

УДК 658.562:681.518.54

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ И СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО ЗВУКОВОМУ ИНДЕКСУ

Е. З. КОВАРСКАЯ, И. Б. МОСКОВЕНКО, И. В. ПАВЛОВ

ООО «ЗВУК»

Санкт-Петербург, Россия

QUALITY CONTROL AND CONTROL OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SOLID AND SUPERSOLID MATERIALS BY SOUND INDEX

E. Z. KOVARSKAYA, I. B. MOSKOVENKO, I. V. PAVLOV

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы определения показателей качества и, в частности, интегральных физико-механических характеристик изделий из твёрдых и сверхтвёрдых материалов в изделиях по их резонансным частотам и обосновывается возможность применения для оценки качества материалов в изделиях предлагаемого критерия – звукового индекса (ЗИ). Рассматриваются результаты практического применения ЗИ для оценки качества абразивных и других изделий из высокопрочных конструкционных материалов.

Ключевые слова: частота собственных колебаний (ЧСК), композиционные материалы, резонансные частоты, физико-механические характеристики, качество, контроль, приборы, методика контроля.

Abstract. The article considers the issues of determining the quality indicators and, in particular, the integral physical and mechanical characteristics of products made of solid and superhard materials in products based on their resonant frequencies and substantiates the possibility of using the criterion proposed by the authors – the sound index (SI) for evaluating the quality of materials in products. The article considers the practical results of the practical application of SI for evaluating the quality of abrasive products, and other products made of high-strength structural materials.

Key words: natural oscillation frequency (HSC), composite materials, resonant frequencies, physical and mechanical characteristics, quality, control, devices, control methods.

Целью статьи является обсуждение возможностей и опыта использования частот собственных колебаний (ЧСК) изделий и специально подготовленных образцов для оценки физико-механических свойств и оценки других качественных показателей различного рода материалов и изделий, в первую очередь из композиционных материалов с большим затуханием акустических волн, для которых применение традиционных методов звукового и ультразвукового контроля затруднено или вообще невозможно. Это, прежде всего, изделия из керамических, полимерных и композиционных материалов, а также изделия с поверхностью, затрудняющей введение ультразвуковых колебаний, например, чугунное литье, огнеупоры, абразивные изделия и т. п.

Существует метод [1–3], при котором контролируемое изделие колеблется как одно целое, вернее колеблются одни части тела относительно других. Ряд физических характеристик тела может быть определен по параметрам возбуждаемых колебаний. В большинстве случаев на практике частоты собственных колебаний тел лежат в звуковом диапазоне и лишь только некоторые частоты близки к 20 кГц.

Современные компьютеризированные дефектоскопы, основанные на разных физических принципах, часто позволяют с большой точностью определить координаты и размеры дефектов, но вот определение влияния даже трёх произвольно расположенных дефектов на несущую способность конструкции, находящейся в сложнапряжённом состоянии часто представляет собой трудноразрешимую проблему с большим количеством допущений, сводящим к нулю все преимущества высокоточного определения координат и размеров дефектов. Кроме этого, дефектоскопы калибруются по стандартным образцам (СО), где поры и пустоты имитируются сверлениями, трещины – надрезами и т. д. Влияние сверления в монолитном материале с известным модулем упругости и поры, образовавшейся в результате (например, в случае композиционных материалов) недопрессовки или перепрессовки и окруженной монолитным, но дефектным материалом, пористым, с нарушенным соотношением компонентов, на несущую способность изделия в целом совершенно разное. Аналогично, влияние трещины на ослабленном участке материала, с нулевым радиусом при вершине, являющейся концентратором напряжений и надпила с одинаковой длиной, но с радиусом при вершине 1...3 мм в монолитном материале несопоставимы. Понятно, что это может приводить на практике к большим ошибкам, недобраковкам и перебраковкам, в определении несущей способности изделий.

Рассматриваемый метод и математическое обоснование его реализации свободны от этих недостатков трактовки результатов, так как позволяют, минуя стадию поиска дефектов, сразу определять их влияние на несущую способность конструкции. Метод особенно хорош в тех случаях, когда требуется отобрать из партии лучшие или худшие изделия, или изделия по качеству сопоставимые с эталоном.

Известно [2, 3], что в общем виде взаимосвязь ЧСК изделий со скоростью распространения акустических волн в материале, из которого они изготовлены, может быть представлена в виде

$$f_i = F_i \cdot C_l, \quad (1)$$

где f_i – частота собственных колебаний определенного вида i ; F_i – коэффициент формы, зависящий от формы и размеров изделий, коэффициента Пуассона, а также от вида возбуждаемых колебаний i ; C_l – приведенная скорость распространения акустических волн, $C_l = \sqrt{E/\rho}$

(определение по ГОСТ 25961–83 и ГОСТ Р 52710–2007) – скорость распространения упругих колебаний в бесконечно длинном стержне, изготовленном из такого же материала, что и материал контролируемого объекта; E – модуль нормальной упругости (модуль Юнга); ρ – плотность материала изделия.

Из выражения (1) следует, что при одинаковой форме и размерах изделий частота f_i , соответствующая определенному виду (моду) колебаний, характеризует приведенную скорость распространения акустических волн C_i . Этот параметр является упругой константой материала изделия, связанной с модулем Юнга, плотностью, прочностью, пористостью, твердостью и другими физико-механическими свойствами материала, а также с наличием дефектов или нарушением структуры материала изделия. С другой стороны, при одинаковых значениях скорости C_i частота f_i может изменяться при изменении коэффициента формы F_i , которое может быть вызвано как изменением геометрических размеров, так и влиянием достаточно крупных дефектов. Таким образом, в любом случае изменение частоты f_i определенной моды колебаний означает либо изменение физико-механических свойств материала изделия, либо наличие в нем дефектов. При этом и ухудшение физико-механических свойств материала (уменьшение прочности, твердости и т. п.) и наличие дефектов обычно приводят к понижению значения ЧСК.

Основные области, в которых уже нашел применение описанный метод контроля для решения практических задач:

- контроль шлифовального инструмента на всех видах связок, в том числе фасонного (профилированного, с выточками), отрезных кругов любого диаметра, а также малогабаритных инструментов диаметром 8 мм и менее, для определения физико-механических свойств которого не могут быть использованы традиционные методы контроля твердости;
- контроль огнеупорных изделий;
- контроль углеграфитовых изделий;
- контроль отливок из чугуна и других металлов;
- контроль изделий из высокопрочной керамики, в том числе ситаллов и синтетических сверхтвердых материалов;
- контроль частот собственных колебаний турбинных лопаток;
- контроль строительных изделий и диагностика состояния зданий, сооружений и других строительных конструкций;
- определение упругих констант (модулей упругости, коэффициента Пуассона и др.) материала изделий различной формы, изготовленных из различных материалов.

В настоящее время метод контроля, основанный на измерении ЧСК, начинает находить применение также и для решения задач дефектоскопии различного рода литья [4], для контроля состояния деревянных опор линий

электропередач (ЛЭП) [5], для определения плотности древесины при оперативном таможенном контроле, для контроля трещиноватости гранитных блоков [6], для контроля изделий, используемых на железнодорожном транспорте (ж.-д. колеса и оси, подвесная арматура контактной сети и т. п.).

При использовании акустических методов контроля, основанных на измерении ЧСК изделий, требуется разработка специальных методик контроля, учитывающих форму и размеры изделий. Такие методики были, в первую очередь, разработаны применительно к контролю абразивных изделий для большинства типоразмеров шлифовальных инструментов на всех видах связок (керамических, бакелитовых, вулканизованных). В России применение разработанных методик для контроля основных типоразмеров абразивных инструментов регламентировано ГОСТ Р 52710–2007 *Инструмент абразивный. Акустический метод контроля твердости и звуковых индексов по скорости распространения акустических волн* (ранее ГОСТ 25961–83 (СТ СЭВ 3313–81) *Инструмент абразивный. Акустический метод контроля физико-механических свойств* [7]). В соответствии с указанным стандартом рекомендовано использование для измерения ЧСК приборов типа «Звук» или других приборов с аналогичными техническими характеристиками.

В настоящее время в отечественной промышленности наиболее широкое применение находят измерители частот собственных колебаний типа «Звук» различных модификаций, выпускаемые ООО «ЗВУК» (г. Санкт-Петербург), приборы типа ИЧСК-1, ИЧСК-2, выпускаемые НПП «Интерприбор» (г. Челябинск); из зарубежных аналогичных приборов наибольшее применение для производственного контроля находят приборы типа «GrindoSonic», выпускаемые фирмой «Lemmings Electronika» (Бельгия). Различные модификации приборов типа «Звук» включают приборы, действие которых основано на использовании как метода свободных, так и метода вынужденных колебаний.

На использовании **метода свободных колебаний** основано действие прибора «Звук-203М» (рис. 1), реализующего патент России № 2151385. Частотный диапазон прибора от 22 Гц до 17,4 кГц позволяет контролировать изделия в широком диапазоне размеров, приблизительно от 20...50 см до нескольких метров. Колебания в изделии возбуждаются ударом с помощью молотка или специального ударника, а в качестве приемника колебаний используется встроенный в корпус прибора микрофон. Возможно подключение внешнего микрофона или пьезоэлектрического датчика. Предусмотрена также возможность подключения прибора к компьютеру, что при разработке специализированных под конкретное изделие программ дополнительно расширяет возможности его использования. Основное отличие прибора «Звук-203М» от упомянутого зарубежного прибора «GrindoSonic», использующего этот же метод

измерения, состоит в том, что в приборе имеются полосовые фильтры, с помощью которых возможно выделять не только основной тон, но и более высокие ЧСК изделия.

Метод вынужденных колебаний (резонансный метод) реализован в приборе «Звук-130» (рис. 2). Частотный диапазон прибора от 0,5 до 500 кГц позволяет контролировать малогабаритные изделия с размерами от 3 мм и даже менее, в том числе такие, контроль физико-механических свойств которых в настоящее время никакими другими методами не производится.



Рис. 1. Прибор «Звук-203М»

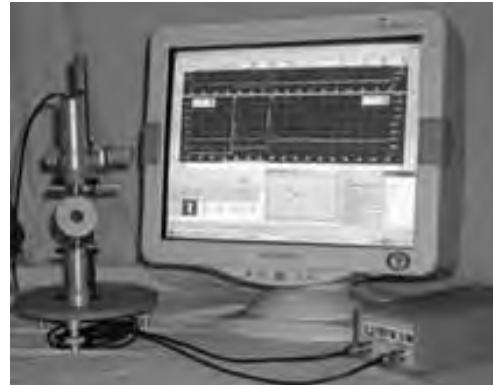
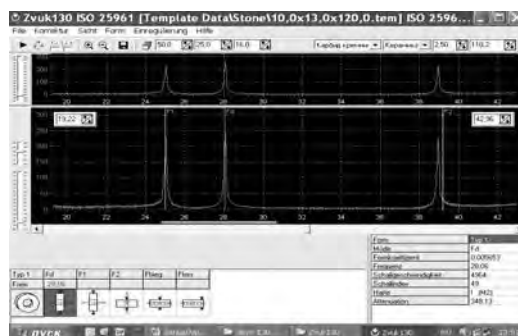


Рис. 2. Прибор «Звук-130»

Контролируемое изделие закрепляется в измерительной стойке между двумя пьезоэлектрическими преобразователями, снабженными куполообразными насадками для уменьшения влияния приемно-излучающей системы на колебания изделия (патент Германии № 1648770, патент США № 3499318, патент Англии № 1153241, патент Франции № 1527366). Электронная часть прибора, включающая генератор переменной частоты и широкополосный усилитель, выполнены в виде отдельного блока, подключаемого к компьютеру. Работой прибора управляет специальная программа, по которой производится расчет ожидаемого спектра ЧСК контролируемого изделия и выбор условий измерения для конкретных типоразмеров изделий различных форм и размеров. Результаты контроля выводятся на экран монитора в графическом и цифровом виде (рис. 3).



Наиболее широко используемые в настоящее время в отечественной промышленности специализированные измерители частот собственных колебаний типа «Звук» сочетают требование простоты и надежности с достаточно высокой точностью измерения ЧСК. Разработано также специальное программное обеспечение, необходимое для расчета упругих констант и анализа спектра ЧСК при контроле изделий различных форм и размеров. Комплект приборов «Звук» типа «Звук-130» и «Звук-203М» обеспечивает возможность проведения анализа спектра ЧСК как крупногабаритных заготовок и изделий, так и изделий весьма малых размеров непосредственно в условиях их производства и эксплуатации.

Совместными работами с фирмой «Абразив» (Чехия) был выполнен комплекс работ, позволивших применить этот метод и приборы «Звук» для его реализации не только в отечественной промышленности, но и на ряде зарубежных фирм в таких развитых странах, как Австрия, Германия, Индия, Италия, Китай, Польша, США, Чехия, Швейцария и др., не только для контроля абразивных инструментов, но и изделий из других материалов [8].

Специалистами фирмы «Гранит» (Венгрия) был выполнен значительный комплекс работ по освоению акустического метода контроля физико-механических свойств и качества абразивных изделий, который позволил включить этот метод в государственный стандарт Венгрии MSZ 4505/9-83. Венгерскими специалистами было подтверждено, что этот метод позволяет производить расшифровку низкочастотного спектра собственных колебаний мелкогабаритного абразивного инструмента и дает возможность проведения серийных акустических испытаний абразивного инструмента с учетом влияния основных рецептурно-технологических факторов, при этом акустический параметр C_l шлифовальных инструментов хорошо отражает изменение плотности ρ шлифовального круга. Изготовленные из заданной рецептурной смеси инструменты характеризуются имеющейся между этими двумя параметрами C_l и ρ зависимостью общего характера, причем проведенные венгерскими специалистами эксперименты подтвердили, что у инструментов, изготовленных из заданной рецептурной смеси эта зависимость линейная.

Выполненные совместные работы позволили также провести освоение акустического метода контроля в условиях производства фирмы «Дрезден Унион» (Германия), причем в Германии применение метода было регламентировано государственным стандартом ГДР TGL 55047.

В Чехословакии на фирме «Карборундум электрит» этот метод был включен в технологический процесс производства абразивного инструмента с использованием специально разработанного программного обеспечения.

В приборах типа «Звук» предусмотрено получение конечного результата измерений в следующих формах: ЧСК (f), скорость звука (C_l), модуль Юнга (E). Возможно также получение других физико-механических

характеристик изделий при условии введения соответствующих корреляционных зависимостей. Для удобства эксплуатации приборов в промышленных условиях и осуществления сортировки контролируемых изделий предусмотрено также получение результата в виде так называемых звуковых индексов (ЗИ) – градаций скорости звука C_l с определенным шагом. ЗИ обозначается нечетным двухзначным числом, умножение которого на 100 дает среднее для данной градации значение скорости звука C_l , м/с. Звуковой индекс, по сути дела, может рассматриваться в качестве меры физико-механических свойств различных материалов. Этот параметр нашел достаточно широкое применение для оценки и контроля физико-механических свойств различного рода абразивных изделий в соответствии с упомянутым стандартом ГОСТ Р 52710–2007 (ранее ГОСТ 25961–83). Использование пронормированной в виде звукового индекса ЗИ величины C_l в качестве выходного параметра при акустическом контроле позволяет производить определение и контроль физико-механических свойств изделий как при их изготовлении, так и в условиях их эксплуатации. Для обозначения ЗИ в соответствии с упомянутым стандартом используются нечетные числа от 19 до 75, охватывающие диапазон C_l от 1800 до 7500 м/с. Этот диапазон позволяет оценивать физико-механические свойства практически всех основных выпускаемых в настоящее время абразивных инструментов, начиная с самых мягких кругов на вулканитовых связках, вплоть до самых твердых кругов на керамических связках, используемых для обработки шариков в подшипниковой промышленности. При необходимости, диапазон значений ЗИ может быть расширен, так, например, режущим инструментам из композиционных материалов, полученным на базе кубического нитрида бора, соответствуют ЗИ 109–155, в то же время ЗИ менее 19 имеют, например, гибкие порошковые круги. Следует отметить, что звуковой индекс является высокоинформативным параметром и в ряде случаев позволяет оценивать физико-механические свойства самых разнообразных изделий не только из абразивных, но и из других видов материалов. Значения ЗИ и C_l некоторых твердых и сверхтвердых материалов, определенные акустическим методом с применением приборов типа «Звук», приведены в табл. 1. Там же для сравнения приведены значения Е-модуля и микротвердости этих материалов, взятые из справочной литературы. Как видно из табл. 1, с уменьшением скорости C_l и, соответственно, ЗИ уменьшается и микротвердость, являющаяся одной из основных характеристик материалов подобного рода. Для модуля упругости, который в ряде случаев используется для оценки физико-механических свойств подобных материалов, во всем диапазоне рассмотренных материалов такой зависимости не наблюдается. Это позволяет рассматривать звуковой индекс в качестве дополнительной меры, характеризующей физико-механические свойства подобных материалов.

Табл. 1

Материал или изделие	Е-модуль, $10^3 \cdot \text{кгс/мм}^2$	Скорость распространения упругих колебаний $C_l, 10^3 \cdot \text{м/с}$	Звуковой индекс	Микро- твердость Н, кгс/мм^2
Алмаз	50,2...85,0	15,7...15,9	157...159	10000
Эльбор	62,0...95,0	12,0...15,6	125...157	9000
Карбид бора	29,6	10,8	107...109	3700...4300
Карбид кремния	36,5	10,6	105...107	3000...3300
Материалы С2, С8 на основе карбида кремния	34,5...41,0	10,9...11,6	109...117	—
Термокорунд	35,5...41,0	9,6...10,2	95...103	2000...2400
Минералокерамика горячего прессования	40,5...44,5	10,0...10,5	99...105	—
Карбид вольфрама	72,2	6,7	67	1730
Быстрорежущая сталь Р18	22,0	5,0	49...51	1300...1400

При введении в качестве выходного параметра контроля C_l и соответствующих значений ЗИ, как следует из выражения (1), должны быть стандартизованы вид колебаний, собственная частота которых подлежит измерению при контроле, и соответствующий этому виду колебаний коэффициент формы F_i , зависящий от размеров и формы изделий и незначительно от коэффициента Пуассона, который с достаточной степенью точности может быть принят постоянным, например, для большинства видов абразивных изделий. При использовании акустического метода для контроля абразивных изделий типа шлифовальных кругов прямого профиля, отрезные и обдирочные круги, бруски и сегменты наиболее широкое распространение находят пять основных видов колебаний, для коэффициентов формы которых получены аналитические зависимости, учитывающие влияние размеров и формы изделий [2].

Для изделий более сложной формы, включая различного рода головки, круги в форме чашек и тарелок, профилированные круги и т. п., коэффициенты формы определяются по специальным методикам с проведением при необходимости дополнительных экспериментальных исследований.

Указанные методы и приборы нашли достаточно широкое применение для определения физико-механических свойств различных материалов и изделий, входного и выходного контроля, оценки стабильности

технологического процесса изготовления различных изделий, подбора комплектов изделий с одинаковыми или специально заданными свойствами, мониторинга состояния изделий при эксплуатации в циклических режимах и т. п. [3]. Порядок применения метода в различных областях регламентируется как стандартами, так и отдельными специально разработанными методиками контроля.

Возможность **определения упругих констант материалов** таких как модуль Юнга, коэффициент Пуассона и других параметров, характеризующих упругие свойства различных материалов по результатам измерения ЧСК, представляет большой интерес при определении и исследовании свойств новых сверхтвердых и композиционных материалов, особенно в том случае, когда размеры или структура образцов не позволяют использовать известные разрушающие и неразрушающие методы контроля для определения указанных параметров. Наличие алгоритмов контроля и возможность получения высокой точности измерения отдельных составляющих спектра ЧСК позволяют использовать для анализа спектра непосредственно приборы типа «Звук» различных модификаций или другие аналогичные устройства.

Дефектоскопия изделий. Акустический контроль, основанный на измерении ЧСК, дает интегральную оценку всего объема изделия, однако, как было сказано выше и следует из выражения (1), при одинаковых значениях скорости C_1 частота f_i может изменяться при изменении коэффициента формы F_i , которое может быть вызвано как изменением геометрических размеров, так и влиянием крупных дефектов. Таким образом, в любом случае изменение частоты f_i определенной моды колебаний означает либо изменение физико-механических свойств материала изделия, либо наличие в нем дефектов. При этом и ухудшение физико-механических свойств материала (уменьшение прочности, твердости и т. п.), и наличие дефектов обычно приводят к понижению значения ЧСК. Как следует из формулы (1), можно разделить влияние на значения ЧСК физико-механических свойств материала контролируемого изделия и его геометрии, для чего необходимо рассматривать не только само значение ЧСК, но и отношение частот собственных колебаний двух различных мод «i» и «k», которое не зависит от скорости C_1 и определяется только геометрическими факторами, в том числе наличием дефектов:

$$\frac{f_i}{f_k} = \frac{F_i}{F_k}. \quad (2)$$

При одинаковых геометрических размерах выражение (2) фактически описывает изменение спектра ЧСК изделия при наличии в нем дефектов. При реализации метода, основанного на измерении ЧСК, для целей дефектоскопии необходимо разрабатывать специальные методики

контроля, обеспечивающие надежное выделение из спектра ЧСК соответствующих выбранных для контроля видов (мод) колебаний и исключают влияние на результаты измерений формы и размеров изделий и образцов. Обычно наличие нарушений сплошности структуры изделия и наличие в нем дефектов, как было указано выше, приводит к понижению ЧСК и соответствующего значения C_l ниже некоторого заранее определенного значения и к изменению спектра ЧСК, т. е. изменению соотношения между ЧСК разных видов колебаний. Эти обстоятельства в ряде случаев позволяют обнаруживать различного рода нарушения сплошности, в первую очередь трещины, и неоднородности.

Специалистами ООО «ЗВУК» и кафедры приборостроения Горного университета (г. Санкт-Петербург), был разработан проект целевой научно-технической программы «Неразрушающий контроль качества и диагностика огнеупорных материалов и изделий», который может быть использован при дальнейшем освоении акустического метода контроля физико-механических свойств и качества огнеупоров, а также был разработан аналогичный указанному выше проект целевой научно-технической программы «Разработка рекомендаций по освоению неразрушающих методов контроля физико-механических свойств и качества изделий из углеродных материалов», который может быть использован при дальнейшем освоении акустического метода контроля физико-механических свойств и качества углеродных и углеграфитовых изделий.

При проведении дополнительных научно-исследовательских работ области применения метода могут быть существенно расширены как в направлении контроля физико-механических свойств различного рода материалов и изделий, так и в направлении дефектоскопии изделий и определения состояния и остаточного ресурса различного рода конструкций, зданий и сооружений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Неразрушающие испытания: справочник: пер. с англ. / Под ред. Р. Мак-Мастера. – Москва; Ленинград: Энергия, 1965. – Кн. 2. – С. 418–426.
2. **Глаговский, Б. А.** Низкочастотные акустические методы контроля в машиностроении / Б. А. Глаговский, И. Б. Москоуенко. – Ленинград: Машиностроение, 1977. – 206 с.
3. **Коварская, Е. З.** Опыт промышленного использования акустического метода оценки физико-механических свойств изделий по частотам собственных колебаний / Е. З. Коварская, И. Б. Москоуенко // Дефектоскопия. – 1991. – № 6. – С. 9–15.
4. **Коварская, Е. З.** Определение прочности и твердости отливок из чугуна методом свободных колебаний / Е. З. Коварская, А. К. Голдобин,

А. В. Антонов // В мире неразрушающего контроля. – 2012. – № 4 (58). – С. 20–24.

5. Устройство для звукового контроля деревянных опор: пат. RU 85238 / И. Б. Московенко, В. В. Гаврилов, Е. З. Коварская, О. А. Кононов, И. Я. Лиманов. – Оpubл. 27.07.2009.

6. **Павлов, И. В.** К вопросу неразрушающего контроля трещин в горных породах, ведущих к разрушению каменных изделий в процессе хранения, транспортировки и применения. Строительный камень от геологии до архитектуры / И. В. Павлов, Н. А. Кутин, Н. А. Ирканаева. – Петрозаводск, 2015. – С. 151–159.

7. **ГОСТ 25961–83 (СТ СЭВ 3313-81).** Инструмент абразивный. Акустический метод контроля физико-механических свойств. – Москва: Изд-во стандартов, 1984. – 16 с.

8. Natural oscillation frequencies measuring and test of articles and materials / E. Kovarskaya, I. Moskovento, L. Slavina, M. Zima, L. Rekhson // The 15-th international DAAAM Symposium. – Vienna, Austria, 3–6-th November 2004. – S. 261–262.