

6. Alber M., Broggi S., De Wagner C., Eichwurz I., Engstrom P., Fiorino C., Georg D., Hartmann G., Knoos T., Leal F., Martijnissen., Mijnheer B., Paiusco M., Sanchez-Doblado F., Schmidt R., Tomsej M., Welleweerd H. Guidelines for the verification of IMRT // ESTRO booklet. 2008. No. 9. P. 150.

7. **Comprehensive QA** for radiation oncology: Report AAPM Task Group 40 // Medical Physics. 1994. V. 21. P. 581—618.

8. **Code of practice for accelerators:** Report AAPM Task Group 45 // Medical Physics. 1994. V. 21. P. 1093—1121.

9. **Absorbed** dose determination in external beam radiotherapy. An international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water // International Atomic Energy Agency. 2000. No. 398. P. 1—229.

10. Klein E. E., Hanley J., Bayouth J. Quality Assurance of Medical Accelerations. AAPM Task Group 142 Report // Medical Physics. 2009. V. 36. No. 9. P. 4197—4212.

11. Казанцев П. В., Лебеденко И. М., Крылова Т. А., Прусова М. П., Журов Ю. В., Климанов В. А. Практическое применение устройства портальной дозиметрии для проведения ежедневных проверок в рамках программы гарантии качества ускорителей электронов // Медицинская техника. 2016. № 1. С. 52—55.

12. Лебеденко И. М., Шатенко М. П., Крылова Т. А., Журов Ю. В., Казанцев П. В. Рационализация режима проведения предтерапевтических проверок планов ЛТМИ // Медицинская физика. 2015. № 1 (65). С. 45—52.

Дата принятия: 05.09.2016.

АКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

620.179.163:624.155.15

Использование импакт-эхо метода для анализа целостности забивных железобетонных свай

В. К. КАЧАНОВ, И. В. СОКОЛОВ, С. А. ФЕДОРЕНКО, С. В. ЛЕБЕДЕВ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Москва, Россия, e-mail: kachanovvk@mail.ru

Рассмотрены ограничения применимости акустического эхо-метода контроля целостности забивных бетонных свай при дефектах вблизи их поверхности. Получены критерии обнаружения дефекта сваи в компактной области. Показана возможность использования мультипликативного импакт-эхо метода для определения длины сваи при наличии дефекта в её ближней зоне.

Ключевые слова: железобетонная свая, компактное изделие, неразрушающий контроль, акустический эхо-метод, импакт-эхо метод.

Limitations of using of acoustic echo-method for integrity control of precast concrete piles with a defect, which is located close to the surface, is considered. Criteria of detection of a pile defect in a compact domain are obtained. The possibility of using a multichannel impact-echo method for length determination of a pile with a defect in a compact domain is shown.

Key words: concrete pile, compact sample, nondestructive testing, acoustic echo-method, impact-echo method.

Акустический эхо-метод контроля целостности свай. Повышение этажности зданий приводит к увеличению нагрузок на фундамент. Для широко распространённого свайного фундамента используют железобетонные сваи диаметром до 1 м и длиной более 30 м. В процессе забоя в грунт в свае могут образовываться дефекты, от местоположения которых зависит прочность фундамента: если дефект расположен в нижней части сваи, то прочность снижается не столь существенно по сравнению со случаем, когда дефект находится вблизи поверхности сваи. Действительно, если перелом в забитой в грунт свае находится на расстоянии 0,5—1 м от поверхности грунта, то это равноценно отсутствию сваи в общем фундаменте и требует её замены для предупреждения возможной аварии. Таким образом, определение целостности сваи сводится к измерению её длины.

В развитых странах накоплен большой опыт диагностики целостности железобетонных свай, разработаны различные методы контроля, приняты соответствующие стандарты [1]. К сожалению, в Российской Федерации способы контроля свай не регламентированы, и поэтому строители применяют иностранные стандарты или разрабатывают собственные ведомственные регламенты [2, 3].

Наиболее распространённый на сегодняшний день способ контроля целостности сваи — это акустический эхо-метод измерения её длины (Sonic-Echo Method), появившийся более полувека назад [4]. Принцип действия метода основан на возбуждении в свае упругих волн с помощью специального ударника — механического молота массой до 100 кг. Конструкция такого молота аналогична устройству, используемому при геодезических исследованиях, поэтому акусти-

ческий эхо-метод называют также сейсмоакустическим или георадарным эхо-методом. Иногда используют электроискровой излучатель, обеспечивающий короткий (десятки микросекунд) и мощный импульс давления, что позволяет получить большую глубину зондирования (до 40 м).

Другая разновидность акустического эхо-метода — поверхностный или PIT-метод (Pile Integrity Test; иногда встречается название Low Integrity Test System) [4]. Он заключается в том, что по поверхности сваи наносят удар небольшим ручным молотком. При этом в свае возбуждается короткий, но не столь мощный импульс. На рис. 1 показана зависимость амплитуды сигнала A от времени T его прихода, называемая рефлектограммой. Эта рефлектограмма сделана в условном масштабе. Рефлектограмма $A(T)$ является формой представления результата измерения длины сваи на дисплее измерительного устройства. Обычно структура рефлектограммы следующая: в первый момент времени поступает сигнал (импульс) поверхностной волны, он не несёт полезной информации. Далее следуют сигналы от дефектов (если они имеются), последним приходит сигнал от донной поверхности сваи. В данном случае представлены бездефектная и дефектная сваи. Бездефектная свая имеет два импульса (поверхностных волн и донный сигнал), а дефектная — три (поверхностных волн, сигнал от дефекта и донный сигнал). Вдоль сваи проведена линия H , обозначающая направление измерения её длины.

После удара вдоль сваи распространяется продольная звуковая волна, которая многократно переотражается, формируя последовательность затухающих импульсов. Амплитуда импульсов невелика из-за сравнительно слабого удара молотком, а их длительность определяется временем t_c контакта молотка с поверхностью сваи. Это время зависит от вида молотка и составляет от десятых долей до единиц миллисекунд. Таким образом, использование PIT-метода позволяет измерять целостность свай заводского изготовления (известной формы) длиной до 15 м, погруженных забивным способом в плотные грунты, например в скальные породы или юрские глины [3].

Проблема точности измерений характеристик свай в ближней зоне. Применение PIT-метода для определения длины сваи имеет целый ряд ограничений: свая должна иметь постоянное сечение и относительно малое излучение в грунт; дефекты — не превышать 10 % площади поперечного сечения; скорость звука в свае предполагается постоянной и заранее известной; вмещающий грунт должен быть достаточно однородным [5]. При выполнении этих условий сваю можно рассматривать как длинный (сечение d много меньше длины H_{cb}) и тонкий стержень (сечение d много меньше длины звуковой волны λ). В такой свае распространяются только продольные колебания и отсутствуют крутильные и изгибные волны. По времени прихода отражённого от конца сваи импульса T можно измерить длину сваи:

$$H_{cb} = C_{ст} T/2, \quad (1)$$

где $C_{ст}$ — скорость продольной акустической волны в объекте типа «стержень».

Скорость продольной акустической волны определяют как [5]:

$$C_{ст} = (E/\rho)^{1/2}, \quad (2)$$

где E — модуль Юнга; ρ — плотность среды распространения.

В свае формируется последовательность импульсов с периодом повторения T_n , спектр которой представляет собой чётко выраженные максимумы на частотах $f = m/T_n = C_{ст}m/(2H_{cb})$, где f — частота резонанса; $m = 1, 2, 3, \dots$

Чтобы в спектре присутствовала основная (самая низкая) частота резонанса f_0 , необходимо обеспечить сравнительно небольшое время контакта молотка с поверхностью сваи $t_c < 1/f_0$. Если при изготовлении сваи или при её забивании в грунт возникли незначительные дефекты, то на рефлектограмме появляются дополнительные импульсы (см. рис. 1). Если в свае много дефектов, т. е. она имеет непостоянный профиль, а акустическая нагрузка — контрастные границы [6], то волна отражается от дефектов (от границ участка сваи с узким сечением или от контрастных границ «вмещающего» грунта), и на рефлектограмме появляется большое число импульсов, маскирующих донный эхо-сигнал. В результате снижается точность измерения длины свай, а погрешность достигает более 10 % [5].

Основную опасность представляет перелом сваи в ближней зоне, однако определение именно такого дефекта затруднено, так как в этом случае могут нарушаться условия длинного стержня (сечение сваи d становится соизмеримым с длиной H_{cb}). В результате из-за геометрической дисперсии изменяется скорость звука в свае, и выражение (1) не выполняется. Кроме того, появляются дополнительные переотражения сигнала, и дефект, находящийся в пределах ближней зоны, не определяется с помощью приборов, предназначенных для контроля целостности свай. В [3] отмечено, что приведённые в пособиях [2] примеры дефектности свай поясняют только простейшие случаи контроля, при этом методик определения дефектов, находящихся в ближней зоне, нет. Поэтому часто происходит ложное обнаружение зон несплошности, не подтверждённых при выбуривании керна или откопке свай.

Применение импакт-эхо метода при контроле свай в ближней зоне. Для анализа сплошности укороченной сваи, формируемой при переломе в ближней зоне, целесообразно использовать численное моделирование с помощью метода конечных элементов. Для анализа волновых процессов в укороченных сваях до последнего времени численное моделирование не применяли. Подобные задачи решают

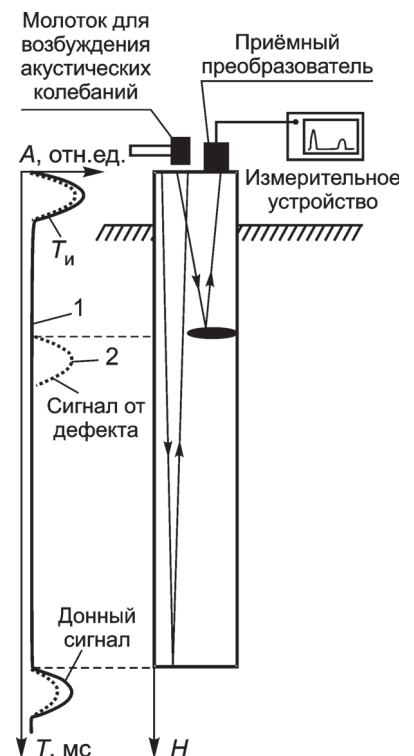


Рис. 1. Измерения целостности свай PIT-методом:

1, 2 — рефлектограммы бездефектной и дефектной сваи, соответственно; T_i — время прихода импульса поверхностной волны

ли с помощью импакт-эхо метода (от англ. impact — удар) [7]. Начиная с 1990-х гг. этот метод используют для измерения толщины бетонных фундаментов, перекрытий и других строительных конструкций, протяжённость которых составляет более 10 м. Толщину таких изделий не удаётся определить ультразвуковыми методами. У импакт-эхо метода и акустического эхо-метода контроля свай общими являются способы возбуждения акустического сигнала с помощью импактора (молотка) и определения толщины изделия по резонансной частоте при известной скорости продольных колебаний. Различие заключается в том, что импакт-эхо метод, как правило, применяют для протяжённых изделий типа «плита», у которых искомая величина (толщина) $H_{пл} \ll d$, а у протяжённых свай — наоборот, искомая величина (длина) $H_{св} \gg d$. По этой причине отличаются и волновые процессы, протекающие в плите и свае и, следовательно, — скорости акустических колебаний.

Анализ волновых процессов в протяжённых изделиях методом численного моделирования позволил установить, что для протяжённой плиты толщина $H_{пл}$ определяется следующим образом [8]:

$$H_{пл} = \beta C_L / (2f), \quad (3)$$

где β — корректирующий коэффициент; C_L — скорость продольной звуковой волны в бесконечном полупространстве; f — частота резонанса.

Корректирующий коэффициент β — отношение скорости продольной звуковой волны в плите $C_{пл}$ к скорости продольной звуковой волны C_L в бесконечном полупространстве, т. е.

$$\beta = C_{пл} / C_L. \quad (4)$$

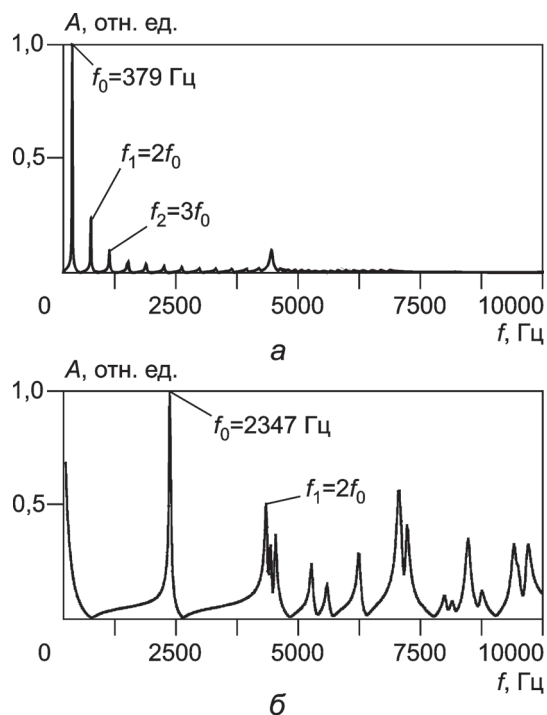


Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики: протяжённой ($l = 12,5$) (а) и компактной ($l = 2$) (б) свай

Для протяжённой плиты $\beta = 0,97$. Использование метода численного моделирования для свай протяжённых, у которых $H_{св} \gg d$ показывает, что формула (3) справедлива и для них, при этом корректирующий коэффициент $\beta = 0,96$. Необходимо отметить, что β зависит от коэффициента Пуассона бетона, а приведённые выше значения для плиты и сваи являются некоторым усреднением, принятым в импакт-эхо методе [8]. Если коэффициент Пуассона известен (например, при задании характеристик бетона в процессе моделирования), то можно рассчитать корректирующий коэффициент плиты более точно, выражая скорости в (4) через плотность, модуль Юнга и коэффициент Пуассона.

Особое место в импакт-эхо методе занимают компактные изделия, у которых искомая величина H_k соизмерима с иными размерами ($H \sim d$). У компактных изделий на спектральной характеристике наряду с толщинным резонансом появляются многочисленные дополнительные резонансные пики из-за переотражений акустической волны от боковых граней бетонного блока [9]. Начиная с некоторого соотношения $(H/d)_k$ амплитуды дополнительных резонансных пиков возрастают и не позволяют однозначно определять искомый толщинный резонансный пик на частоте $f \sim 1/H_k$. Соотношение $(H/d)_k$ можно назвать граничным, а появление на спектре множества дополнительных резонансов можно считать внешним признаком компактности изделия. Другой признак компактности заключается в том, что из-за геометрической дисперсии скорость продольной волны $C_{пл}$ в компактной плите отличается от скорости в протяжённой плите, так как коэффициент коррекции β в компактном изделии отличается от коэффициента коррекции для протяжённого изделия. Ниже показано, что этот же эффект справедлив и для компактных свай.

С учётом сказанного выше предположим, что при изломе сваи в ближней зоне головы возможна ситуация, когда верхняя часть сваи будет представлять собой компактное изделие длиной H_k . Однако в компактной свае нельзя точно измерить длину, вместе с тем по внешнему признаку (существованию многочисленных паразитных гармоник в спектре сваи) можно определить длину H_k как границу перехода от протяжённой области, где $H_{св} \gg d$, $\beta = 0,96$ к компактной области, где $H_k \sim d$, $\beta < 0,96$.

Ниже приведён пример такого определения граничного значения H_k с помощью моделирования волновых процессов в среде ANSYS [10]. В качестве начального объекта моделирования авторы выбрали сваю длиной $H = 5$ м с постоянным квадратным сечением $d = 0,4$ м. При моделировании перелома длину сваи сокращали, а для удобства анализа ввели коэффициент относительного удлинения $l = H/d$, показывающий во сколько раз исследуемый участок H превосходит размеры поперечного сечения d . Для начальной длины $H = 5$ м коэффициент относительного удлинения составлял $l = 12,5$, а для длин 5; 4; 3; 2; 1; 0,8; 0,6; 0,4 м — 12,5; 10; 7,5; 5; 2,5; 2; 1,5; 1, соответственно.

В программной среде ANSYS с помощью модального анализа вычисляли собственные моды колебаний объекта, а затем по этим результатам находили его спектр. При расчёте задавали характеристики бетона, при которых скорость распространения продольной звуковой волны в бесконечном полупространстве $C_L = 4000$ м/с, плотность $\rho = 2400$ кг/м³, модуль Юнга $E = 3,456 \cdot 10^{10}$ Па, коэффициент Пуассона $\mu = 0,2$. Коэффициент β в этом случае определяли по формуле (4), где вместо $C_{пл}$ необходимо поставить стержневую скорость

$C_{ст}$, вычисленную по формуле (2). Для коэффициента Пуассона $\mu = 0,2$, корректирующий коэффициент сваи $\beta \sim 0,95$, что незначительно отличается от общепринятого в импакт-эхо методе значения.

В ходе моделирования было определено, что сваи, у которых $l \geq 5$, не имеют паразитных осцилляций, искажающих амплитудно-частотную характеристику (АЧХ). Начиная с $l \approx 3$ появляются многочисленные дополнительные гармоники, у которых амплитуда соизмерима с амплитудой искомой гармоники, соответствующей резонансу длины сваи. Результат вычислений представлен на рис. 2, а, где показан спектр сваи длиной $H = 5$ м ($l = 12,5$), имеющий один ярко выраженный максимум и более высокочастотные гармоники. По положению спектральной линии однозначно определяется частота $f_0 \sim 1/H$. Частота f_0 на графиках соответствует основной резонансной частоте сваи, по которой определяется её длина. Частоты f_1, f_2 (см. рис. 2, а), а также f_1 (см. рис. 2, б) являются кратными по отношению к основной резонансной частоте f_0 . Они коррелированы с главным максимумом и уменьшаются по амплитуде с увеличением частоты. Вследствие этого данные частоты не могут внести погрешность в измерения, так как всегда будут меньше основного пика. На рис. 2, б показана только частота f_1 , так как другие коррелированные с главным максимумом f_0 частоты замаскированы гармониками компактного объекта. Именно такие гармоники свидетельствуют, что перелом сваи произошёл в компактной области. Однако для компактной сваи, образовавшейся в результате перелома, измерение длины по спектру не столь однозначно. В простейших случаях установить, что перелом произошёл в компактной области, удаётся по многочисленным дополнительным спектральным линиям, как это показано на рис. 2, б на АЧХ сваи для $l = 2$. В этом случае основная спектральная линия соответствует положению самого низкочастотного пика. Чем ближе дефект к ближней зоне, тем сильнее смещение основной гармоники в высокочастотную область, но при этом одновременно возрастает искажение спектра сваи, и искомая гармоника сильнее маскируется помехами. Кроме того, при определении толщины компактной сваи по основной спектральной линии следует учитывать, что, согласно (3), из-за геометрической дисперсии $H_k \sim \beta/f_0$, а коэффициент коррекции β по мере сокращения длины сваи уменьшается (рис. 3). По зависимости $\beta(l)$ также можно судить о существовании перелома сваи в ближней зоне. При $l \leq 3$ коэффициент β начинает резко уменьшаться (см. рис. 3), что свидетельствует о границе компактной области сваи. Зависимость $\beta(l)$ была построена по точкам, т. е. для каждого значения l рассчитывали значение β . Граница, отмеченная как «Компактная зона», определяет появление маскирующих гармоник компактного объекта в спектре, которые уже значительно искажают АЧХ (см. рис. 2, б). Также в этой области происходит смещение основной резонансной частоты f_0 , что будет накладывать погрешность на результат измерения глубины перелома сваи в случае, если выбран неправильный корректирующий коэффициент β .

Иногда определить место перелома сваи по положению самого низкочастотного пика не получается из-за большого числа дополнительных гармоник. Это происходит, например, при контроле забитых в грунт свай, когда на спектре возникают гармоники, обусловленные влиянием грунта и неидеальностью тела сваи. В этом случае для измерения длины компактной сваи можно использовать предложенный в МЭИ мультипликативный импакт-эхо метод, при котором импактором инициируется ударная волна в нескольких простран-

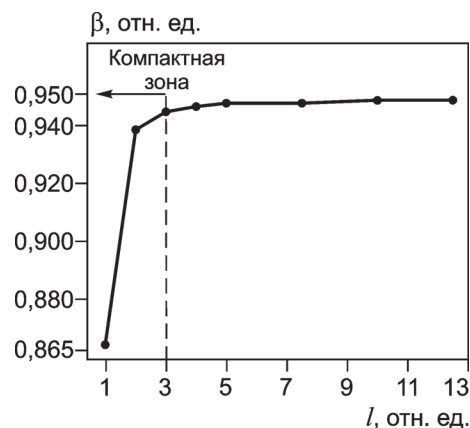


Рис. 3. Определение компактной зоны сваи по зависимости $\beta(l)$

ственно разнесённых точках на поверхности изделия [11, 12]. Парциальные спектральные характеристики компактного изделия, полученные для каждого положения импактора, содержат линии, соответствующие искомой толщине. Одновременно на них присутствуют побочные спектральные линии, амплитуды и частоты которых различны, так как они определяются переотражениями сигнала внутри компактного объекта контроля в различных условиях, возникающих при возбуждении акустического импульса импактором в разных точках поверхности. После перемножения парциальных спектральных характеристик эти побочные спектральные линии усредняются, а основная гармоника, положение которой неизменно и по которой определяется длина укороченной сваи, возрастает. При этом для определения истинного значения глубины расположения перелома сваи также следует учитывать коэффициент коррекции β .

Закключение. В результате исследований показано, что в случае возникновения перелома сваи вблизи поверхности верхняя часть сваи может рассматриваться как компактный объект. Установить существование перелома в компактной области сваи и оценить её пригодность для фундамента здания можно по виду спектра. С помощью численного моделирования для дефектной сваи установлена граница компактной области ($l \approx 3$). Для определения истинного значения глубины расположения перелома компактной сваи следует использовать мультипликативный импакт-эхо метод.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-00166).

Л и т е р а т у р а

1. **ASTM D5882—07.** Standard Test Method for Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations.
2. **Технологический** регламент по применению неразрушающего экспресс-контроля сплошности свай методом «СО-НИК» (ОАО ЦНИИС, 2002). [Электрон. ресурс]: <http://www.aigeos.ru/std/sonic2002.pdf> (дата обращения 20.04.2016).
3. **Архипов А. Г.** Устройство и неразрушающий акустический контроль сплошности буронабивных свай [Электрон. ресурс]: <http://www.geodiagnostics.ru/Controlpiles.htm> (дата обращения 28.04.2016).
4. **Turner M. J.** Integrity testing in piling practice. London: CIRIA. 1997.
5. **Капустин В. В.** Применение волновых методов для определения длины свай // Технология сейсморазведки. 2009. № 2. С. 113—117.

6. Мангушев Р. А., Пономарёв А. Б. К вопросу контроля качества изготовления и приёмки буронабивных свай // Вестник НИПУ. 2014. № 3. С. 88—111.

7. ASTM C1383—2004. Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method.

8. Sansalone M., Streett W. B. Impact-Echo: Nondestructive Testing of Concrete and Masonry. Jersey Shore, PA.: Bullbrier Press, 1997.

9. Качанов В. К., Соколов И. В., Авраменко С. Л. Проблемы акустического контроля крупногабаритных строительных конструкций из бетона // Дефектоскопия. 2008. № 12. С. 12—22.

10. ANSYS—2009. Structural Analysis Guide. ANSYS User's Guide Release 14.5. Pennsylvania, USA: ANSYS, Inc.

11. Качанов В. К., Авраменко С. Л., Концов Р. В. Корреляционный мультипликативный метод измерения скорости распространения акустических колебаний в крупногабаритных изделиях из бетона // Измерительная техника. 2009. № 11. С. 52—54.

12. Пат. 2354932 РФ. Резонансный способ ультразвуковой толщинометрии / С. Л. Авраменко, И. В. Соколов, В. К. Качанов // Изобретения. Полезные модели. 2009.

Дата принятия: 28.06.2016.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

66.063.2.011

Определение коэффициента диффузии при неразрушающем контроле тонких изделий из анизотропных пористых материалов

В. П. БЕЛЯЕВ, С. В. МИЩЕНКО, П. С. БЕЛЯЕВ

Тамбовский государственный технический университет,
Тамбов, Россия, e-mail: bps@asp.tstu.ru

Предложен метод определения коэффициента диффузии растворителей в тонких пористых материалах с существенной анизотропией свойств, обеспечивающий возможность непосредственного неразрушающего контроля изделий из анизотропных пористых материалов. Рассмотрены вопросы повышения производительности и точности применяемого метода.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, пористый материал, коэффициент диффузии, анизотропия.

Method for determining the diffusion coefficient of solvents in thin porous materials characterized by a significant anisotropy of their properties is proposed. The method allows to control products without destroying them. The problems of ensuring the productivity and the accuracy for proposed non-destructive method is considered.

Key words: non-destructive testing, porous material, diffusion coefficient, anisotropy.

Одним из перспективных направлений развития химической технологии в РФ и за рубежом является получение известковых поглотителей диоксида углерода CO_2 на основе гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в форме листовых пористых материалов, что позволяет существенно улучшить массогабаритные показатели защитных аппаратов органов дыхания человека и повысить эффективность процесса хемосорбции [1]. Специфика поглощения диоксида углерода в таких материалах — гетерогенный процесс взаимодействия газовой, жидкой и твердой фаз с последовательными реакциями, протекающими через плёнку щелочного раствора на твердой поверхности хемосорбента. В результате жёсткой конкуренции появляется значительное количество новых материалов, отличающихся полимерными связующими, армирующими волокнами, различными добавками для улучшения технологичности процессов получения листовых поглотите-

лей (ЛП) и их качественных характеристик [1]. Для эффективного протекания процесса хемосорбции сорбент должен иметь заданные содержания влаги и щёлочи, что обеспечивается стадиями увлажнения и активации хемосорбента водными растворами щёлочи. При эксплуатации ЛП диффузия также является лимитирующим фактором хемосорбции диоксида углерода. Для оптимизации процессов производства ЛП и проектирования на их основе защитных аппаратов необходимо знать коэффициенты диффузии используемых растворителей. Варьирование составами и содержанием модификаторов приводит к существенным изменениям пористости и морфологии поверхности ЛП и, соответственно, к значительным изменениям коэффициентов диффузии. Кроме того, применение волокнистых наполнителей в составе модификаторов может приводить к явно выраженной анизотропии свойств ЛП вдоль и поперек расположения волокон.