

Розглянуто публікації, присвячені підвищенню радіаційної стійкості клітинних культур шляхом їх опромінення лазером. Показано, що реалізуються протилежні результати в залежності від того, чи використовуються інтенсивності, менші ніж «дотеплова» величина, або навпаки

Ключові слова: іонізуюче опромінення, лазер, радіо-резистентність, мембрана

Рассмотрены публикации, посвященные повышению радиационной устойчивости клеточных культур путем их облучения лазером. Показано, что реализуются противоположные результаты, в зависимости от того, используются ли интенсивности, меньшие «дотепловой» величины, или наоборот

Ключевые слова: ионизирующее облучение, лазер, радиорезистентность, мембрана

ГЕЛИЙ-НЕОНОВЫЙ ЛАЗЕР ИЗМЕНЯЕТ РАДИАЦИОННУЮ СТОЙКОСТЬ КУЛЬТУРЫ БИОЛОГИЧЕСКИХ КЛЕТОК

Е. Б. Алмазова

Ассистент

Кафедра общей и экспериментальной физики
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, Украина, 61002
Контактный тел.: (0572) 52-37-45

Б. Г. Емец

Доктор физико-математических наук, профессор
Кафедра биологической и медицинской физики
Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина
пл. Свободы, 4, г. Харьков, Украина, 61022
Контактный тел.: (057) 707-55-76
E-mail: Boris.G.Yemets@univer.kharkov.ua

Введение

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важнейшими научными и практическими задачами

Существует настоятельная необходимость в создании новых средств противодействия разрушительному влиянию ионизирующей радиации. В этом заинтересованы и больные люди, получающие медицинскую помощь путем использования излучения от радиоактивных препаратов, и персонал предприятий, работающий по долгу службы с источниками ионизирующей радиации, и лица, проживающие в районах, пострадавших от загрязнения радионуклидами в результате аварий на атомных электростанциях. Для противодействия вредным биологическим последствиям ионизирующей радиации перспективным является применение лазерных технологий.

Анализ последних исследований и публикаций

Роль лучей гелий-неонового лазера в качестве фактора, влияющего на радиационную стойкость клеточных культур обсуждается в ряде публикаций [1-9]. Эти сообщения делятся на две группы: в одной продемонстрировано радиопротекторное действие лазерного

луча, тогда как в другой получен противоположный результат – лазер понижает радиационную устойчивость живых клеток. Совершенно необходимо разобраться в причинах опубликованных разноречивых выводов.

Целью данной работы является биофизическое обоснование результатов работ [1-9] и установление условий, при которых луч гелий-неонового лазера обеспечивает уменьшение поражающего действия ионизирующей радиации. Установление указанных условий открывает возможности для формулирования практических рекомендаций по применению гелий-неонового лазера как средства, повышающего радиационную устойчивость биологических объектов.

Влияние He-Ne лазера на радиационную стойкость клеток

Б.И. Степанов с сотрудниками [1] исследовали культуру диплоидных клеток кожно-мышечной ткани эмбриона человека. Клеточная культура выращивалась на покровных стеклах в пенициллиновых флаконах. Клетки облучались потоком нейтронов (доза 1 Грэй) от нейтронного генератора типа НГ-160; в результате количество хромосомных aberrаций составило 8,3 %. (У необлученных клеток число хромосомных aberrаций - 1,2 %). В другом опыте клетки тысячу

секунд облучались через дно пенициллинового флакона лазером типа ЛГ-75 (длина волны $\lambda = 632,8$ нм; интенсивность 20 мВт/см²); в результате число хромосомных aberrаций составило $2,2$ %. В случае, когда клетки облучили нейтронами (доза 100 рад), а через полчаса дополнительно облучили лазером (1000 секунд), то число хромосомных мутаций составило $2,1$ %. Наблюденный радиозащитный эффект лазерного света авторы связывают с активацией репарирующих систем клеток.

А.К. Абдвахитова с сотрудниками [2] обнаружили увеличение радиационной стойкости клеток китайского хомячка. Выживаемость определяли путем рассмотрения репродуктивной способности клеток, оцениваемой по образованию макроколоний. После рентгеновского облучения в дозе 8 Грэй (мощность дозы 1 Гр/мин) выжило $10,5$ % клеток. В случае, когда после такого же рентгеновского облучения на клетки в течение 30 секунд подавали расфокусированный свет гелий-неонового лазера типа ЛГ-38 ($\lambda = 632,8$ нм; интенсивность 15 мВт/см²), выживаемость составила 35 %.

К.Ш. Восканян с сотрудниками своей лаборатории [3] исследовали влияние излучения гелий-неонового лазера на радиационную чувствительность клеток бактерий *E. coli K-12*. Выживаемость клеток определяли подсчетом макроколоний, вырастающих через 2 суток при температуре 37 °С. Получено, что рентгеновские лучи в дозе 300 Грэй обеспечивают выживаемость, равную 7 %. Если же бактерии получают такую же дозу рентгеновского облучения, а после этого через полминуты их освещают дополнительно (в течение 30 секунд) гелий-неоновым лазером типа ЛГ-52 ($\lambda = 632,8$ нм; интенсивность 8 мВт/см²), выживаемость составляет 30 %. Авторы считают, что «лазер активизирует репарационные системы клетки и поэтому при комбинированном действии рентгеновского и лазерного излучений повреждающее действие лучей Рентгена снижается». В этой же лаборатории выполнена работа [4], где исследовалось влияние излучения гелий-неонового лазера на стойкость клеток этих же бактерий к воздействию альфа-частицами (источник - ²³⁹Pu с мощностью дозы 21 Гр/мин). Наблюдено, что альфа-частицы в дозе 200 Грэй обеспечивают выживаемость, равную 1 %. Если же бактерии получают такую же дозу альфа-частиц, а после этого через 2 минуты их освещают дополнительно (в течение 30 секунд) гелий-неоновым лазером типа ЛГ-52 ($\lambda = 632,8$ нм; интенсивность 8 мВт/см²), выживаемость составляет 4 %. В работе [5] сообщается, что коллектив, руководимый К.Ш. Восканяном, исследовал зависимость радиозащитного действия гелий-неонового лазера на клетки бактерий *E. coli K-12* от интервала времени между ионизирующим и лазерным видами облучения. Показано, что воздействие лазера ЛГ-52 на указанные клетки, облученные рентгеновскими лучами или альфа-частицами, во временном интервале от одного часа до четырех часов пострадиационного выдерживания, приводит к увеличению числа жизнеспособных клеток по квазилинейному закону. В течение же первого часа пострадиационного выдерживания необратимый компонент лучевого поражения клеток имеет минимальное значение и, практически, не зависит от интервала между двумя видами облучения.

Т.Й. Кару с сотрудниками [6] исследовали культуру клеток HeLa, которую выращивали в сцинтилляционных флаконах. Через различные промежутки времени (2 , 10 или 180 минут) после воздействия непрерывным гелий-неоновым лазером ($\lambda = 632,8$ нм; интенсивность 1 мВт/см²; доза 100 Дж/м²) монослой клеток облучали гамма-квантами в дозе 5 Грэй (установка ГУПОС с источником ¹³⁷Cs; мощность дозы $6,75$ Гр/мин). Величину эффекта облучения оценивали по кривым роста и по критериям колониеобразования. Получено, что число клоногенных клеток после гамма-воздействия составило $6,2$ %. Когда через три часа после гамма-воздействия клетки облучили гелий-неоновым лазером, число клоногенных клеток увеличилось до $13,4$ %. Налицо радиозащитное влияние лазерного света. В другой работе этих же авторов [7] монослой клеток HeLa (карцинома шейки матки) в стационарной фазе роста подвергали воздействию гелий-неонового лазера (параметры те же, что и в [6]) либо за 5 или за 60 минут до гамма-облучения (доза $0,1 - 10$ Гр; источник и мощность дозы те же, что и в [6]), либо спустя 5 минут после него. Получено, что в случае пятиминутного интервала между двумя облучениями (обе последовательности) кривые выживаемости являются практически идентичными с кривой выживаемости только гамма-облученных клеток. При облучении гелий-неоновым лазером за 60 минут до гамма-воздействия при дозах гамма-излучения больше 5 Грэй выявлялась фракция резистентных клеток, средне-летальная доза D_0 которых превышала D_0 основной массы клеток в два раза ($3,6$ и $1,7$ Гр соответственно). Кривая выживаемости становилась двухкомпонентной. Авторы [7] высказали гипотезу, предполагающую что излучение лазера активирует у части клеток процессы, которые содействуют ускоренной репарации радиационных повреждений.

К.Ш. Восканян, Г.В. Мицын и В.Н. Гаевский облучали клеточную суспензию мышинных фибробластов СЗН10Т1/2 светом гелий-неонового лазера (ЛГ-52) и гамма-лучами. Временной интервал между двумя видами облучения не превышал 60 секунд. Сразу после облучения необходимое количество клеток засеивали во флаконы для определения выживаемости. Исследования показали, что и предварительное и последующее лазерное облучение фибробластов приводят к увеличению выживаемости клеток, подвергшихся воздействию гамма-облучения или протонов с энергией 150 МэВ (значения фактора изменения дозы в пределах $1,3 - 2,2$). Одновременное облучение клеток СЗН10Т1/2 лазерным облучением и протонами также приводило к увеличению их выживаемости [8].

Итак, в рассмотренных выше работах показано, что излучение гелий-неонового лазера способствует повышению радиационной стойкости клеточной культуры. Однако, имеется публикация Р.Д. Корытной [9], где получен противоположный результат. Автором исследованы первичные культуры эмбриональных фибробластоподобных клеток, выращиваемые на покровных стеклах в пенициллиновых флаконах. Пятиминутное облучение клеток гелий-неоновым лазером типа ЛГ-75 ($\lambda = 632,8$ нм; интенсивность 178 мВт/см²) приводило через сутки к задержке накопления клеток, а затем, спустя двое суток к снижению их числа. Торможение роста в эти сроки составило $25,2$ % и $34,3$ %, соот-

ветственно. Рентгеновское облучение культуры фибробластов (доза 6,4 Грэй) сделало эти показатели равными 26,4 % и 35,2 %, соответственно. Результат комбинированного действия лазера (экспозиция 5 минут) и рентгеновских лучей (6,4 Гр) оказался более выраженным, чем в случае влияния каждого облучающего фактора по отдельности. Торможение роста клеточной культуры через сутки составило 43,1 %, а через двое суток – 42,1 %. Таким образом повреждающее действие одного фактора усиливалось дополнительно повреждающим действием другого фактора.

В чем же причина различия результатов в работах [1-8], где наблюден радиозащитный эффект влияния гелий-неонового лазера от эффекта, полученного в [9], где излучение той же длины волны от подобного гелий-неонового лазера вызвало серьезные биологические повреждения, и усилило деструктивное действие ионизирующей радиации? Прежде всего, считаем необходимым обратить внимание на интенсивность лазерного излучения, используемого в работах [1-9]. Дело в том, что луч, выходящий из лазера, легко фокусируется с помощью собирающей линзы. Это обстоятельство позволяет экспериментаторам в своих исследованиях варьировать интенсивность лазерного излучения в широких пределах. В работах [1-8] использовались интенсивности, не превышающие 20 мВт/см², тогда как в [9] применялась интенсивность в девять раз большая – 178 мВт/см². Каким же образом факт существенного различия интенсивностей лазерного излучения одной и той же длины волны приводит к изменениям радиационной стойкости клеточной культуры в противоположных направлениях? Здесь необходимо подробнее рассмотреть события, происходящие в непосредственной близости от клетки.

События, происходящие в примембранном водном слое

Биологическая клетка отделяется от межклеточной жидкости (водного раствора) внешней оболочкой, называемой плазматической мембраной. Непосредственно к мембране примыкает пограничный слой, в котором молекулы воды «упакованы» настолько плотно, что в этом слое невозможно создать конвективное движение. Поэтому его называют примембранным перемешиваемым водным слоем. Функционирование клетки – это реализация обмена веществ между клеткой и межклеточной жидкостью, в которую клетка погружена. Обменивающиеся частицы (ионы и молекулы) движутся из межклеточной среды в клетку (и в противоположном направлении), преодолевая примембранный перемешиваемый водный слой и мембрану, исключительно, по диффузионному механизму.

Толщина этого слоя во много раз превышает толщину плазматической мембраны [10]. Это означает, что скорость диффузионного переноса конкретной частицы из межклеточной жидкости (и в противоположном направлении) определяется, в первом приближении, временем, которое частица затрачивает на диффузионное прохождение через примембранный перемешиваемый слой. Напомним, что в жидкости (в воде) всегда присутствует растворенный воздух и воздух в пузырьках. (При 20 °С объемная доля «пу-

зырькового» воздуха составляет $V_F = 5,8 \times 10^{-8}$; средний радиус пузырьков $R_{cp} = 20$ нм [11].) Пузырьки присутствуют и в примембранном слое. Находясь в нем, они перемещаются в поле тяжести со скоростью, пропорциональной квадрату радиуса (сила Архимеда) и в поле температурного градиента (скорость перемещения пропорциональна радиусу в первой степени [12]. Двигаясь в примембранном слое, пузырьки выполняют роль миниатюрных «перемешивателей», разрыхляя этот слой, тем самым уменьшая его «эффективную» толщину по сравнению с ситуацией, когда воздушные пузырьки полностью отсутствуют.

Функционирование клеток в различных температурных режимах

Известно, что при облучении жидкого диэлектрика (биологической жидкости) электромагнитными (ЭМ) волнами происходит преобразование ЭМ энергии в тепловую. Теплопродукция единицы облучаемого объема равна [13]:

$$Q = \omega \epsilon'' (c n)^{-1} I,$$

где ω – частота облучающей ЭМ волны; ϵ'' – мнимая часть диэлектрической проницаемости объекта; c – скорость света в вакууме; n – показатель преломления; I – интенсивность ЭМ волны в среде.

Наличие теплопродукции приводит к повышению температуры объекта. При очень малых интенсивностях температура жидкости повышается не более, чем на 0,1 °С. По этой причине (согласно закону Генри [14]) растворимость воздуха в жидкости уменьшается; «лишние» же газовые молекулы уходят из жидкой матрицы в пузырьки, обеспечивая увеличение размеров последних. Поскольку скорость движения в гравитационном и в температурном полях пузырьков большего радиуса выше, чем у пузырьков меньшего радиуса, то такие, выросшие пузырьки более активно перемешивают примембранный водный слой, уменьшая его «эффективную» толщину. Это означает, что проницаемость системы «мембрана плюс примембранный перемешиваемый слой» для обменивающихся частиц увеличилась.

Здесь целесообразно напомнить известные представления о неспецифической реакции клеток на повреждающие воздействия, следуя работам [15,16]. Скорость биохимических процессов в клетках определяется рядом параметров, в том числе, уровнем ферментативной активности, которая, в свою очередь, зависит от присутствия в биосреде низкомолекулярных органических веществ: с ростом концентрации последних указанная активность снижается, и наоборот. Причина такой зависимости состоит в обратимой адсорбции лигандов на белковых молекулах ферментов, что затрудняет их конформационную подвижность, необходимую для совершения ферментативного акта. В норме активность всех ферментов снижена в той или иной степени, зависящей от состава лигандов, окружающих их молекулы. Уменьшение проницаемости системы «плазматическая мембрана плюс примембранный водный слой» (вызванное фактом низкоинтенсивного облучения клетки лазером) влечет за собой

выход из клетки части органических субстратов и, следовательно, снижение их внутриклеточной концентрации. В результате повышается активность ферментов в клетке, что ускоряет ряд процессов, включая стимуляцию пролиферации. Если теперь клетки подвергнуть ионизирующей радиации, то возникающие радиационные повреждения будут успешнее заживаться (репарироваться), чем в случае, когда предварительное облучение лазером отсутствовало.

В случае, когда интенсивность луча лазера такова, что температура объекта повышается более, чем на 1-10 °С, происходит увеличение проницаемости не только плазматической мембраны, но и внутриклеточных мембран, ограничивающих различные компартменты клетки. Это обстоятельство приводит к диффузионному расплыванию клеточных субстратов по объему клетки. В результате клетка функционирует в режиме, значительно отличающемся от стандартного (нормального); ее ресурсы быстро исчерпываются. Если теперь культуру клеток подвергнуть ионизирующему облучению, то последнее дополнительно усилит то повреждающее действие, которое уже оказал интенсивный луч лазера. Такой результат наблюдался в работе Корытиной [9].

Наконец, если интенсивность лазера такова, что температура объекта повышается более чем на 10-50 °С, реализуются настолько фатальные изменения конформаций биологических макромолекул и других

клеточных структур, что активизируются процессы разрушения и гибели клеток. В этой ситуации нет смысла говорить о возможности какого-либо противостояния радиационному воздействию. Следовательно, повышают радиационную устойчивость клеток лишь те лазерные лучи, интенсивность которых является невысокого, «дотеплового» уровня, т.е. такого, когда (в ходе облучения) температура биообъекта остается, практически неизменной. В случае гелий-неонового лазера, по видимому, «дотеплового» уровню соответствуют интенсивности, не превышающие величину 30 мВт/см².

Выводы

1. Луч гелий-неонового лазера «дотеплового» уровня интенсивности (менее 30 мВт/см²) повышает радиационную устойчивость культуры клеток.
2. Луч гелий-неонового лазера, превышающий «дотепловой» уровень интенсивности снижает радиационную устойчивость культуры клеток.
3. Под действием луча гелий-неонового лазера в клетках реализуются процессы, способствующие увеличению проницаемости плазматической мембраны.

Литература

1. Степанов, Б.И. Регулирование функциональной активности клеток человека с помощью лазерного излучения [Текст] / Степанов Б.И., Мостовников В.А., Рубинов А.Н., Хохлов И.В. // Доклады АН СССР. – 1977. – Том 236. - № 4. – С. 1007-1010.
2. Абдвахитова, Ж. Действие лазерного излучения на клетки китайского хомячка, культивируемые in vitro [Текст] / Абдвахитова А.К., Григорьева Л.Н., Пархоменко И.М. // Радиобиология. – 1982. – Том 22. - № 1. – С. 40-43.
3. Восканян, К.Ш. Влияние излучения гелий-неонового лазера на радиочувствительность клеток бактерий *Esherichia coli* К-12 [Текст] / Восканян К.Ш., Симонян Н.В., Авакян Ц.М., Арутюнян А.Г. // Радиобиология. – 1985. – Том 25. - № 4. – С. 557-559.
4. Восканян, К.Ш. Модификация повреждающего действия альфа-частиц на бактерии *Esherichia coli* К-12 с помощью низкоинтенсивного лазерного излучения [Текст] / Восканян К.Ш., Симонян Н.В., Авакян Ц.М., Арутюнян А.Г. // Радиобиология. – 1986. – Том 26. - № 3. – С. 375-377.
5. Восканян, К.Ш. Зависимость радиозащитного действия гелий-неонового лазерного излучения на клетки бактерий от интервала времени между двумя видами облучения [Текст] / Восканян К.Ш., Симонян Н.В., Авакян Ц.М., Авакян Г.М. // Радиобиология. – 1987. – Том 27. - № 6. – С. 708-711.
6. Кару, Т. Й. Радиомодифицирующее действие УФ- и видимого лазерного света [Текст] / Кару Т. Й., Пятибрат Л.В., Календо Г.С. // Радиобиология. – 1987. – Том 27. - № 6. – С. 804-809.
7. Кару, Т. Й. Влияние излучения He-Ne лазера на выживаемость клеток HeLa, подвергнутых действию ионизирующей радиации [Текст] / Кару Т. Й., Пятибрат Л.В., Календо Г.С. // Радиобиология. – 1992. – Том 32. - № 2. – С. 202-206.
8. Восканян, К.Ш. Радиозащитное действие излучения гелий-неонового лазера на клетки фибробластов [Текст] / Восканян К.Ш., Мицын Г.В., Гаевский В.Н. // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2007. – Том 41. - № 3. – С. 32-35.
9. Корытная, Р.Д. Действие света гелий-неонового лазера в комбинации с рентгеновским облучением и сарколизинном на рост культур нормальных и трансформированных клеток / [Текст] Корытная Р.Д. // Применение методов и средств лазерной техники в биологии и медицине. Труды Всесоюзной коференции. – Киев: Наукова думка, 1981. – С. 182-183.
10. Котык, А. Мембранный транспорт [Текст] / Котык А., Яначек К.– Москва: Мир, 1980. – 341 с.
11. Емец, Б.Г. К оценке усредненных параметров усредненных стабильных пузырьков, содержащихся в воде [Текст] / Емец Б.Г. // Доповіді НАН України. – 1998. - № 5. – С. 75-78.
12. Кузнецов, В.М. О движении газовых пузырьков в жидкости под действием градиента температур [Текст] / Кузнецов В.М., Луговцов Б.А., Шер Е.И. // Журнал прикладной математики и теоретической физики. – 1966. - № 1. – С. 124-126.
13. Ландау, Д. Электродинамика сплошных сред [Текст] / Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. – Москва: Наука, 1982. – 620 с.

14. Герасимов, Я.И. Курс физической химии – Т. 1 [Текст] / Герасимов Я.И., Древинг В.П., Еремин Е.Н. – Москва: ГНТИХЛ, 1963. – 624 с.
15. Эйдуc, Л.Х. О едином механизме инициации различных эффектов малых доз ионизирующих излучений [Текст] / Эйдуc Л.Х. // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1996.-Т.36. – № 6.- С. 874-882
16. Эйдуc, Л.Х. Мембранный механизм биологического действия малых доз. Новый взгляд на проблему [Текст] / Эйдуc Л.Х. – Пушчино: ИТЭБ, 2001. – 161 с.

Abstract

The publications concerning the increase of radioimmunity of cell cultures by force of helium-neon laser irradiation were examined (length of the wave 632,8 nm). For example, the number of chromosome aberrations in diploid cells of skin-muscular tissue of human embryo is about 1,2 %. Exposed to neutrons (dose 1 Gr), their number increases to 8,3%. In case, when after neutron the cells are irradiated for 16 min (intensity 20 mW/sm²), their number decreases to 2,2%. After x-ray irradiation of cells of cricetus griseus (Chinese hamster) only 10,5% of cells survive. When after irradiation the laser effect them for half a minute (15 mW/sm²) the survival potential becomes three times bigger. The decrease of fibroblast radioresistance (opposite result) can be observed while using the laser ray with bigger intensity (178 mW/sm²). The influence of x-rays on fibroblasts (6,4 Gr) provides the growth inhibition for 26%. Combined influence of the same dose of x-rays and the laser (5 min light exposure) leads to the growth inhibition for 43%. These examples show that depending on intensity value of laser ray various conditions of cell functioning are realized. In case of low intensities, the laser increases permeability of plasmatic membrane and stimulates the enzyme activation, encouraging proliferative processes. This provides the increase of radioresistance. The laser influence of intensities of thermal values (more than 30 mW/sm²) destroys the cell, contributing negatively to the destructive effect of ionizing radiation

Keywords: ionizing radiation, laser, radio-resistance, membrane

Уточнено існуючі та встановлено нові залежності впливу форми та співвідношення площі поперечного перерізу виробу й полюсних наконечників коерцитиметру КРМ-Ц, величини зазору між електромагнітом і виробом, мікрогеометрії контакту, структурного стану залізвуглецевих сплавів на достовірність оцінок за магнітним параметром

Ключові слова: магнітний контроль, коерцитивна сила, залізвуглецевий сплав, неруйнівна оцінка якості

Уточнены существующие и установлены новые зависимости влияния формы и соотношения площади поперечного сечения изделия и полюсных наконечников коэрцитиметра КРМ-Ц, величины зазора между электромагнитом и изделием, микрогеометрии контакта, структурного состояния железоуглеродистых сплавов на достоверность оценок по магнитному параметру

Ключевые слова: магнитный контроль, коэрцитивная сила, железоуглеродистый сплав, неразрушающая оценка качества

УДК 621.785.33

ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА ДОСТОВЕРНОСТЬ ОЦЕНОК ПО МАГНИТНОМУ ПАРАМЕТРУ

В. М. Власовец

Доктор технических наук, профессор
Кафедра технологических систем
ремонтного производства
Харьковский национальный технический университет
сельского хозяйства им. П. Василенка
ул. Артема, 44, г. Харьков, Украина, 61002
Контактный тел.: 067-936-79-24
E-mail: vlasovez@ukr.net

Введение

Методы, используемые для исследований структуры железоуглеродистых сплавов и оценки её свойств, имеют известные ограничения, связанные с тем, что разрушающие способы контроля не позволяют в пол-

ной мере и каждом изделии оценить необходимые показатели качества, установить причины отклонений, а также зоны с неоднородными показателями. Традиционными испытаниями практически невозможно осуществить 100%-ный контроль изделий. Эффективной альтернативой является применение неразрушающих