

УДК 666.76.017:620.192.46

МЕТОД ОБЪЕМНОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ, КИРПИЧНОЙ КЛАДКИ И ЖАРОПРОЧНОГО БЕТОНА УДАРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Приведены описание и физическое обоснование метода дефектоскопии массивных конструкций, например стен, колонн, фундаментов, из огнеупорных материалов и кирпичной кладки на примере исследования бетонных конструкций. Метод позволяет проводить дефектоскопию бетона с различными заполнителями, в том числе с пористыми, например с керамзитом. Это сближает проблемы дефектоскопии бетона с проблемами дефектоскопии кирпичной кладки и конструкций из огнеупорных материалов. Метод основан на локальном возбуждении стоячих волн поперек стены множественными ударными импульсами. Полученные экспериментальные данные показывают, что при достижении определенного количества дефектов стоячие волны не возбуждаются, т. е. имеет место процесс их полного демпфирования.

Ключевые слова: дефектоскопия, бетон, огнеупорные конструкции, собственные колебания, стоячие волны, ударные импульсы, демпфирование.

Среди объектов, недостаточно охваченных дефектоскопией для обнаружения трещин, необходимо особо выделить конструкции из огнеупорных материалов и кирпичную кладку, обследуемые методами неразрушающего контроля. Для определения прочностных характеристик бетона разработано достаточно много методик и создано достаточно много различной аппаратуры [1, 2]. В том числе созданы специальные ультразвуковые приборы [3]. Ультразвуковая дефектоскопия изделий из бетона заводского производства без заполнителя или с редким равномерно распределенным заполнителем осуществляется вполне успешно. Тем не менее проблема дефектоскопии продольными (объемными) волнами остается не решенной полностью. Причина в том, что для большинства бетонных объектов в качестве заполнителя используются камни различной формы и различного размера. Нередко изначально отсутствует полное сцепление камней с бетоном. Следовательно, препятствия, рассеивающие зондирующие ультразвуковые волны, расположены хаотично.

Влияние препятствий определяется их размерами относительно длины зондирующей волны. Учитывая, что частота ультразвуковых зондирующих волн специальных дефектоскопов,

предназначенных для контроля бетона, находится в диапазоне 20–50 кГц и диапазон скоростей звука в бетоне составляет 3500–5000 м/с, нетрудно определить, что длина волны составляет 0,1 м и более. Это означает, что размеры препятствий соизмеримы с длиной волны или значительно меньше ее. В первом случае происходит когерентное (дифракционное) рассеяние волн, во втором случае мощность зондирующего импульса рассеивается по экспоненциальному закону [4]. Действительно, как показывает практика, если в бетоне имеются большие камни, то на экране дефектоскопа вначале появляются импульсы, отраженные от этих камней. Это дифракционное рассеяние ультразвуковых волн делает дефектоскопию невозможной, потому что более удаленные отражатели, в том числе и задняя стенка объекта, не видны. Во втором случае, при очень плотном наполнении бетона мелкими гладкими камнями, особенно керамзитом, рассеяние настолько интенсивное, что на экране дефектоскопа полностью отсутствуют какие-либо отраженные импульсы.

В качестве альтернативы предлагается низкочастотный акустический контроль, заключающийся в возбуждении собственных колебаний конструкций ударами молотка. Такой подход показал себя эффективно при определении физико-механических свойств огнеупоров [5, 6]. Для определения прочности бетона также применяются методы с использованием ударов по бетону молотком [1]. Этими методами исследуется реакция бетона на удар, в том числе и по издаваемому звуку.



В. И. Кугушев
E-mail: alkugusher@gmail.com

В настоящей работе предлагается развитие такого подхода для дефектоскопии массивных объектов типа стен, колонн и фундаментов. Метод заключается в наполнении массивного объекта свободной энергией при помощи множественных ударов молотком в одну точку, возбуждающих локальные собственные колебания. Локальность подразумевает колебания отдельного небольшого участка конструкции. Это аналогично наполнению свободной энергией металлических деталей одним ударом молотком, который вызывает возбуждение собственных колебаний. Для массивного бетонного объекта одного удара молотка недостаточно. Как показывает практика контроля бетонных конструкций, метод показал себя эффективным в диапазоне толщин объекта от 400 до 1500 мм.

Ударами молотка ограниченный участок стены наполняется свободной энергией, что приводит к возбуждению локальных собственных колебаний, распределенных по толщине стены. Локальные колебания успевают быть измеренными прибором прежде, чем произойдет диссипация их энергии в окружающее пространство стены. Ниже этот процесс описан более подробно. В качестве измерительного прибора используется измеритель частоты собственных колебаний с пьезоэлектрическим преобразователем, выполненным в виде контактного датчика.

Стена из бетона, кирпича или огнеупоров в процессе механического воздействия подвергается только хрупкому разрушению, которое, как известно, не приводит к слишком большому поглощению энергии [7]. Поэтому наличие отдельных мелких дефектов и границ разнородных материалов, которые всегда имеются в бетоне или в кирпичной кладке, не является существенным препятствием для распространения локальных ударных импульсов по толщине стены.

Удар молотка по одной стороне стены возбуждает локальный ударный импульс, который перемещается поперек стены, отражаясь от ее сторон. Процесс не способен быстро извлекать энергию от свободной энергии. Если энергии этого импульса достаточно, чтобы возбудить собственные колебания по толщине стены, то длина волны импульса увеличивается до размеров, соизмеримых с толщиной стены. Например, первая гармоника, когда длина половины волны равна толщине стены, т. е. «узловая» (неподвижная) точка находится в середине стены, а стороны стены колеблются относительно нее синфазно. В этом случае локальные собственные колебания стены излучают энергию в окружающее пространство, что способствует быстрому извлечению от свободной энергии. Это отвечает общему принципу — любой физический процесс идет по пути минимизации свободной энергии тела, и упругие собственные колебания сплошной среды отвечают этому принципу, рассеивая

энергию в окружающее пространство [8]. В работе [9] представлено подробное описание того, как такой процесс приводит к возникновению стоячей волны по всей толщине стены, т. е. к локальным собственным колебаниям.

Поскольку энергии одного удара молотка недостаточно для возбуждения собственных колебаний в изделиях из бетона и кирпича, необходимо нанести несколько ударов подряд через достаточно малые промежутки времени. Тогда прежде, чем «затухнет» первый импульс, возникнут второй, третий и т. д. Как показывает практика, если тело имеет достаточно мелкие нарушения сплошности, например поры в бетоне и кирпиче, слоистость в дереве, или исследуется сложная металлическая конструкция, то происходит накопление энергии под воздействием наносимых подряд ударных импульсов. При этом энергия импульса поглощается одним каким-либо участком тела в пределах упругих деформаций, соответственно, энергия другого импульса поглощается другим участком тела. Этот процесс не наблюдается в сплошных телах, например в гранитных блоках и достаточно компактных металлических деталях. Таким образом, множественность ударов позволяет «накачивать» стену энергией, пока не возникнет локальная стоячая волна, которая, как все стоячие волны, хотя и излучает энергию, но не переносит ее и поэтому может быть накопителем энергии.

Почему энергия, накопленная в локальных стоячих волнах, преобразуется именно в данные собственные колебания, в первую гармонику? Помимо общего принципа, в соответствии с которым любой физический процесс идет по пути минимизации свободной энергии и упругие собственные колебания сплошной среды, отвечая этому принципу, рассеивают энергию в окружающее пространство, ответом на этот вопрос являются следующие экспериментальные данные [8].

Как правило, наиболее легко возбуждаются низшие гармоники. С ростом номера гармоники возбудить собственные колебания становится сложнее. Например, возбудить собственные колебания в ультразвуковом диапазоне ударом молотка невозможно потому, что с увеличением частоты колебаний, уменьшается длина волны, но тогда должна уменьшаться амплитуда колебаний, потому что иначе произойдет рост внутренних напряжений и увеличение потерь энергии на хрупкое разрушение, что в диапазоне упругих деформаций невозможно [10].

Приведем еще один физический фактор, который особенно часто проявляется при возбуждении собственных колебаний в массивных деталях. Если нанести несильный удар молотком в определенную точку, то в первую очередь возбуждаются собственные колебания, имеющие в этой точке «точку пучности». При усилении удара энергия, возбуждающая эту форму коле-

баний, доходит до своего предела упругости и далее перераспределяется на другие формы собственных колебаний, имеющих точку пучности поблизости от точки удара. При дальнейшем усилении удара энергия и этой формы колебаний доходит до своего предела упругости и перераспределяется на формы колебаний, имеющих следующую по расстоянию от точки удара точку пучности, и т. д. Таким образом, деформация колебаний не перейдет в пластическую форму или в форму хрупкого разрушения, сопровождающуюся большим потреблением энергии, пока не будут возбуждены все остальные более экономичные формы колебаний упругой деформации. В результате нередко ударами в одну и ту же точку с разной силой устойчиво измеряются разные формы собственных колебаний. Подобное явление автор наблюдал при контроле заготовок крупногабаритных графитовых электродов. Заготовки электродов представляли собой цилиндрические призмы диаметром от 0,3 до 1,2 и длиной до 5 м.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что при нанесении ударов в условиях дефицита энергии сохраняются только низшие гармоники собственных колебаний, имеющие в точке удара точку пучности. Остальному широкому спектру волн процесс диссипации не позволяет возникнуть.

Измерения собственных колебаний обычно происходит следующим образом. Датчик с пьезоэлектрическим преобразователем прижимают к стене и на расстоянии 100–200 мм от него наносят удары молотком до тех пор, пока прибор не просигналит, что частота зафиксирована. Низшая гармоника — полуволна. Размер толщины стены соответствует длине полуволны и, зная измеренную частоту, несложно вычислить скорость звука. По скорости звука по специальным методикам устанавливают прочностные характеристики бетона и его марку [3, 11].

Если в стене имеется значительная трещина или несколько трещин, то энергия импульса тратится на дальнейшее развитие этих трещин или импульс, отражаясь от них, не может их преодолеть и на формирование стоячих волн энергии не хватает. Соответственно, прибор не фиксирует устойчивых колебаний.

При нанесении удара молотком по бетонному изделию в поглощении энергии удара всегда участвуют три процесса. Первый процесс — хрупкое разрушение бетона непосредственно под молотком. Этот процесс можно почти исключить или значительно уменьшить его влияние. Второй и третий процессы определяются геометрической формой объекта контроля.

Импульс энергии, передаваемый молотком стене, может быть одинаковым в различных случаях: для большей амплитуды, действующей в течение короткого промежутка времени, и для

меньшей амплитуды, действующей в течение большего промежутка времени, т. е. возможны «жесткий» и «мягкий» удары. Если считать боек (шляпку) молотка центром удара и центром масс, то расстояние от точки захвата ручки молотка кистью руки до бойка должно быть меньше приведенной длины молотка [12]. В приведенную длину должна входить также часть длины руки. Это необходимо, чтобы кисть руки ощущала реакцию на удар и могла бы контролировать жесткость удара. Удар должен быть достаточно «мягким», коэффициент восстановления не должен превышать значения 0,5, иначе вся энергия уйдет на локальное (в точке удара) разрушение стены [12]. Материал бойка молотка также должен быть достаточно мягким. Идеальный случай — свинцовый молоток, но он быстро выходит из строя, поэтому оптимальным будет молоток из чистой меди (красной меди). Оптимальная масса молотка 1 кг, более тяжелый молоток затрудняет обеспечение необходимой динамики ударов.

Допустимую силу удара можно рассчитать по теории Герца, исходя из значения предела прочности бетона при ударе $50 \cdot 10^4$ кг/м² [13, 14]. Радиус r пятна контакта при ударе определяется по формуле

$$r = \sqrt[3]{\frac{3R}{4} \sqrt{\frac{P}{E}}}, \quad (1)$$

где R — радиус бойка (ударной поверхности молотка), м; P — сила удара, кг; E — модуль упругости бетона $(0,1 \div 0,3) \cdot 10^{10}$ кг/м². Подставляя силу удара в формулу (1), можно определить площадь контакта и, соответственно, возникающие при ударе напряжения. Для ударного процесса расчет по теории Герца является приблизительным, но надо иметь в виду, что регулировать силу удара молотком с большей точностью также невозможно.

Второй процесс заключается в том, что энергия, которая вводится в объект контроля, расходится на возбуждение собственных колебаний конструкции в целом. Происходит это, если в точке удара часть стены или балки прогибается полностью всей своей толщиной, как монолит. При этом возникает динамический прогиб, и упругие волны расходятся по всему объекту контроля. Энергия этих волн будет затрачена на возбуждение собственных колебаний конструкции независимо от того, будет ее достаточно или нет.

Третий процесс — возбуждение локальных колебаний, распределенных по толщине стены, о которых говорилось выше. Реально чаще всего возбудить удастся только их первую гармонику (полуволну) с синфазным перемещением стен объекта контроля в процессе колебаний.

Если второй процесс имеет место, преодолеть его невозможно, и это является ограничением применения предлагаемого метода. Особенно оно распространяется на длинные балки. Например,

ударами молотка поперек длинной балки, в которой легко возбуждаются несколько гармоник собственных изгибных колебаний, возбудить локальные колебания, распределенные по толщине балки, невозможно. В то же время в отдельном отрезке этой балки длиной, близкой к ее толщине, колебания, определяющие третий процесс, устойчиво возбуждаются. При исследовании балки сечением 300×300 мм и длиной 2,9 м, в которой возбуждалась только первая изгибная гармоника, возбудить локальные волны, определяющие третий процесс, удавалось только в узловой точке.

Определим теоретически, какая форма колебаний, соответствующая второму или третьему процессу, возникает в балке заданного сечения. Будем исходить из принципа — энергия удара в основном будет поглощена процессом, который создает наибольшую величину прогиба под воздействием удара.

Для второго процесса величину динамического прогиба δ_2 от действия удара по середине балки с двумя шарнирными опорами по краям можно определить по следующей формуле [15]:

$$\delta_2 = \frac{l^3 P}{24IE}, \quad (2)$$

где l — длина балки; I — момент инерции сечения балки. Здесь учитывается, что масса балки много больше массы молотка и удар достаточно «мягкий». Исходный прогиб δ_2 переходит в собственные изгибные колебания балки по всей длине.

Для третьего процесса величину динамического прогиба определить не просто. Но в данном случае можно заменить динамический прогиб на статический. Величина динамического прогиба не меньше величины статического прогиба. Нам важно, чтобы величина прогиба по третьему процессу была бы больше величины прогиба по второму процессу. Поэтому замена динамического прогиба на статический прогиб оправдана и дает некоторый запас. Рассчитать статический прогиб для третьего процесса δ_3 можно по теории Герца [14]:

$$\delta_3 = \sqrt[3]{\frac{l^3}{R} \sqrt[3]{\frac{3P}{4E}}}, \quad (3)$$

здесь обозначения те же, что в формулах (1) и (2).

Результаты расчетов по формулам (2) и (3) представлены на рис. 1. С уменьшением радиуса

ударной поверхности молотка третий процесс начинает превалировать над вторым, так же как и с уменьшением длины балки, но этот фактор имеет ограничения. С уменьшением радиуса ударной поверхности молотка становится актуальным действие первого процесса. Результаты теоретических расчетов, показанные на рис. 1, вполне согласуются с данными экспериментальных исследований представленной выше балки.

Необходимо отметить метрологическую оценку измерений этим методом. Метод, основанный на ударах молотком, содержит слишком много случайных факторов, препятствующих передаче энергии стене в достаточном объеме, в том числе и субъективные факторы. В результате не каждая серия ударов приводит к возбуждению собственных колебаний по третьему процессу.

Для выяснения причин этого были проведены экспериментальные исследования несущих балок, одна из которых представлена на рис. 2. Вероятность P достоверности измерения опре-

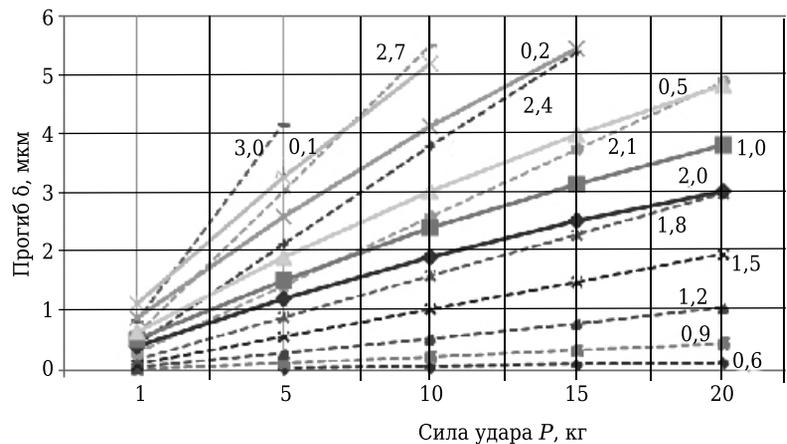


Рис. 1. Результаты расчетов по формулам (2) и (3). Зависимость от силы удара: ---- — δ_2 для второго процесса, на кривых указана длина балки, м; — — δ_3 для третьего процесса, на кривых указан радиус ударной поверхности молотка, м

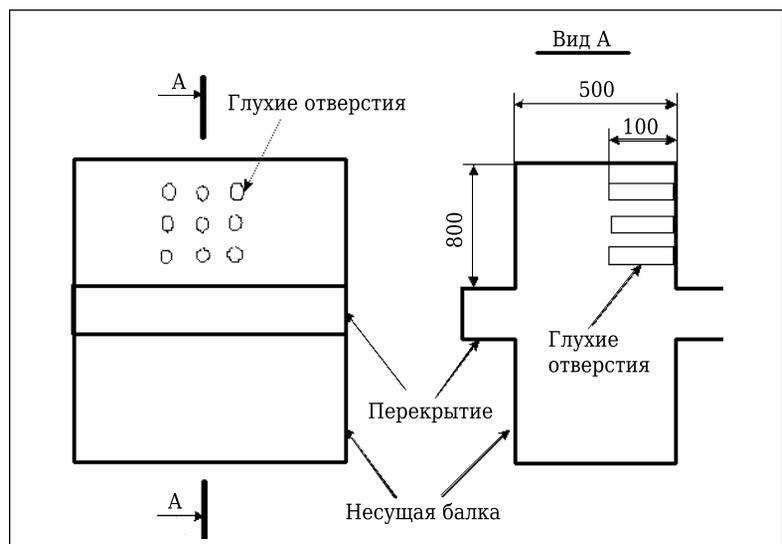


Рис. 2. Несущая балка для проведения экспериментальных исследований

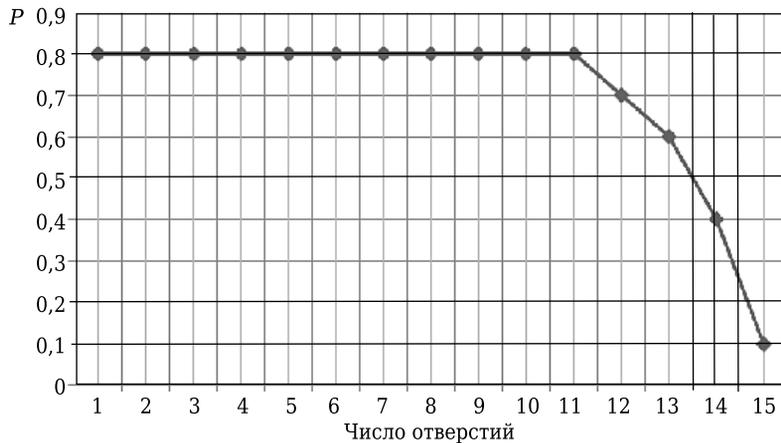


Рис. 3. Вероятность P достоверности измерения устойчивых собственных колебаний в зависимости от числа просверленных отверстий

деляли следующим образом. При измерениях производилось десять серий ударов. Числом серий, приводящих к возбуждению собственных колебаний, разделенным на 10, определялась величина вероятности P . Для сглаживания кривой распределения вероятности P , представленной на рис. 3, измерения неоднократно повторялись.

Были исследованы четыре несущие балки длиной более 10 м, высота балок 800 и ширина 500 мм (см. рис. 2). Балки вместе с перекрытием представляют собой монолит. Частота собственных колебаний возбуждалась локально по длине и высоте балок. Удары наносили по боковым стенкам балок. При этом датчик измерителя частоты собственных колебаний устанавливали в одних случаях на стенке со стороны нанесения удара, в других случаях на противоположной стороне.

Получены следующие результаты. Устойчиво возбуждались, хотя и с большим разбросом вероятности, и показывали номинальные значения частоты собственные колебания, которые измеряли в точках, расположенных в промежутке от 100 до 700 мм по высоте стенки. Номинальное значение частоты 3800–3900 Гц (в отдельных точках до 4000 Гц) в зависимости от того, как плотно лег бетон при затвердевании. Десятки и единицы герц не указываются, как не имеющие существенного значения. Полученные значения прочности соответствуют классу бетона не более $B_b 25$ и марке $M_b 300$ [3].

Результаты, полученные при возбуждении колебаний и измерении их на одной стенке балки, не отличались от результатов, когда возбуждение и измерения проводились на противоположных стенках.

В промежутке от 0 до 100 мм по высоте стенки собственные колебания не возбуждались. Это связано с влиянием близости перекрытия, которое придает дополнительную жесткость стенке

балки. Начиная с высоты 700 мм и выше частота собственных колебаний снижалась до 3300 Гц. Сказывалось влияние свободной поверхности верхней стенки балки.

После проведения исследований целых балок для моделирования дефекта перфоратором в стенке балки с одной стороны просверливали глухие отверстия диаметром 10 и глубиной 100 мм на расстоянии примерно 60 мм друг от друга (см. рис. 2). После просверливания каждого отверстия измеряли частоту собственных колебаний. Вследствие твердости и хрупкости бетона высверливание отверстий способствует развитию соприкасающихся с ними микротрещин. Это позволяет в определенной степени моделировать дефекты бетона реальных объектов.

Одно или несколько отверстий (не более 10) не влияли на возбуждение собственных колебаний (см. рис. 3). При увеличении числа отверстий вероятность P возбуждения устойчивых собственных колебаний сначала плавно, а потом резко уменьшалась. При наличии 16 отверстий, расположенных на участке размером 200×200 мм, собственные колебания на этом участке не возбуждались. Приведенные экспериментальные данные показывают, что для предлагаемого метода существует пороговая величина дефекта, который им однозначно выявляется.

Одно или несколько отверстий (не более 10) не влияли на возбуждение собственных колебаний (см. рис. 3). При увеличении числа отверстий вероятность P возбуждения устойчивых собственных колебаний сначала плавно, а потом резко уменьшалась. При наличии 16 отверстий, расположенных на участке размером 200×200 мм, собственные колебания на этом участке не возбуждались. Приведенные экспериментальные данные показывают, что для предлагаемого метода существует пороговая величина дефекта, который им однозначно выявляется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бетон — материал, не имеющий достаточной однородности, поэтому при использовании предлагаемого метода контроля, зависящего от такого субъективного фактора, как удар, обеспечение высокого уровня стабильности измерений несколько затруднено. Но, как показала практика, при обретении необходимых навыков, использование этого метода позволяет проводить дефектоскопию реальных объектов с удовлетворительной точностью. Как было отмечено выше, метод также можно использовать для дефектоскопии конструкций из огнестойких и кирпичной кладки, которые ультразвуком вообще не контролируются. Например, он позволяет определять не только наличие внутренних трещин, но и нарушение связи между кирпичом и раствором. В настоящее время дефектоскопия вышеперечисленных объектов для обнаружения трещин или других нарушений сплошности никак не регламентирована официальными документами, поэтому для использования предлагаемого метода официальных препятствий нет.

Библиографический список

1. Методические указания по обследованию строительных конструкций, производственных зданий и сооружений тепловых электростанций. Ч. 1. Железобетонные и бетонные конструкции. Служба передового опыта. РД 153-34.1-21.326-2001. М. : ОРГРЭС, 2001. — 35 с.
2. **Джонс, Р.** Неразрушающие методы испытаний бетонов / Р. Джонс, И. Фэкэоару ; пер. с рум. — М. : Стройиздат, 1974. — 292 с.
3. **ГОСТ 17624-87.** Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности.
4. **Исакович, М. А.** Общая акустика : уч. пособие / М. А. Исакович. — М. : Наука, 1973. — 495 с.
5. **Московенко, И. Б.** Низкочастотный акустический контроль физико-механических свойств огнеупорных изделий / И. Б. Московенко // Новые огнеупоры. — 2003. — № 1. — С. 50-55.
6. **Московенко, И. Б.** Некоторые новые результаты неразрушающего контроля физико-механических показателей огнеупорных изделий при их производстве и на службе / И. Б. Московенко // Новые огнеупоры. — 2004. — № 4. — С. 10-11.
7. **Кобылкин, И. Ф.** Ударные и детонационные волны. Методы исследования / И. Ф. Кобылкин, В. В. Селиванов, В. С. Соловьёв [и др.] ; 2-е изд., перераб. и доп. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. — 376 с.
8. **Ландау, Л. Д.** Теоретическая физика. В 10 т. Т. VII. Теория упругости : уч. пособие / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; 4-е изд., испр. и доп. — М. : Наука, 1987. — 248 с.
9. **Ляхов, Г. М.** Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах / Г. М. Ляхов. — М. : Наука, 1982. — 288 с.
10. **Писаренко, Г. С.** Колебания упругих систем с учетом рассеяния энергии в материале / Г. С. Писаренко. — Киев : Изд. Академии наук Украинской ССР, 1955. — 238 с.
11. СТО 36554501-009-2007. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. — М. : ФГУП НИЦ «Строительство», 2007. — 13 с.
12. **Карпова, Н. В.** Классическая теория удара и ее применение к решению прикладных задач : монография / Н. В. Карпова ; 2-е изд., испр. и доп. — СПб. : Петербургский гос. ун-т путей сообщения, 2009. — 208 с.
13. **Беляев, Н. М.** Сопrotивление материалов / Н. М. Беляев ; изд. 5-е, испр. и перераб. — М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. — 772 с.
14. **Александров, В. М.** Контактные задачи в машиностроении / В. М. Александров, Б. Л. Ромалис. — М. : Машиностроение, 1986. — 176 с.
15. **Филин, А. П.** Прикладная механика твердого деформируемого тела: сопротивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики. Т. III / А. П. Филин. — М. : Наука, 1981. — 480 с. ■

Получено 10.01.15
© В. И. Кугушев, 2015 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



14th Biennial Worldwide Congress

UNITECR

2015

VIENNA · AUSTRIA
SEPTEMBER 15-18

Unified International Technical
Conference on Refractories

Partnership in Materials
and Technology

UNITECR 2015 — 14-й Всемирный конгресс и Объединенная техническая конференция по огнеупорам

15-18 сентября 2015 г. г. Вена, Австрия

Темы:

- Огнеупоры для промышленности, *A. Buhr*
- Сырье и переработка, *W. Schönwelski*
- Достижения в области производства, контроля и применения огнеупоров, *P. Tassot*
- Тесты, испытание оборудования и стандартизация, *O. Krause*
- Инновационные материалы и технологии, *B. Buchberger*
- Фундаментальная наука об огнеупорах, *Ch. G. Aneziris*
- Огнеупорный инжиниринг — проектирование, моделирование и модернизация, *H. Harmuth*
- Окружающая среда и устойчивое развитие, *F. Maier*
- Образование, *P. Quirmbach*
- Экономические и политические проблемы, *Ch. Dannert*

www.unitecr2015.org



**UNITECR 2015 пройдет одновременно
с 58-м Международным коллоквиумом
по огнеупорам.**