически значимым. Проверка произво-

Таблица 1. Сравнительная оценка статистических критериев для $\text{tg}(\alpha_{\text{disp}}) = -1$, приведенных в [10] и полученных после оцифровки исходных рисунков

Источник	Тип повреждений	Значение t-статистики по [10]	Значения t-статистики, подсчитанные авторами	Критические значения t-статистики	Нулевая гипотеза отвергнута?
1	2	3	4	5	6
Исследования Бюро горных работ Департамента внутренних дел США	Незначительные (minor)	-3,23	-3,22	2,80	Да
	Существенные (major)	0,88	-0,95	2,71	Нет
[11]	Незначительные (minor)	0,63	0,79	2,75	Нет
	Существенные (major)	0,22	0,07	2,98	Нет
[12]	Незначительные (minor)	0,41	0,39	4,60	Нет
	Существенные (major)	2,57	2,57	3,11	Нет

Таблица 2. Результаты статистической оценки тесноты связей между параметрами колебаний и наблюденными повреждениями

Источник	Параметр колебаний	Коэффициент	Статистический критерий	Критическое значение	Статистическая значимость	Теснота связей по шкале Чеддока
1	2	3	4	5	6	7
Исследования Бюро горных работ Департамента внутренних дел США	Пиковое смещение	0,493	7,188	2,35	Значим	Умеренная
	Пиковая скорость	0,527	7,862	2,35	Значим	Заметная
	Пиковое ускорение	0,478	6,908	2,35	Значим	Умеренная
[11]	Пиковое смещение	0,374	4,093	2,363	Значим	Умеренная
	Пиковая скорость	0,765	12,072	2,363	Значим	Высокая
	Пиковое ускорение	0,467	5,363	2,363	Значим	Умеренная
[12]	Пиковое смещение	0,554	4,098	2,429	Значим	Заметная
	Пиковая скорость	0,771	7,452	2,429	Значим	Высокая
	Пиковое ускорение	0,601	4,637	2,429	Значим	Заметная

дилась на уровне значимости критерия, равном 0.01 (т.е. при вероятности ошибки первого рода равной 1%). Всего было проанализировано 163 экспериментальных точки для комплекса исследований Бюро горных работ, 105 точек для исследования Лангфорса, Килстрёма, Вестерберга и 40 точек для исследования Нортвуда и Эдвардса. Результаты исследования приведены в табл. 2.

По результатам исследования получено подтверждение, что, действительно, пиковая скорость колебаний лучше коррелирует с характером наблюденных повреждений, чем пиковые ускорения и смещения. В терминах шкалы Чеддока для качественной оценки корреляции связь между

максимальной скоростью колебаний и повреждаемостью оценивается как «высокая» (в двух случаях из трех) или «заметная» (в одном случае). Связь между пиковыми ускорениями или смещениями и повреждаемостью зданий в терминах этой же шкалы оценивается от «умеренной» до «заметной». Таким образом, получено новое статистическое подтверждение о предпочтительности использования максимальной скорости колебаний в качестве критерия сейсмической опасности при промышленных взрывах в сравнении с максимальными ускорениями и смещениями земной поверхности. При этом учтены недостатки предыдущих исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 52892-2007. Вибрация и удар. Вибрация зданий. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию. – М.: 2007. – 32 с.
2. OSM Blasting Performance Standards. 30 Code of Federal Regulations. Sec. 816.67. Use of Explosives: Control of adverse effects. URL: <http://arblast.osmre.gov/downloads/OSM%20Rules/Regulations%20816.doc>.
3. BS 7385: Part 2: 1993. Evaluation and measurement for vibration in buildings. Part 2. Guide to damage levels from groundborne vibration, BSI, 1993, 14 p.
4. DIN 4150-3. Structural vibration. Part 3: Effects of vibrations on structures, 1999. - 11 p.
5. СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах. – М.: ФГУП ЦПП, 2007. – 44 с.
6. СП 31-114-2004 Правила проектирования жилых и общественных зданий для строительства в сейсмических районах. – М.: ФГУП ЦПП, 2005.
7. НП 031-01 Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. 2002.
8. Public Law 95-87. Surface mining control and reclamation act of 1977. Blasting authority. Section 515 (b). URL: <http://arblast.osmre.gov/downloads/OSM%20Rules/SMCRA%201977.doc>
9. Костюченко, В. Н. Статистика повреждений зданий при взрывных работах и вопросы сейсмической безопасности // Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых, №1, 1985. – с. 67-73
10. Duvall W. I., Fogelson D. E. Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations // Report of investigations (RI 5968). US Department of the Interior. Bureau of Mines, 1962. URL: <http://arblast.osmre.gov/downloads/USBM/RI%205968%20Estimating%20Damages%20to%20Residences.pdf>.
11. Langefors U., Kihlstrom B., Westerberg H. Ground vibrations in blasting. // Water Power, February 1958, pp. 335-338, 390-395, 421-424.
12. Edwards A.T., Northwood T. D. Experimental Studies of the Effects of Blasting on Structures. // The Engineer. Vol. 210, Sept. 30, 1960. – pp. 538-546. URL: http://arblast.osmre.gov/downloads/_Other%20Reports/_Edwards%20-%20Effects%20of%20Blasting%20on%20Structures%20'60.pdf.
13. Елисеева, И. И. Общая теория статистики/ И. И. Елисеева, М. М. Юзбашев. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 656 с.

□Авторы статьи:

Новиньков
Алексей Геннадьевич
- канд. техн. наук, зав. сектором
Новационной фирмы
«КУЗБАСС-НИИОГР».
Тел. 8(384-2)-723-356

Протасов
Сергей Иванович
- канд. техн. наук, директор
Новационной фирмы
«КУЗБАСС-НИИОГР»
 firma@kuzbass-niogr.ru

Гукин
Андрей Сергеевич
аспирант кафедры открытых
горных работ КузГТУ.
Email: gas@kuzbass-niogr.ru,
orgov@kuzstu.ru

УДК 625.878.06

Н.В. Крупина

АКТУАЛЬНОСТЬ ВТОРИЧНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТА (ПЭТ) В СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

В результате низкого уровня использования продолжается накопление бытовых отходов в окружающей среде. Согласно оценкам НИЦПУРО, объемы накопления неиспользуемых отходов достигли 80-90 млрд тонн [1].

Одной из главных проблем современности является утилизация и переработка твердых бытовых отходов (ТБО). К проблеме ТБО нельзя подходить как к борьбе с мусором, ставя задачу любой ценой избавиться от него. Решение проблемы переработки ТБО – одна из основных задач мировой экономики. Опыт решения проблем, связанных с утилизацией ТБО, уникален в своем роде и индивидуален для каждой страны. При решении этого вопроса необходимо учитывать специфику региона [2].

Среди ТБО большую часть составляют быто-

вые полимерные отходы, которые составляют порядка 10 – 20% массы коммунальных отходов нашей страны. Между тем, уровень переработки полимерных отходов снизился (по сравнению с 1990 годом) с 23,5% до 8,3%. Низкий уровень использования полимерных отходов объясняется тем, что переработка их характеризуется низкой рентабельностью [3], а значит, необходимо разработать технологии переработки этих отходов, которые бы обладали большей рентабельностью.

Среди полимерных материалов большую часть составляют бытовые отходы из полиэтилентерефталата (ПЭТ). Процесс вторичного использования ПЭТ бесконечен. В Японии, например, из вторичного ПЭТа производят последовательно сначала скатерти, спортивную школьную форму, кроссовки из искусственной кожи, затем коврики