

- nation by the hole-drilling method / Visualization of Mechanical Processes. 2011. Vol. 1. N 1. DOI: 10.1615/VisMechProc.v1.i1.40.
20. Murakami Y. (ed.). Stress Intensity Factors Handbook: in 2 Volumes. Vol. 1. — Oxford: Pergamon Press, 1987. — 624 p.
21. Pisarev V. S., Gorodnichenko V. I., Grishin V. I. Ob''emnoe deformirovannoe sostoyanie v rastyagivaemoi polose s otverstiem po dannym éksperimental'nogo, raschetnogo i kombinirovannogo metodov [Volume deformation state of the plate with hole under tension by data of experimental, numerical and combined methods] / Uch. Zap. TsAGI. 1989. Vol. 20. N 5. P. 67 – 75 [in Russian].
22. Siratori M., Miesi T., Matsusita Kh. Vychislitel'naya mekhanika razrusheniya [Computational fracture mechanics]. — Moscow: Mir, 1986. — 334 p. [Russian translation].

УДК 620.179.16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОМ КОНТРОЛЕ ПРЯМЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

© С. О. Пилюгин, В. П. Лунин¹

Статья поступила 21 января 2015 г.

Описана методика построения кривой вероятности обнаружения дефектов при их контроле в основном металле деталей из алюминия. Отмечены мешающие факторы, приведены конечно-элементная модель для получения эхо-сигналов, способ симуляции мешающих факторов, математический аппарат для построения кривой вероятности обнаружения дефектов. Представлен анализ результатов симулирования 350 различных дефектов и построена кривая вероятности их обнаружения.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль; вероятность обнаружения дефектов; POD; эхо-метод; прямой преобразователь; симуляция; мешающие факторы.

Вероятность обнаружения дефекта — это вероятность того, что дефект определенных вида и размера может быть обнаружен с использованием конкретных методов неразрушающего контроля и оборудования. Знание вероятности обнаружения является важным показателем качества неразрушающего контроля. Оно позволяет уточнять надежность и прочность конструкций, что, в свою очередь, дает возможность управлять риском их разрушения и повреждения во время эксплуатации.

Наиболее ответственные элементы конструкций различных изделий авиакосмической отрасли выполняют из металлических материалов. Из сплавов на основе алюминия, титана и магния изготавливают корпуса космических аппаратов, ракетносителей и самолетов (обечайки, шпангоуты, силовые рамы) и элементы двигательных установок (корпуса, топливные баки, баллоны высокого давления, лейнеры). В процессе изготовления детали подвергают обработке давлением, резке, сварке, пайке.

Для обеспечения высокой надежности и прочности весь объем ответственных деталей контролируют такими методами, как рентгеновский, ультразвуковой и вихретоковый.

В данной работе рассмотрена методика построения кривой вероятности обнаружения объемных дефектов (кривой POD) в случае их контроля в основном металле деталей из алюминия.

Для контроля объемных дефектов в основном металле обычно используют прямые совмещенные пьезоэлектрические преобразователи частотой от 2,5 до 10 МГц в эхо-импульсном режиме. Данное исследование проводили с помощью преобразователя П111-10-К4 частотой 10 МГц и диаметром пьезопластины 4 мм.

Объект контроля — плоский лист из алюминиевого сплава АМг6 толщиной 10 мм. Из таких листов делают обечайки, лейнеры, топливные баки и многие другие детали.

В общем случае ультразвуковой контроль состоит из трех стадий: калибровка, поиск дефектов, измерение из параметров. Во время калибровки настраивают скорость ультразвука в материале объекта контроля, глубиномер, чувствительность.

Для калибровки применяют меры СО-2 и СО-3 (ГОСТ Р 55724–2013), для настройки чувствительности — образцы с зарубками, плоскодонными и боковыми отверстиями, которые являются эталонными отражателями. Полученные эхо-сигналы сравнивают с эхо-сигналом от эталонного отражателя и выражают в децибелах. Поисковый и браковочный уровни также отсчитывают от эталонного.

Выбор образца и эталонного отражателя для настройки чувствительности зависит от методики контроля. Материал образца и состояние его поверхности должны быть идентичны натурному объекту контроля. Это позволяет избавиться от погрешностей, вносимых неправильным определением скорости звука,

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия; e-mail: sopilyugin@gmail.com

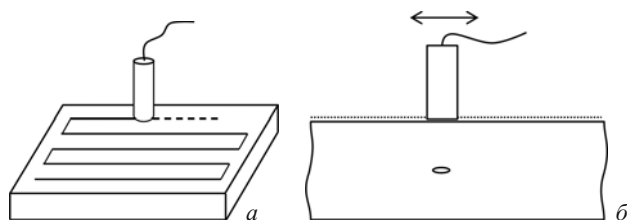


Рис. 1. Схемы перемещения преобразователя при сканировании (а) и измерения параметров дефекта (б)

разным состоянием и обработкой поверхности объекта контроля. В качестве эталонного отражателя выбрано боковое отверстие диаметром 1 мм, расположенное на расстоянии 5 мм от поверхности образца.

На этапе поиска дефекта проводили сканирование листа по определенной траектории в соответствии с методикой контроля. Схема перемещения преобразователя показана на рис. 1, а. Шаг смещения связан с зоной контроля преобразователя, скорость сканирования зависит от зоны контроля и частоты следования импульсов. Данные параметры подбирают таким образом, чтобы весь объем зоны контроля оказался «прозвучен». На практике оговаривают шаг смещения и максимальную площадь сканирования в минуту.

Во время контроля дефектоскопист следит за уровнем эхо-сигнала в зоне контроля. Если он превышает поисковый уровень, то дефект фиксируют и измеряют его параметры. Поисковый уровень обычно выбирают в два раза ниже браковочного (чувствительность при этом в два раза выше). Чувствительность повышают для устранения пропусков дефектов из-за погрешности контакта и структурной неоднородности материала.

Если дефект найден, измеряют его параметры и фиксируют в протоколе. Список таких параметров дефекта зависит от применяемой методики, при этом не все они используются для оценки допустимости дефекта.

Измеряют максимальную амплитуду эхо-сигнала от дефекта, условные протяженность, высоту, ширину, глубину залегания дефекта, его положение относительно середины, начала шва, других дефектов. Существуют также методики, позволяющие определить вид дефекта — плоский или объемный, протяженный или точечный. Кроме того, часто устанавливают норму дефектов на единицу площади объекта контроля.

Перечисленные выше методы и их совокупности используют в различных приложениях. Для каждого вида объекта контроля, каждого материала, типоразмера (толщины), категории качества разрабатывают свои нормы дефектов.

В данной статье рассмотрен такой наиболее часто применяющийся параметр, как максимальная амплитуда эхо-сигнала от дефекта, точнее отношение этой амплитуды к опорной, выраженное в децибелах. При измерении дефектоскопист медленно перемещает преобразователь в районе найденного дефекта и ищет

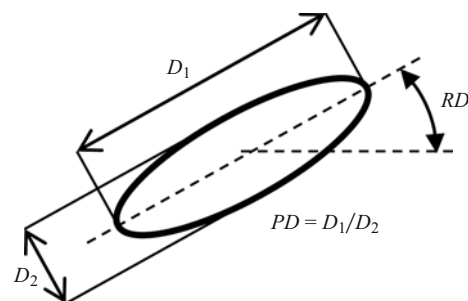


Рис. 2. Геометрия и параметры дефектов: $D_1 = 0,1 - 5,0$ мм, $PD = 1, 2, 5$; $RD = 0, 5, 10^\circ$

максимум сигнала. Такой вид данных называется « $\hat{a}$ vs a », т.е. для каждого дефекта определенного размера a будет найдено значение максимальной амплитуды эхо-сигнала $\hat{a}$.

В качестве дефектов были рассмотрены поры различных размеров и форм. Для данного вида анализа [1, 2] необходимы как минимум дефекты 30 различных размеров, желательно равномерно распределенные в интересующих пределах. Исследовали поры с разным отношением большего и меньшего диаметров, а также с разным углом наклона оси к горизонтальной (рис. 2). Центр дефекта оставался на одной и той же глубине.

Таким образом, в общей сложности было смоделировано 350 дефектов.

Большинство мешающих факторов, таких как различия в чувствительности преобразователей, качество поверхности изделия, изменение скорости звука в материале и др., компенсируются в процессе настройки и калибровки дефектоскопа. Важны также четкое выполнение требований методики контроля, своевременная проверка приборов и образцов.

Однако существуют мешающие факторы, действие которых невозможно скомпенсировать из-за их случайной физической природы. К ним можно отнести структурный шум (сигналы отражения ультразвука от микродефектов и границ зерен металла), шум электронных компонентов (в данном исследовании не рассматривается).

Кроме того, присутствует «человеческий фактор», зависящий от оператора прибора. При ручном ультразвуковом контроле неизбежна погрешность, связанная с качеством акустического контакта.

С целью стимулирования процесса контроля построена математическая модель с помощью метода конечных элементов.

Решалась двумерная задача во временной области, геометрия модели показана на рис. 3. Центры пьезопластины и дефекта совпадают, так как в этом положении наблюдается максимум эхо-сигнала. Таким образом, подразумевается, что на этапе измерения дефектоскопист точно находит максимум эхо-сигнала и погрешность нахождения максимума не учитывается.

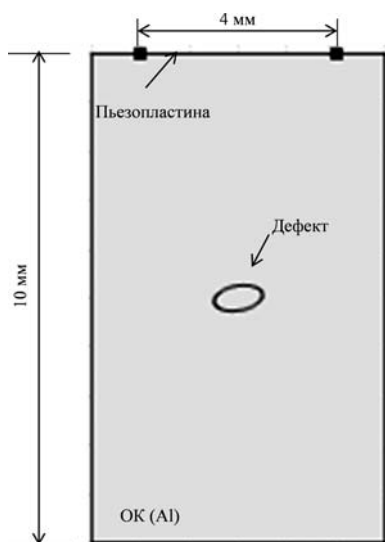


Рис. 3. Геометрия модели

С целью упрощения вычислений часть геометрии объекта контроля (боковые поверхности), окружающий воздух (верхняя и донная поверхности) и пьезопластина заменены на граничные условия соответствующего акустического импеданса. Зондирующий импульс задан давлением на границе, отвечающей за пьезопластину.

В задачах акустики размер элемента рассчитывается исходя из длины волны λ . Для данного случая использовали сетку треугольных элементов с максимальным размером стороны $\lambda/9 \approx 0,058$ мм, количество элементов — 50 000.

На рис. 4 показаны картины акустического поля для различных моментов времени.

Для получения сигнала в каждый момент времени расчета проводили интегрирование значения давления на пьезопластине. Расчет одного дефекта занимает около двух часов машинного времени (Intel Core2 quad 3 ГГц, 4 Гб RAM).

Структурный шум имеет случайную физическую природу, поэтому его моделировали при помощи белого шума заданной амплитуды, который смешивали с чистым сигналом. На участках, где амплитуда сигнала меньше амплитуды шума, сигнал заменяли на шум. Таким образом, шум маскирует сигналы с малой амплитудой. На рис. 5, а, б показан сигнал до и после симулирования структурного шума.

Амплитуду шума для данного материала измеряют заранее. Величины сигналов амплитуды шума, как и других сигналов, измеряют в децибелах от опорного. В нашем случае для сплава АМгб она составила 6 дБ.

При прохождении через слой контактной жидкости ультразвуковая волна ослабляется, что зависит от толщины слоя жидкости, силы прижатия датчика и многих других факторов. Даже опытный дефектоскопист не может обеспечить одинаковый контакт. Для моделирования влияния контакта необходимо сложить

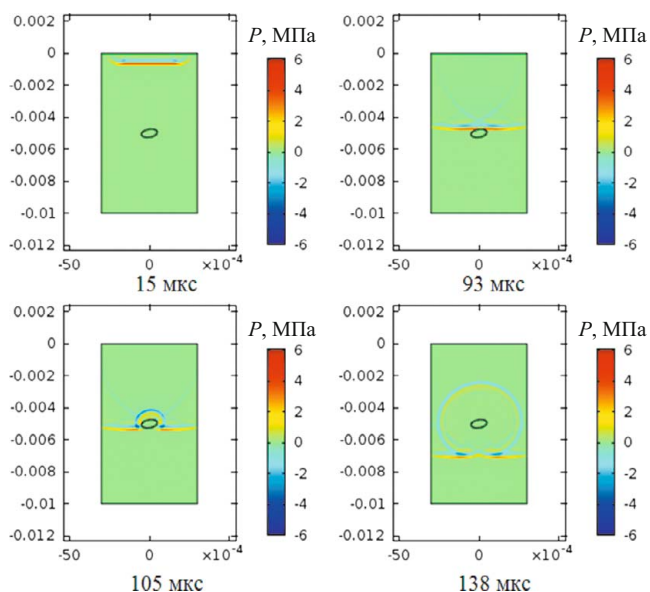


Рис. 4. Картины акустического поля для различных моментов времени (размеры модели указаны в метрах)

массив амплитуд эхо-сигналов от дефектов с массивом поправок. Разброс величины влияния контакта зависит от квалификации дефектоскописта и в среднем составляет 6 дБ. Как и любое другое случайное по природе воздействие, величина отклонения должна соответствовать нормальному закону.

Для моделирования подобных мешающих факторов используют метод Монте Карло [3]. Был сгенерирован массив поправок, значения в котором укладываются в нормальное распределение с центром в нуле и заданным среднеквадратичным отклонением (рис. 6, а). Известно, что в отрезок $[2\sigma; -2\sigma]$ укладывается 95 % значений; установили $2\sigma = 3$ дБ. На рис. 6, б, в показаны кривые « $\hat{a}$ vs a » до и после симуляции влияния контакта.

Видно, что амплитуда сигнала растет при увеличении размера дефекта, но из-за наличия мешающих факторов наблюдается существенный разброс и, как следствие, неоднозначность в оценке размера дефекта по его амплитуде.

На практике используются два подхода для вычисления кривой *POD*: анализ бинарных данных (бинарный анализ) и анализ показаний прибора ($\hat{a}$ анализ). Бинарные данные представляют собой статистику обнаружения дефектов при контроле с помощью исследуемой методики. Другими словами, в соответствии с определенным значением интересующего параметра дефекта (размера) ставится «1», если он обнаружен, и «0», если пропущен. Такой тип данных также называют «данные обнаружен/пропущен» (hit/miss data).

Прибор показывает числовые значения, например, амплитуды ультразвукового эхо-сигнала, амплитуды вихрекового сигнала, соответствующие определенным значениям интересующего параметра дефекта

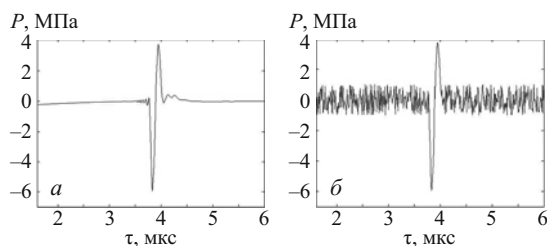


Рис. 5. Вид сигнала до (а) и после (б) симулирования структурного шума

(размера). Важно, чтобы показания сигнала прибора $\hat{a}$ коррелировали с размером дефекта.

Считается, что каждый из дефектов размером a имеет свою вероятность p быть обнаруженным и функция плотности вероятности такого обнаружения обозначается $f_a(p)$. Условная вероятность обнаружения случайно взятого дефекта, имеющего вероятность обнаружения p , находится из выражения $p f_a(p) dp$. Безусловная вероятность обнаружения случайного дефекта — это сумма условных вероятностей на всем протяжении p :

$$POD(a) = \int_0^1 p f_a(p) dp. \quad (1)$$

Другими словами, $POD(a)$ — усреднение вероятности обнаружения дефектов размером a .

Функцию $POD(a)$ можно найти из зависимости между a и $\hat{a}$. Если $g_a(\hat{a})$ — плотность вероятности значения $\hat{a}$ для дефекта фиксированного размера a , то

$$POD(a) = \int_{a_{dec}}^{\infty} g_a(\hat{a}) d\hat{a}. \quad (2)$$

Если между a и $\hat{a}$ имеется линейная зависимость, то

$$\hat{a} = \mu(a) + \delta, \quad (3)$$

где $\mu(a)$ — среднее функции $g_a(\hat{a})$; δ — случайная погрешность учета различия между $\hat{a}$ и $\mu(a)$.

Когда a и $\hat{a}$ зависят линейно в логарифмическом масштабе,

$$\ln(\hat{a}) = \beta_0 + \beta_1 \ln(a) + \delta, \quad (4)$$

где δ — это нормальное распределение с нулевым средним и постоянным стандартным отклонением σ_δ . В таком случае функция

$$\begin{aligned} POD(a) &= Probability[\hat{a} > \hat{a}_{dec}], \\ POD(a) &= Probability[\ln(\hat{a}) > \ln(\hat{a}_{dec})], \\ POD(a) &= 1 - \Phi\left[\frac{\ln(\hat{a}_{dec}) - \beta_0 + \beta_1 \ln(a)}{\sigma_\delta}\right], \end{aligned} \quad (5)$$

где Φ — стандартное нормальное распределение. Ис-

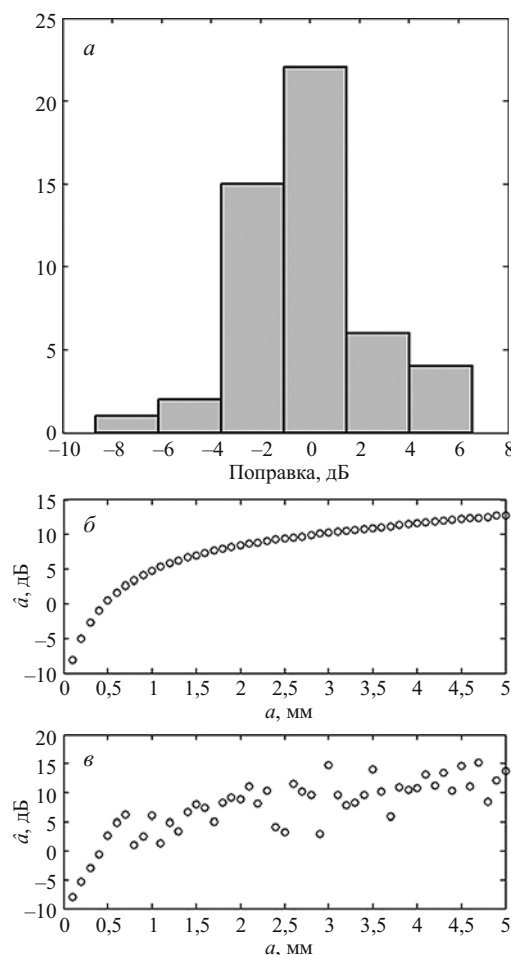


Рис. 6. Гистограмма массива поправок (а) и зависимости « $\hat{a}$ vs a » до (б) и после (в) симуляции влияния контакта

пользуя свойство симметрии функции Φ , выражение (5) можно преобразовать:

$$POD(a) = \Phi\left[\ln(a) - \frac{[\ln(\hat{a}_{dec}) - \beta_0]/\beta_1}{\sigma_\delta/\beta_1}\right]. \quad (6)$$

Выражение (6) является кумулятивной функцией лог-нормального распределения, где

$$\mu = \frac{\ln(\hat{a}_{dec}) - \beta_0}{\beta_1}, \quad (7)$$

$$\sigma = \sigma_\delta/\beta_1. \quad (8)$$

Параметры μ и σ находят методом регрессионного анализа при достаточном количестве исходных данных [1, 2].

Расчет вероятности определения дефектов проводили с помощью программного пакета mhl823 [4].

Первым шагом при расчете кривой POD является построение линейной модели и нахождение коэффициентов линейной регрессии (рис. 7).

Перед расчетом кривой POD необходимо выбрать браковочный уровень. Примем его равным 5 дБ. Используя изложенный выше метод, рассчитаем кривую POD (рис. 8).

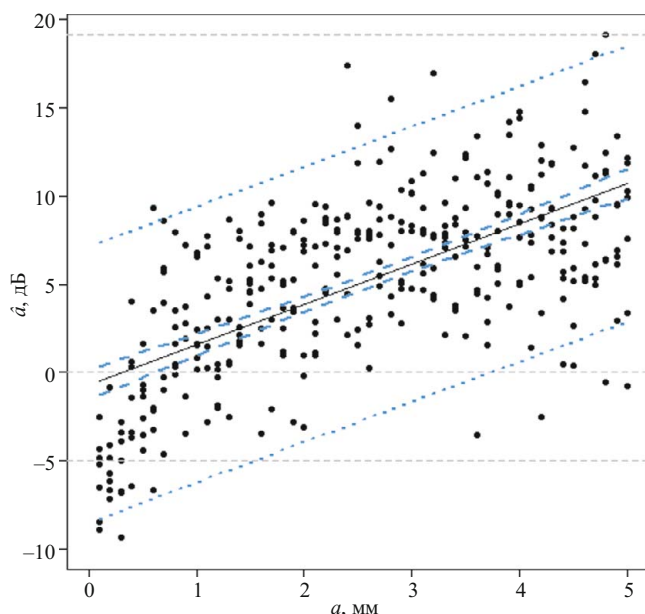


Рис. 7. Линейная модель

На этой кривой важнейшие точки a_{50} , a_{90} , $a_{90/95}$ — это размеры дефектов, которые будут выявляться с вероятностью 50, 90 % и 90 % с доверительным интервалом 95 %. В данном случае $a_{50} = 0,3092$ мм, $a_{90} = 2,541$ мм, $a_{90/95} = 2,754$ мм.

Таким образом, рассмотрен пример расчета кривой вероятности обнаружения дефектов с использованием математической модели симуляции результа-

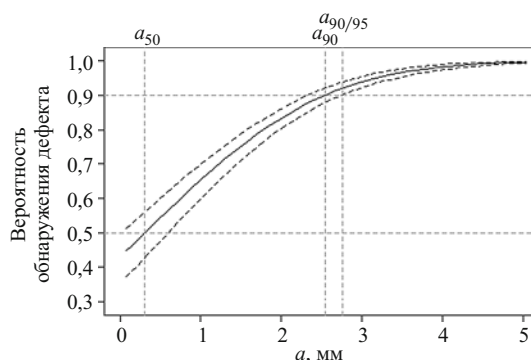


Рис. 8. Кривая POD

тов контроля. Описана методика проведения контроля, рассмотрены мешающие факторы, их природа и способы симуляции. Представлена конечно-элементная модель, проведена симуляция результатов контроля 350 дефектов.

REFERENCES

1. Berens A. P. NDE Reliability Data Analysis. — ASM Metals Handbook. Vol. 17. 9th Edition: Nondestructive Evaluation and Quality Control, ASM International, Materials Park, Ohio, 1988. P. 689 – 701.
2. USA Department of Defense Handbook, MIL-HDBK-1823, NDE system reliability assessment, 2009.
3. Jenson F., Iakovleva E., Dominguez N. Simulation supported POD: methodology and HFET validation case / AIP Conf. Proc. 2011. Vol. 1335. N 1. P. 1573.
4. URL: <http://StatisticalEngineering.com/mh1823> (accessed 20.01.2015).

Обмен опытом

ОПТИМИЗАЦИЯ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКИХ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЯХ НА ПРОЧНОСТЬ

Статья поступила 9 октября 2015 г.

При разработке современных механических конструкций требуется обоснованный анализ возможности применения тех или иных материалов. Одним из критериев выбора материалов является определение условий достижения ими предельных состояний в процессе реальной эксплуатации конструкции. При этом под предельными понимают такие состояния, при которых дальнейшее функционирование рассматриваемых объектов становится опасным или недопустимым [1].

Для уточнения оценок прочности и ресурса оборудования в штатных ситуациях в качестве одного из типов предельных состояний можно рассматривать возникновение циклического разрушения в мало- или многоциклового области нагруженности конструкции.

При прочностных испытаниях на ресурс образцов материалов или элементов механических конструкций, как правило, используют программы нагружения циклической формы, носящие одноступенчатый либо многоступенчатый характер. Одноступенчатые программы задают постоянными среднюю величину нагрузки и размах циклического изменения этой нагрузки. У многоступенчатых программ указанные параметры на каждой ступени свои. Частоты циклических программ нагружения для большинства испытываемых металлических образцов лежат в диапазоне от нескольких долей до 20 – 30 Гц. Проведение испытаний по таким программам занимает длительное время, поэтому сокращение сроков их проведения является актуальной задачей. Она может быть решена посред-