

пользоваться уравнением (6) при значении $\mu = 0$. Значения кинематических возмущений концов стержня можно определить из анализа общих вибраций фермы, для исследования которых следует применить известные методы динамики сооружений или воспользоваться соответствующими вычислительными комплексами (например, COSMOS/M).

Заключение

В итоге анализа полученных результатов исследования местных параметрических колебаний стержней:

1. Показана эффективность применения метода декомпозиции.

2. Получены оценки показателей возрастания амплитуд параметрических колебаний стержневых элементов конструкции при воздействии на нее подвижной динамической нагрузки в виде сосредоточенных сил. Эти показатели оказываются высокими даже с учетом малых значений коэффициентов возбуждения μ и ограниченного времени нахождения силовой нагрузки на конструкции $t = \frac{\ell}{v_{кр}}$.

3. Взаимодействие вынужденных и параметрических колебаний стержневых эле-

ментов в резонансных режимах существенным образом не выражено.

Библиографический список

1. **Устойчивость** призматических стержней под действием переменных продольных сил / Н. М. Беляев // Инженерные сооружения и строительная механика : сб. – Ленинград, 1924. – С. 149–167.

2. **Динамическая** устойчивость авиационных конструкций / В. Н. Челомей. – Москва : Аэрофлот, 1939.

3. **Динамическая** устойчивость упругих систем / В. В. Болотин. – Москва : ГИТТЛ, 1956.

4. **Indejkin, A. V., Fedotova, I. A.** The rod elements oscillations of the railway truss bridge in the conditions of high-speed motion of the load. Proceedings of the third European conference on structural dynamics: Eurodyn'96, 1996, Florence, 783–789.

5. **Определение** характеристик защемления элементов сооружений методом частот / И. И. Казей // Тр. ЦНИИС. – Москва : Трансжелдориздат, 1955. – Вып. 3. – С. 60–75.

6. **Продольно-поперечный** изгиб гибких призматических стержней / В. П. Польевко // Тр. ЦНИИС. – Москва : Трансжелдориздат, 1955. – Вып. 16.

7. **Прочность, устойчивость, колебания.** Т. 3. – Москва : Машиностроение, 1968.

УДК 624.21.01

С. Ю. Каптелин

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

ИСПЫТАНИЕ СООРУЖЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКИМИ НАГРУЗКАМИ

Для обеспечения безопасной эксплуатации мостового сооружения необходима достоверная информация о динамических воздействиях на несущие конструкции и их способности противостоять этим воздействиям. Такие данные можно получить только в процессе динамических испытаний. В статье описаны методы динамических испытаний транспортных сооружений, позволяющие получить необходимую информацию о работоспособности конструкции при условии воздействия на нее динамических нагрузок.

Результаты вибродиагностики служат обеспечению безопасной эксплуатации мостовых сооружений под воздействием современных транспортных нагрузок.

методы динамических испытаний, динамические характеристики, коэффициент динамики, резонанс, выносливость, безопасность эксплуатации.

Введение

Динамические испытания мостовых сооружений проводятся в соответствии с техническими нормами [1] с целью получения информации о динамических воздействиях, и способности несущих конструкций сооружений противостоять этим воздействиям.

Динамической называют нагрузку, быстро изменяющую свою величину во времени. Динамические воздействия на мостовое сооружение создаются движущимся транспортом и пешеходами, сейсмическими колебаниями грунтов основания, пульсацией ветрового давления, ударами колес транспортных средств о стыки рельсов или дефекты проезжей части, навалом льда во время ледохода на реках, нагрузками, возникающими в результате аварий транспортных средств и другими факторами.

На сооружения одновременно воздействуют динамические и статические нагрузки от собственного веса несущих элементов и дорожного полотна, и необходимо учитывать их суммарное воздействие на конструкции.

Деформации и изменение напряженного состояния конструкции под действием динамических нагрузок, как и в случае действия статических нагрузок, характеризуются перемещением в пространстве точек конструкции, деформациями волокон материала, поворотом сечений. Но при действии динамических нагрузок эти процессы протекают быстро, поэтому возникает необходимость измерения линейных и угловых компонентов с учетом их кратковременности специальным оборудованием [2].

При испытании конструкций динамической нагрузкой в зависимости от поставленной цели решаются следующие задачи:

- определение влияния динамической нагрузки на прочность материала конструк-

ции, т. е. определение его предела выносливости;

- проверка напряженного состояния элементов конструкции, рассчитанных на воздействие динамических нагрузок, в реальных условиях эксплуатации;

- оценка влияния динамической нагрузки на несущую способность, жесткость и трещиностойкость конструкции;

- определение предела выносливости конструкции;

- определение влияния динамических нагрузок на условия безопасной эксплуатации мостовых сооружений;

- оценка условий движения по сооружению транспортных средств, создающих динамические воздействия, с целью недопущения резонансных эффектов, создающих угрозу безопасности движения;

- разработка мероприятий по увеличению диссипативных свойств конструкций и уменьшению амплитуд колебаний;

- изучение характера динамического воздействия на конструкцию особых нагрузок: ударной воздушной волны, сейсмических воздействий, импульсной составляющей ветрового напора, навала льда во время ледохода и т. п.;

- оценка влияния колебаний на условия безопасности движения по мостовому сооружению транспортных средств;

- определение динамических характеристик конструкции: частоты и формы собственных колебаний, коэффициентов затухания колебаний; величины динамического коэффициента;

- изучение характеристик динамической эксплуатационной нагрузки: направления, величины, частоты и периодичности возмущающих сил, с целью выяснения причин динамических процессов, протекающих в конструкции;

- запись параметров напряженно-деформированного состояния конструкции под воздействием быстро изменяющихся во времени нагрузок: виброграмм, велосиграмм, акселерограмм, тензограмм.

1 Напряженно-деформированное состояние конструкции при динамическом нагружении

Под воздействием динамических нагрузок в сооружениях возникают вынужденные колебания.

Колебания, которые совершает конструкция после прекращения действия на нее внешней нагрузки, называются свободными, или собственными.

Для работы конструкции очень важно соотношение частот вынужденных и собственных колебаний. При совпадении частот собственных колебаний конструкции с частотой действия возбуждающей силы наступает явление резонанса, сопровождающееся резким возрастанием амплитуды колебаний, динамических усилий и напряжений в несущих элементах.

Этого явления следует избегать, принимая проектные решения, исключающие явление резонанса или устраивая демпфирующие элементы в конструкции.

Опасным следствием воздействия на конструкции динамических нагрузок является возникновение внезапных разрушений при нормальных условиях эксплуатации сооружений. Это связано с постепенным ростом в наиболее напряженных элементах конструкции микротрещин, увеличивающихся при пиковых значениях динамических усилий и сливающихся в макротрещину. В итоге выросшая трещина настолько ослабляет сечение элемента конструкции, что происходит его мгновенное хрупкое разрушение даже при незначительном усилии. Характерной особенностью данного вида разрушения является наличие в изломе конструкции двух четко выраженных зон: область трещины, гладкая, с притертыми поверхностями, и об-

ласть окончательного хрупкого разрушения с присущей ей зернистой структурой.

Динамические нагрузки оказывают воздействие на механические свойства материала в конструкции, снижая его прочность. Сущность этого явления состоит в том, что материал конструкции в случае возникновения в нем периодически изменяющихся во времени напряжений, в особенности знакопеременных, после некоторого числа циклов хрупко разрушается при напряжениях намного ниже временного сопротивления или предела текучести. Чем больше усилия в элементах конструкции, тем меньше циклов нагружения выдерживает конструкция до разрушения. Напряжение, при котором материал конструкции способен выдерживать сколь угодно большое число циклов нагружения, называется пределом выносливости – R_v (рис. 1), определение которого является важнейшей задачей динамических испытаний.

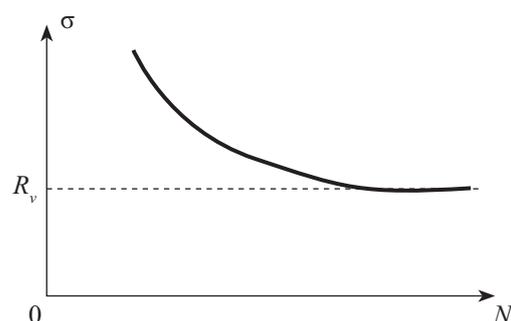


Рис. 1. Диаграммы испытаний предела выносливости стали

Предел выносливости зависит от характеристики цикла ρ , который выражается отношением минимального и максимального напряжений $\rho = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$.

Наименьшее значение предел выносливости имеет в случае равенства различных по знаку максимальных и минимальных напряжений.

На рис. 2 приведен вид экспериментальной зависимости отношения предела выносливости к пределу прочности бетона на сжатие R_b от характеристики цикла. Из графика

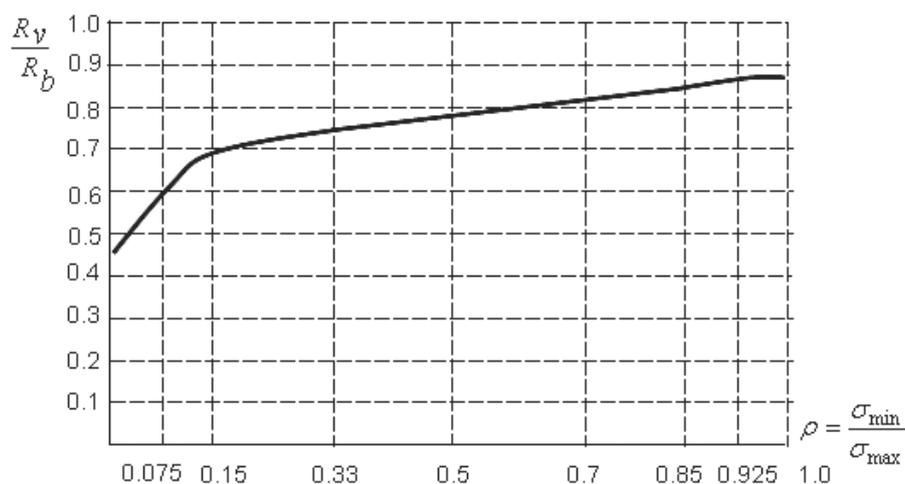


Рис. 2. Зависимость отношения предела выносливости к пределу прочности бетона на сжатие от характеристики цикла

видно, что предел выносливости бетона составляет $0,45 R_b$ при $\rho = 0$.

Предел выносливости также зависит от вида деформации (осевая деформация, изгиб, кручение); от статической прочности материала; от геометрической формы и размеров элемента; от агрессивности среды эксплуатации, в частности, вызывающей коррозию; от наличия и вида концентраторов напряжений в конструкции; от температурных условий работы сооружения и др. факторов.

На рис. 3 приведены диаграммы испытаний на выносливость титана в гладких образцах, в образцах с круглым надрезом и с трещиной. Очевидно, что наличие в материале концентратора напряжений, особенно дефектов в виде трещин, значительно снижает предел выносливости. При этом характер экспериментальных зависимостей остается неизменным.

Разрушение под воздействием динамических нагрузок при напряжениях меньше расчетного сопротивления называется усталостью. Усталость конструкций и материалов – грозное явление, способное привести к катастрофам. Предотвращение усталостных разрушений возможно путем снижения максимальных местных напряжений в конструкции до величин, не превышающих предела выносливости, за счет придания элементам

и их сопряжениям скругленных, плавных изменений геометрических форм, не вызывающих больших концентраций напряжений. Большое значение имеет также специальная дробеметная или пескоструйная обработка поверхности изделия для придания ей гладкости.

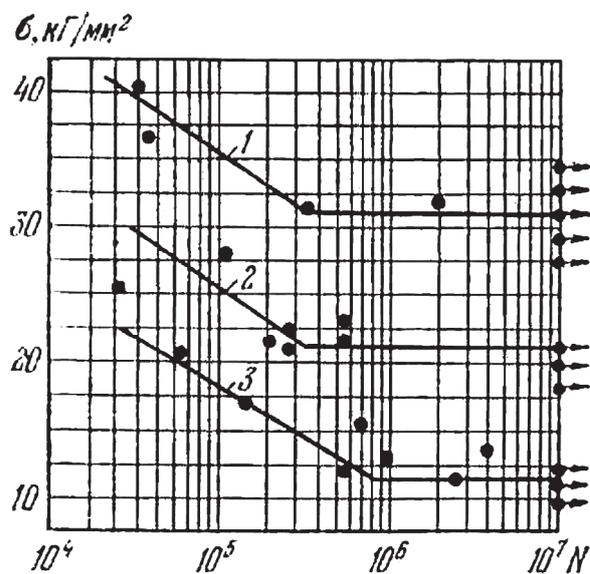


Рис. 3. Диаграммы испытаний предела выносливости титана: 1 – гладкие образцы, 2 – образцы с круглым надрезом, 3 – образцы с острым надрезом

2 Определение динамических характеристик мостовых сооружений

Важной задачей динамических испытаний является определение динамических характеристик мостового сооружения: периода, частоты и формы собственных и вынужденных колебаний опор и пролетных строений в целом или их отдельных элементов, декремента колебаний, динамического коэффициента.

Первостепенной задачей является исследование параметров динамических воздействий, создаваемых реальными подвижными нагрузками.

Для испытаний мостовых сооружений подвижными нагрузками используют груженные транспортные средства, которые обращаются по мосту и способны при неровностях пути или проезжей части вызывать появление в конструкциях колебаний, вибраций и местных перенапряжений.

При исследовании частот и форм вынужденных колебаний сооружений используются специальные испытательные поезда и вибрационные машины (рис. 4), способные создавать динамические нагрузки с заданными характеристиками.

Испытательная машина с вращающимися эксцентриковыми массами генерирует вибрационную нагрузку P_p , изменяющаяся по гармоническому закону:

$$P_i = m \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t,$$

где m – масса эксцентрика; r – радиус вращения эксцентрика; ω – угловая частота вращения; t – текущее время. Меняя r , m и ω , можно получить различные периодические инерционные усилия в диапазоне вплоть до появления резонанса в испытываемой конструкции.

При этом могут быть инициированы вынужденные колебания различных видов: вертикальные, горизонтальные вдоль и поперек сооружения, изгибно-крутильные, галопирующие и т. д.

При определении параметров собственных колебаний для возбуждения в конструкции свободных затухающих колебаний применяется метод ударного воздействия, при котором с пролетного строения сбрасывается заранее подвешенный груз, или груз бросают на пролетное строение. Горизонтальные колебания можно возбудить «тараном». При этом принимаются меры, предохраняющие конструкцию от местных повреждений: устройство песчаных подушек, распределительного настила и т. п.

При изучении сейсмостойкости конструкций используют взрыв небольшой мощности.

При динамических испытаниях пешеходных мостов возбуждение колебаний конструкций производится посредством раскачки, сбрасывания грузов, ритмичного движения по мосту отдельных пешеходов или их групп.

Места приложения возмущающих нагрузок, а также места измерения деформаций

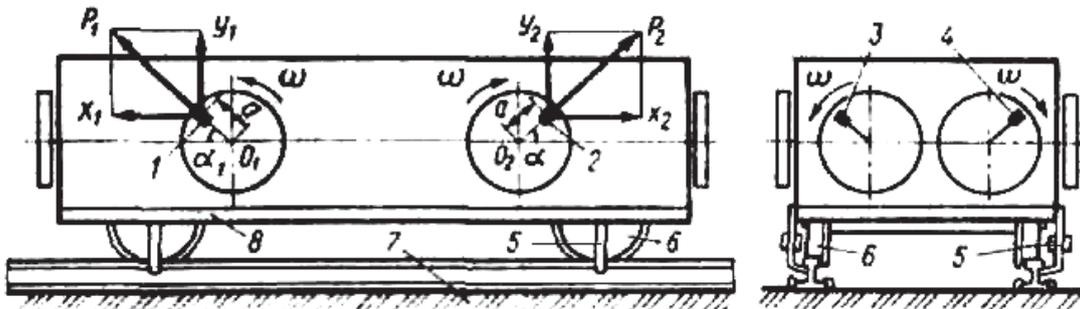


Рис. 4. Схема испытательного поезда:

- 1, 2, 3, 4 – продольные и поперечные эксцентриковые массы; 5 – крепления к рельсам; 6 – колеса платформы; 7 – исследуемая конструкция; 8 – платформа

выбираются с учетом ожидаемых видов и форм колебаний.

При динамических испытаниях автодорожных и городских мостов динамическое воздействие подвижной нагрузки усиливается проездом автомобилей по искусственно созданным неровностям на проезжей части, например, по доскам толщиной 50 мм, уложенным поперек проезда с шагом, равным колесной базе автомобиля.

Движение испытательной нагрузки осуществляется с различными скоростями, что позволяет выявить характер работы сооружения в диапазоне возможных скоростей движения транспорта. Нормативные требования [1] рекомендуют выполнять при разных скоростях не менее 10 заездов и повторять отдельные заезды, при которых наблюдается повышенное динамическое воздействие нагрузки.

Основным критерием надежной работы конструкции при динамических воздействиях служит динамический коэффициент $1+\mu$, который выражает, во сколько раз динамические перемещения, усилия или напряжения превышают аналогичные параметры при статическом действии нагрузки. Чем больше величина динамического коэффициента, тем меньше надежность конструкции при воздействии подвижных транспортных нагрузок.

Теоретическое значение динамического коэффициента принимается при проектировании сооружения в соответствии с нормативными требованиями [3].

Аналитическое выражение для коэффициента нарастания амплитуды вынужденных колебаний μ системы с одной сосредоточенной массой имеет вид

$$\mu = 1 / \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{p^2}\right)^2 + \left(\frac{\delta}{\pi}\right)^2 \left(\frac{\omega}{p}\right)^2},$$

где δ – логарифмический декремент колебаний, учитывающий диссипативные свойства конструкции; ω – частота динамического воздействия; p – собственная частота колебаний сооружения. При $\omega = p$ коэффициент

μ стремится к бесконечности, вызывая резонанс в конструкции.

Собственная частота колебаний конструкции зависит от жесткости системы c и ее массы m :

$$\omega = \sqrt{c/m}.$$

Следовательно, на величину динамического коэффициента можно влиять, изменяя жесткость мостового сооружения, которая зависит от статической схемы конструкции, формы поперечного сечения элементов, характера сопряжения элементов и физико-механических характеристик материалов.

При испытаниях динамический коэффициент может быть определен отношением суммарного напряжения от воздействия статической и динамической нагрузок σ_{\max} к напряжению от статической нагрузки $\sigma_{\text{ст}}$.

$$1 + \mu = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ст}}}.$$

Наибольшее значение ординаты σ_{\max} принимается по тензограмме (рис. 5). Ординаты статического воздействия определяются по средней линии, делящей пополам экспериментальную зависимость.

Определить динамический коэффициент можно и по акселерограммам. В этом случае при известной массе конструкции m и измеренному акселерометром ускорению u динамические напряжения $\sigma_{\text{дин}}$ определяют по инерционной силе $F = m \cdot u''$. Максимальные напряжения: $\sigma_{\max} = \sigma_{\text{ст}} + \sigma_{\text{дин}}$. Например, при действии осевой силы N в элементе с площадью сечения A $\sigma_{\text{ст}} = N/A$, $\sigma_{\text{дин}} = F/A$. При изгибе балки с моментом сопротивления сечения W сосредоточенной силой P , приложенной посередине пролета l $\sigma_{\text{дин}} = Pl/4W$, $\sigma_{\text{ст}} = Fl/4W$.

Задача определения частот собственных колебаний пролетных строений при динамических испытаниях может быть решена двумя способами:



Рис. 5. Тензограмма напряжений в поясе пролетного строения

1. Испытываемая конструкция подвергается удару, вызывающему свободные затухающие гармонические колебания, амплитуда которых уменьшается от a_i до a_n . По виброграмме затухающих колебаний (рис. 6а) определяют частоту собственных колебаний f_0 , которая равна отношению числа колебаний n к интервалу времени записи этих колебаний T : $f_0 = n/T$, Гц. Круговая частота $\omega = 2\pi/T$, 1/с;

2. На испытываемую конструкцию устанавливают вибромашину. Изменяя частоту вынужденных колебаний, доводят конструкцию до резонанса. Резонанс будет отмечен на виброграмме резким возрастанием амплитуды колебаний (рис. 6б). Частота колебаний при резонансе соответствует частоте собственных колебаний конструкции $f_0 = n/T_{\text{рез}}$, Гц.

При определении логарифмического декремента затухания собственных колебаний ψ с целью повышения точности измеряют

амплитуды не соседних колебаний, а расположенных друг от друга на расстоянии m периодов. Тогда

$$\psi = \frac{1}{m} \ln \frac{a_i}{a_{i+m}},$$

где a_i и a_{i+m} – амплитуды i -го и $(i+m)$ -го собственных колебаний системы; m – количество свободных колебаний конструкции между принятыми амплитудными значениями.

Чем больше декремент затухания, тем скорее затухают свободные колебания и лучше динамическая характеристика моста.

Заключение

Для обеспечения безопасной эксплуатации мостовых сооружений необходима достоверная информация о динамических воздействи-

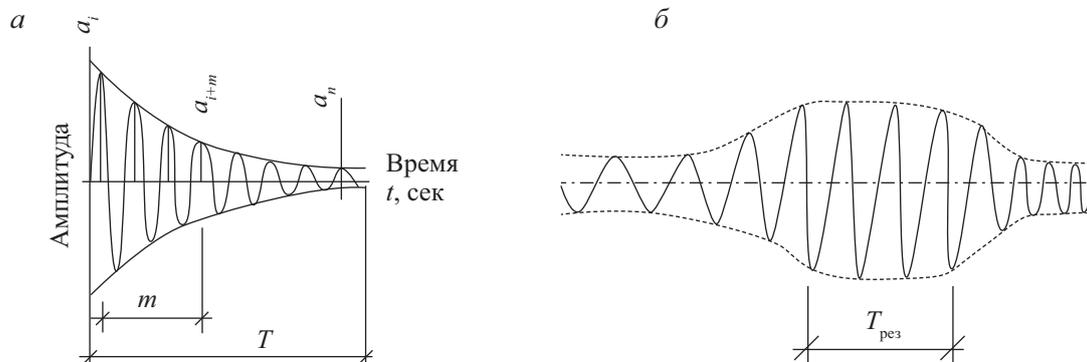


Рис. 6. Виброграммы:

а) свободных колебаний; б) вынужденных колебаний с зоной резонанса

ях на несущие конструкции и о способности транспортных сооружений противостоять ударным и быстродействующим циклическим нагрузкам.

Основные параметры, характеризующие работу конструкций в условиях воздействия на них переменных во времени нагрузок: собственная частота колебаний, логарифмический декремент колебаний, динамический коэффициент, предел выносливости достоверно определяются только при динамических испытаниях искусственных сооружений.

Результаты испытаний динамическими нагрузками позволяют предотвратить такие опасные для эксплуатационной надежности транспортных сооружений процессы, как резонансные колебания, продолжительные вибрации, усталостное разрушение, возникновение и рост трещин. Тем самым созда-

ются условия для безопасной эксплуатации мостовых сооружений под воздействием современных транспортных нагрузок.

Библиографический список

1. СП 79.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 3.06.07–86) Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний. Минрегион России. – Москва : ЦПП, 2012. – 40 с.
2. **Определение** динамических характеристик транспортных сооружений / С. Ю. Каптелин // Бюл. результатов научных исследований. – Санкт-Петербург : Петербург. гос. ун-т путей сообщения, 2013. – Вып. 1–2 (6–7). – С. 67–78.
3. СП 35.13330.2011 (актуализированная редакция СНиП 2.05.03–84*) Мосты и трубы. Минрегион России. – Москва : ЦПП, 2011. – 214 с.

УДК 699.82

С. В. Николаев, Е. Р. Богданова

Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОФИЛЬНЫХ СВОЙСТВ БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Выполнено комплексное исследование водопоглощающих свойств ряда бетонных смесей, предназначенных для использования в гидротехнических сооружениях. Доказана необходимость применения дополнительной влагозащиты посредством нанесения на поверхность исследуемого материала гидрофобизирующих растворов. Раскрыта проблема недостаточной глубины и равномерности проникновения гидрофобизирующего раствора в капилляры материала при поверхностной обработке. Предложено применение технологии «ультразвуковой пропитки» пористых строительных материалов гидрофобными растворами под воздействием избыточного давления, создаваемого направленными акустическими колебаниями.

водопоглощение пористых строительных материалов, гидрофобизация, гидрофобизирующий раствор, ультразвуковая пропитка.

Введение

Для эффективного подбора строительного материала при возведении сооружений не-

обходимо знать его физико-механические свойства и учитывать условия, в которых он будет работать в строительной конструкции. Свойства строительных материалов разноо-