

8. Сидоренко В.Д., Щеглов А.С. Нейтронно-физические характеристики активной зоны ВВЭР, влияющие на работоспособность твэлов. — Атомная энергия, 1993, т. 74, вып. 6, с. 533—535.
9. Щеглов А.С., Проселков В.Н., Бибилашвили Ю.К. и др. Теплофизические характеристики твэла ВВЭР-1000 5-го энергоблока Нововоронежской АЭС. — Там же, вып. 5, с. 450—452.

Поступила в Редакцию 16.12.93

УДК 66.018.86(035.5)

## РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Клиншпонт Э.Р., Милинчук В.К., Тупиков В.И. (Филиал НИФХИ им. Л.Я. Карпова)*

Под воздействием ионизирующего излучения свойства материалов претерпевают изменения. Степень изменений, отнесенная к единице поглощенной энергии, обычно характеризует радиационную стойкость материала, т.е. его способность сохранять в установленных пределах нормируемые технические показатели. Очевидно, что наиболее достоверную информацию о радиационной стойкости и ресурсе полимерного материала получают при проведении испытаний в натурных условиях. Однако такие испытания редки вследствие дороговизны и нередко большой сложности. Поэтому возникает проблема имитации условий эксплуатации.

Важным является вопрос о проведении ускоренных испытаний, так как временные масштабы эксплуатации и испытаний материалов могут различаться в несколько раз. Естественный путь ускорения испытаний за счет увеличения мощности дозы и сокращения экспозиции справедлив в тех случаях, когда радиационные изменения характерных свойств материалов не зависят от мощности поглощенной дозы. В противном случае необходимо знать зависимость радиационных изменений от мощности поглощенной дозы.

Помимо радиационной обстановки к условиям эксплуатации относятся состав окружающей среды, температурный режим, механические нагрузки, электромагнитные поля. Многие из этих факторов воздействуют на материалы совместно с радиацией, и результат такого воздействия не является аддитивным.

Одна из главных задач радиационного материаловедения состоит в создании моделей, необходимых для прогнозирования изменений свойств материалов и определения реального срока службы. Построение таких моделей базируется на знании механизма и кинетики процессов в материалах. При отсутствии такой информации (а она, как правило, отсутствует) могут быть построены только эмпирические модели, однако область их применения обычно ограничена. Цель настоящей статьи — рассмотреть некоторые проблемы, возникающие при оценке радиационной стойкости материалов с учетом многофакторных эксплуатационных условий.

### Характерные показатели радиационной стойкости материалов

Каждый материал обладает комплексом физико-химических свойств. В связи с функциями, которые должен выполнять материал, интерес представляют лишь определенные его свойства, а именно эксплуатационные. Изменение показателей эксплуатационных свойств материалов (физико-механических, электрофизических, теплофизических, оптических и др.) при воздействии ионизирующего излучения характеризует их радиационную стойкость. В соответствии с ГОСТ 25645.321-87 [1] введены характерные показатели радиационной стойкости полимерного материала. В большинстве случаев общими характерными показателями радиационной стойкости материалов различного функционального назначения являются физико-механические свойства, как это указано в ГОСТ 25645.331-91 [2], так как в случае радиационного разрушения материала теряют смысл какие-либо другие показатели.

Каждый материал имеет достаточно много характерных показателей. Например, конструкционный материал электроизоляционного назначения имеет 20 характерных показателей [2]. В то же время зависимость характерных показателей от поглощенной дозы (для необратимых радиационных эффектов) или мощности поглощенной дозы (для обратимых) для всех характерных показателей, как правило, различна. Иными словами, радиационная стойкость обычно определяется одним характерным показателем, для которого в работе [2] введен термин «определяющий характерный показатель радиационной стойкости» (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Определяющие характерные показатели радиационной стойкости материалов и их арбитражные критерии

| Функциональное назначение материала          | Определяющий характерный показатель радиационной стойкости                  | Арбитражный критерий радиационной стойкости, % | НТД на метод определения показателя    |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Конструкционные, назначения:                 |                                                                             |                                                |                                        |
| силового                                     | Прочность при изгибе, МПа                                                   | —50                                            | ГОСТ 4648                              |
| уплотнительного                              | Остаточная деформация сжатия, %                                             | —20                                            | ГОСТ 9.701 — для резин НТД на материал |
| Клеевые                                      | Прочность связи клеевого соединения при отрыве, МПа                         | —50                                            | НТД на материал                        |
| Теплоизоляционные, в том числе теплозащитные | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)                                      | 25                                             | ГОСТ 23630.2                           |
| Терморегулирующие покрытия                   | Коэффициент поглощения солнечной радиации при длине волны от 0,2 до 2,5 мкм | 50 при <0,3                                    | НТД на материал                        |
| Радиационная защита ядерных реакторов        | Содержание водорода, % по массе                                             | —1                                             | НТД на материал                        |

За количественную характеристику радиационной стойкости материала принята поглощенная доза (и мощность поглощенной дозы для обратимых эффектов), при которой характерный показатель изменяется на определенное значение. Принятое в зависимости от функционального назначения материала относительное изменение характерного показателя называется арбитражным критерием радиационной стойкости, доза, при которой достигается арбитражный критерий, — радиационным индексом (см. табл. 1, 2).

Т а б л и ц а 2. Радиационный индекс характерных показателей трех наиболее широко применяемых в технике полимеров, МГр. Облучение на воздухе [3, 4]

| Характерный показатель       | Полиэтилен низкой плотности | Политетрафторэтилен | Полиимид |
|------------------------------|-----------------------------|---------------------|----------|
| Прочность на разрыв          | 2,5—4                       | 0,01                | >100     |
| Коэффициент теплопроводности | 10                          | >1,2                |          |
| Удельная теплоемкость        | 45                          |                     |          |
| Плотность                    | 5                           | 0,01—0,03           |          |
| Тангенс угла потерь (1 кГц)  | 1                           | 3                   | 0,1      |
| Электрическая прочность      | 3—6                         | 1                   | >10      |
| Радиационная потеря массы    | 10                          | 1                   | 500      |

## Имитация радиационной обстановки

В реальных условиях эксплуатации материалы могут подвергаться действию ионизирующего излучения различного вида ( $\gamma$ -излучению, облучению ускоренными заряженными частицами, нейтронами), имеющего, как правило, широкое распределение по энергии. При проведении ускоренных лабораторных испытаний на радиационную стойкость одной из важнейших является имитация радиационной обстановки, поскольку замена одного типа излучения другим, а также энергетического спектра излучения и переход от импульсного воздействия к непрерывному облучению или наоборот в большинстве случаев не корректны и требуют обоснования. Обычно в качестве меры радиационного воздействия ионизирующего излучения принимается усредненная по объему поглощенная доза при фиксированных условиях облучения (усредненные мощность дозы и температура, среда и т.п.). Однако поглощенная доза не всегда является однозначной мерой такого воздействия прежде всего из-за того, что энергия ионизирующего излучения выделяется дискретно и ограничивается областью трека. Мощность поглощенной дозы в треках существенно выше усредненной по всему объему и зависит от характеристик ионизирующего излучения. Если радиационные процессы зависят от мощности поглощенной дозы (или отклик системы на радиационное воздействие связан с дозой нелинейно), то при одинаковой усредненной по объему дозе радиационные эффекты могут быть различны. Часто радиационные эффекты связывают с линейной передачей энергии. Эта характеристика одномерна и не описывает пространственную картину распределения энергии в объеме трека, следовательно, и локальную концентрацию промежуточных активных частиц, реакции которых вызывают изменение свойств облучаемых материалов.

Микродозиметрические концепции, учитывающие стохастическую природу взаимодействия излучения со средой и локальный характер выделения энергии, также не позволяют объяснить в полной мере различия в эффективности воздействия излучения различного типа.

Т а б л и ц а 3. Влияние вида ионизирующего излучения на изменение показателей макросвойств полимеров при облучении [6]

| Полимер                             | Доза, МГр                        | Отношение показателей свойств после облучения к<br>исходным |                   |          |
|-------------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------|----------|
|                                     |                                  | γ-фотоны                                                    | протоны (100 МэВ) | нейтроны |
| Поливинилхлорид                     | 0,03<br>0,1<br>0,3               | Диэлектрические свойства (tg δ)                             |                   |          |
|                                     |                                  | 1,6                                                         | 1,4               | 2,2      |
|                                     |                                  | 2,1                                                         | 1,25              | 5,0      |
|                                     | Полиэтилен низкой плот-<br>ности | 1<br>3                                                      | 1,5               | 1,3      |
| 4,0                                 |                                  |                                                             | 2,0               | 1,45     |
| 6,3                                 |                                  |                                                             | 2,3               | 1,7      |
| Политетрафторэтилен                 | 0,01<br>0,03                     | Объемное электрическое сопротивление                        |                   |          |
|                                     |                                  | 0,8                                                         | 0,001             | 0,001    |
|                                     | 0,3                              | 0,001                                                       | 0,001             | 0,001    |
| Полиэтилен      низкой<br>плотности | 0,3<br>1,0<br>3,0                | Предел прочности при растяжении                             |                   |          |
|                                     |                                  | 1,3                                                         | 1,3               | 0,95     |
|                                     |                                  | 1,2                                                         | 0,95              | 0,95     |
|                                     | Политетрафторэтилен              | 0,001<br>0,003<br>0,01                                      | 0,45              | 0,45     |
| 0,6                                 |                                  |                                                             | 0,25              | —        |
| 0,45                                |                                  |                                                             | 0,18              | —        |
| Полиэтилентерефталат *              | 1,0<br>2,0                       | 0,35                                                        | 0,18              | 0,5      |
|                                     |                                  | 0,71                                                        | 0,85              | —        |
|                                     |                                  | 0,68                                                        | 0,79              | —        |

\*Вместо  $\gamma$ -излучения использовали электроны ( $E = 2$  МэВ), протоны ( $E = 8$  МэВ).

Систематические исследования специфики воздействия ионизирующего излучения различного вида (нейтронов ядерного реактора, ускоренных протонов,  $\gamma$ -излучения  $^{60}\text{Co}$  и ускоренных электронов) на изменения свойств полимерных материалов позволили сделать некоторые общие выводы [5]:

в общем случае радиационные изменения свойств полимерных материалов зависят от типа излучения: наибольшие изменения характерны при облучении нейтронами;

различия, обусловленные типом излучения, достигают десятков процентов, в отдельных случаях сотен;

степень неэквивалентности воздействия зависит от химического строения макромолекул, состава полимерных композиций, физической структуры полимера и характера окружающей среды.

Влияние вида излучения нивелируется с увеличением поглощенной дозы (табл. 3).

### Комплексное воздействие ионизирующего излучения и других факторов

При эксплуатации в полях ионизирующего излучения на материалы действуют и другие внешние факторы — окружающая среда (вакуум, воздух, жидкая среда), температура, излучение оптического диапазона, электрические и магнитные поля, механические нагрузки и т.п. Таким образом, материалы подвергаются комплексному воздействию ионизирующего излучения и других внешних факторов. При комплексном воздействии наблюдаются существенно большие изменения свойств материалов, чем при воздействии только ионизирующего излучения и внешних дестабилизирующих факторов порознь [6—11].

Окружающая среда. Окружающая среда изменяется в процессе облучения в результате как радиолиза воздуха, так и радиационного газовыделения материалов (табл. 4). Химически активными по отношению к полимерам компонентами атмосферы являются кислород, озон и диоксид азота. Последние два агрессивных химических соединения всегда присутствуют при облучении материалов на воздухе, так как являются продуктами радиолиза воздуха. Стационарная концентрация озона при облучении воздуха лежит в пределах 0,1—0,3% по объему [12]. При взаимодействии озона с полимерами уменьшается молекулярная масса последних и накапливаются кислородсодержащие группы (карбоксильные, карбонильные, пероксидные и др.). Со временем образуются и разрастаются поверхностные трещины, что в конце концов приводит к разрушению полимерного материала. Скорость озонового старения увеличивается в присутствии растягивающих напряжений, которые раскрывают трещины, обнажающие новые поверхности [13].

Т а б л и ц а 4. Состав и радиационно-химический выход газообразных продуктов радиолиза полимеров [3, 4]

| Полимер             | Состав основных газообразных продуктов, %                                 | Радиационно-химический выход |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Полиэтилен          | Водород (95—98)                                                           | 3,2—4,5                      |
| Полипропилен        | Водород (85—98), метан (2—12)                                             | 2,4—2,8                      |
| Полиамид            | Водород (50—70), оксид углерода (30—40)                                   | 1,3—3                        |
| Поликарбонаты       | Водород (2), оксид углерода (50), диоксид углерода (40)                   | 1,3                          |
| Полиимид            | Водород (20—30), оксид углерода (15—40), диоксид углерода (40—50)         |                              |
| Поливинилхлорид     | Хлористый водород (95)                                                    | 20                           |
| Политетрафторэтилен | Оксид углерода, диоксид углерода, четырехфтористый углерод, перфторалканы | 0,45                         |
| Полидиметилсилоксан | Водород (35—40), метан (30—60)                                            | 2,5—3,9                      |

В воздушной среде в полимерах содержание кислорода составляет  $(0,3-3)10^{-3}$  моль/кг, скорость его поступления в полимеры определяется коэффициентом диффузии, который при 278—370 К лежит в пределах  $0,04-15 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ . Образующиеся под воздействием радиации макрорадикалы в присутствии кислорода превращаются в пероксидные радикалы. Последовательное чередование реакций присоединения кислорода к макрорадикалам и реакции пероксидных радикалов характеризует цепной процесс окисления, в результате которого происходит деструкция полимеров.

Излучения оптических частот. При взаимодействии электронов и протонов с материалами возникает вторичное излучение, в неупругих столкновениях с атомами вещества — нейтронное и тормозное рентгеновское излучение, при скорости заряженных частиц больше скорости распространения света в среде — длинноволновое электромагнитное излучение Черенкова—Вавилова. Проникающая способность этих видов излучения выше, чем первичных заряженных частиц, поэтому вторичное излучение может увеличить поглощенную дозу не только в материалах, находящихся в поле первичного излучения, но и в материалах за экранами.

Излучение Черенкова—Вавилова в твердых веществах и жидкостях возникает при энергии электронов около 0,1 МэВ, протонов — около 100 МэВ [14]. Обычно световое излучение, генерируемое в объеме материала, воздействует как на сам материал, так и продукты радиолиза. УФ-излучение может вызвать фотохимическую деградацию материала. Кроме того, под воздействием ионизирующего излучения в материалах возникают короткоживущие и стабильные продукты радиолиза, оптический спектр поглощения которых обычно сдвинут в длинноволновую область по сравнению с исходным материалом, т.е. эти продукты расширяют область фоточувствительности материала.

Еще одним внутренним источником светового излучения в облучаемом материале могут быть процессы дезактивации возбужденных молекул, образующихся при взаимодействии с ионизирующим излучением или нейтрализации заряженных частиц. Экспериментально установлено, что радиолоюминесценция и рекомбинационная люминесценция в полимерах существенно влияют на радиационно-химические процессы [15]. Итак, ионизирующее излучение и излучение оптического диапазона при совместном действии усиливают действие (фоторадиационный эффект) [6, 7].

При взаимодействии ионизирующего излучения с материалами изделий возникают дополнительные дестабилизирующие факторы, к которым относятся специфическая химическая среда, создаваемая продуктами радиолиза материалов [3, 16], электризация материалов [17], вторичное ионизирующее излучение и излучение оптического диапазона в видимом в УФ-диапазонах [14], индуцированные воздействием ионизирующей радиации, импульсы механических напряжений, возникающие при действии импульсов ионизирующего излучения (волны давления) [18].

Электризация. Одним из основных процессов взаимодействия излучения с веществом является ионизация молекул, в результате которой образуются электроны и положительные ионы (дырки). Концентрация и подвижность заряженных частиц определяет радиационную электропроводность, которая может изменяться в широких пределах. Неравномерное распределение поглощенной дозы по объему материала вызывает дифференциальную электростатическую зарядку материалов. Следствием дифференциальной зарядки является электрический искровой разряд, который может проникать в окружающее пространство, вдоль поверхности (надповерхностный или подповерхностный) без выхода в окружающее пространство и через слой диэлектрика на подложку (пробой диэлектрика). Электрические разряды постепенно разрушают материалы. Электрические поля, возникающие при электризации, могут влиять на механизм радиационно-химических процессов, изменять распределение поглощенной дозы ионизирующего излучения в материалах.

**Механические нагрузки.** В изделиях полимерные материалы обычно находятся в нагруженном состоянии или имеют внутренние напряжения, обусловленные различными причинами, в том числе технологией изготовления. Воздействие механических нагрузок изменяет молекулярную динамику, структуру полимерной цепи, надмолекулярную структуру. Эти изменения обратимы, если механические нагрузки не вызывают химических изменений. В радиационных полях при воздействии механических нагрузок в полимерах протекают новые химические реакции, в результате чего может возникнуть новое необратимое состояние полимера, недостижимое при воздействии только ионизирующего излучения.

Наиболее обширные сведения накоплены о совместном воздействии всестороннего сжатия и ионизирующего излучения, вызывающем изменение скорости и направленности радиационно-химических реакций [19]. Например, в полиэтилене и некоторых эластомерах увеличивается эффективность радиационного сшивания, что приводит к значительным изменениям физико-химических и эксплуатационных свойств [8]. В результате совместного действия излучения высокой энергии и механических нагрузок увеличивается скорость релаксации после снятия нагрузки и скорость ползучести, причем эти скорости зависят от мощности поглощенной дозы [3, 4, 9, 10]. Как правило, при воздействии излучения высокой энергии в напряженных областях ускоряется процесс деградации материала [20].

Таким образом, необходимо отметить, что информация о радиационной стойкости полимерных материалов получена в основном для стандартных условий облучения (комнатная температура, моноэнергетическое излучение, воздух) и с точки зрения радиационного материаловедения может быть использована только для предварительного отбора материалов. Заключение о пригодности материалов для работы в тех или иных условиях эксплуатации может быть сделано с учетом всего комплекса воздействующих факторов (включая среду и температуру) и функционального назначения материала.

На радиационные изменения свойств полимерных материалов существенное дестабилизирующее влияние могут оказывать такие физические факторы, по отношению к которым материалы являются нечувствительными в обычных условиях. Поглощенная энергия излучения переводит полимерную систему в неравновесное состояние и делает восприимчивой к таким внешним воздействиям, как излучение оптического диапазона, механические нагрузки, электрические и магнитные поля и др.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брискман Б.А., Волобуев А.А., Дадьян С.С. и др. Стойкость полимерных материалов радиационная. Термины и определения. ГОСТ 25645.321-87. М.: Издательство стандартов, 1989.
2. Брискман Б.А., Волобуев А.А., Исаков Л.И. и др. Материалы полимерные. Требования к оценке радиационной стойкости. ГОСТ 25645.331-91. М.: Издательство стандартов, 1991.
3. Милинчук В.К., Тупиков В.И., Брискман Б.А. и др. Радиационная стойкость органических материалов. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Organic Radiation Chemistry. Eds V.K. Millinchuk, V.I. Tupikov. Chichester: Ellis Horwood, 1989.
5. Брискман Б.А., Милинчук В.К. Исследование воздействия различных видов ионизирующих излучений на свойства полимеров. — Труды I Всес. сов. «Диэлектрические материалы в экстремальных условиях», 22—26 января 1990, Суздаль, 1990, т. II, с. 239—256.
6. Милинчук В.К. Проблемы фоторадиационного воздействия. — Химия высоких энергий, 1985, т. 19, № 4, с. 326—337.
7. Жданов Г.С., Милинчук В.К. Фоторадиационные эффекты в полимерах. М., НИИТЭХИМ, 1980. 64 с.
8. Клишпонт Э.Р., Милинчук В.К. Полимерные материалы в условиях комбинированного воздействия ионизирующих излучений и других физических факторов. — Журн. Всес. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева, 1990, т. 35, № 5, с. 618—625.
9. Малаев В.В., Степанов В.Ф. Ускорение релаксационных процессов в полимерах под облучением. — Высокомолек. соед., 1988, сер. А, т. 30, № 6, с. 1275—1278.

10. Малаев В.В., Степанов В.Ф. Температурные зависимости ползучести и релаксационных процессов в полиэтилентерефталате под облучением. — *Химия высоких энергий*, 1989, т. 23, № 3, с. 236—240.
11. Phillips D. Effect of radiation on polymers. — *Mater. Sci. Technol.*, 1988, v. 4, № 1, p. 85—91.
12. Пшежецкий С.Я., Дмитриев М.Т. Радиационные физико-химические процессы в воздушной среде. М.: Атомиздат, 1978.
13. Эмануэль Н.М., Бучаченко А.Л. Химическая физика молекулярного разрушения и стабилизации полимеров. М.: Наука, 1988.
14. Каплан И.Г., Полянский Н.В. О возможной роли излучения Вавилова—Черенкова в радиационной химии. — *Химия высоких энергий*, 1982, т. 16, № 5, с. 387—393.
15. Шелухов И.П., Жданов Г.С., Клишпонт Э.Р., Милинчук В.К. «Внутренний» фоторадиационный эффект. Радиационно-индуцированная люминесценция и ее влияние на радиационные процессы. — Там же, 1988, т. 22, № 3, с. 225—228.
16. Милинчук В.К., Клишпонт Э.Р., Туликов В.И. Радиационная стойкость органических материалов в условиях космического пространства. — Там же, т. 25, № 6, с. 483—492.
17. Боев С.Г., Ушаков В.Я. Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках и методы его диагностики. М.: Энергоатомиздат, 1991.
18. Залюбовский И.И., Калининченко А.И., Лазурик В.Г. Введение в радиационную акустику. Харьков: Вища школа, 1986.
19. Milinchuk V.K., Kovarskii A.L. Radiation chemistry of polymers under high pressure. — In: *High Pressure Chemistry and Physics of Polymers*, CRC Press. Inc., 1993.
20. Жданов Г.С., Смолянский А.С., Милинчук В.К. Локализация радиационных повреждений в полиметилметакрилате. — *Химия высоких энергий*, 1986, т. 20, № 1, с. 32—37.

Поступила в Редакцию 19.01.94

УДК 556.114.611.027.3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНВЕРСИОННОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕНТГЕНО- ЛЮМИНОФОРОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ МОЩНОСТИ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*Гальчинецкий Л.П., Зеленская О.Н., Катрунов К.А., Рыжиков В.Д.  
(НТК «Институт монокристаллов» АН Украины, г. Харьков)*

Конверсионная эффективность  $\eta$ , определяемая как отношение суммарной энергии фотонов люминесценции к энергии, затраченной на их возбуждение, является наиболее важной и универсальной характеристикой рентгенолюминофоров и сцинтилляционных материалов.

С 60-х годов появились работы по определению конверсионной эффективности получивших распространение в то время щелочно-галогидных сцинтилляторов, основанные на методе химической актинометрии [1]. Позже [2, 3] в связи с использованием сцинтилляционных детекторов в импульсном режиме основным стал спектрометрический метод определения  $\eta$ .

В последнее время наряду с традиционными щелочно-галогидными сцинтилляторами появилось еще по крайней мере несколько десятков неорганических материалов, используемых для регистрации ионизирующего излучения. Они существенно различаются между собой эффективностью, спектром излучения, кинетическими характеристиками. Наблюдается большое расхождение в результатах нахождения  $\eta$ , связанное как с воздействием различного вида и энергии ионизирующего излучения, так и с точностью определения коэффициента светособирания и учета влияния медленных компонентов высвечивания сцинтилляторов (табл. 1).

Методика измерения  $\eta$  в импульсном режиме (сцинтилляционная эффективность) некоторых «медленных» сцинтилляторов ( $\text{ZnSe (Te)}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3 \text{ (Ti)}$ ,  $\text{CdWO}_4$ ), время высвечивания которых больше времени формирования импульса ФЭУ, в результате чего отсекается часть полезного сигнала, дает заниженные значения  $\eta$ . В работе [4] пред-