

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

16-85-23

Ю.Г.Тетерев

РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА
НА МИКРОТРОНЕ МТ-22

Направлено в журнал "Атомная энергия"

1985

В свете имеющейся сейчас тенденции использования методов ядерной физики для решения народохозяйственных задач все большее значение приобретает расширение парка простых и дешевых ускорителей электронов на энергию $10 \div 30$ МэВ. Такие ускорители применяются для проведения дефектоскопии, нейтронного и гамма-активационного анализа, радиационных исследований и решения других прикладных задач. В связи с этим число ускорителей растет, и ведется большая работа, направленная на улучшение их конструктивных и эксплуатационных параметров, результатом которой является увеличение тока пучка и снижение стоимости изготовления ускорителей. Однако имеется большой недостаток в справочных данных для расчета оптимальной биологической защиты.

До недавнего времени при расчетах глобальной биологической защиты для ускорителей электронов определяли толщину защиты, исходя из интенсивности пучка тормозного излучения, падающего под углом 0° к направлению бомбардирующего пучка электронов, и такую защиту сооружали во всех направлениях^{1/}. Вместе с тем существовали указания^{2,3/}, что для электронных ускорителей рассматриваемого диапазона энергий определяющей является защита от тормозного излучения под углами, близкими к направлению пучка электронов, падающих на мишень. В остальных направлениях определяющей является защита от фотонейтронов, образующихся в тяжелой толстой мишени. В^{4/} рекомендуется при расчете защиты учитывать как угловые распределения мощности дозы тормозного излучения, так и мощность дозы от изотропного излучения нейтронов. Но и эти рекомендации далеко не учитывают всей полноты радиационных ситуаций, возникающих в реальных условиях. Наиболее полно представлены данные для расчета защиты в американских национальных рекомендациях^{5/}, в которые включена вся современная информация. Но в связи с тем, что эта работа имеет мало распространение, недавно появилась работа^{6/}, в которой в компактном виде собраны современные данные из литературы, в том числе и из^{5/}. Это дает возможность широкому кругу лиц воспользоваться современной информацией для расчета и проектирования биологических защит электронных ускорителей. Но в приведенной в^{6,8/} информации содержится много данных, полученных либо расчетными путем, либо из сопоставлений не очень хорошо согласующихся между собой результатов различных экспериментов. Основной целью работы является проведение полномасштабных экспериментов для проверки рекомендуемых методов расчета на действующем ускорителе электронов - микротроне МТ-22^{7/}.

Радиационная обстановка на микротроне изучалась в^{8/}. Авторы на основании проведенных исследований предложили дозиметрические приборы, пригодные для радиационных измерений на микротроне. С помощью этих приборов измерены уровни доз от нейтронного и гамма-излучений и выявлены основные источники радиации на микротроне. Но в этой работе недостаточно данных, на основании которых можно было бы проверить рекомендуемые методы расчета. Кроме того, максимальная энергия ускоренных электронов на микротроне МТ-22 существенно выше, чем на микротроне МТ-17^{8/}. Это дает возможность сравнить радиационную обстановку на разных ускорителях и выявить основные тенденции в исследуемой области энергий ускоренных электронов.

ВНЕШНЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

Основной упор при проведении измерений мощностей доз от работающего ускорителя был сделан на проверку методов расчета для двух малоисследованных случаев. В первом - изучалась радиационная ситуация за защитой, на которую почти нормально падает нейтронное и гамма-излучение, выходящее из мишени под углами, близкими к 90° к направлению движения электронного пучка /мощность дозы над потолком/. Во втором - изучалась радиационная ситуация за защитой, на которую излучение падает под значительным углом к нормали.

Измерения были сделаны с помощью приборов, предложенных в^{8/}, показания которых наилучшим образом отражают истинные значения мощностей доз. Мощность дозы тормозного излучения измерялась с помощью прибора ДРГЗ-04^{9/}, а нейтронного - с помощью коронного счетчика СНМ-14 в комбинированном полиэтиленовом замедлителе^{10/}. Все измерения проведены при энергии ускоренных электронов 20,5 МэВ и токе пучка 13 мкА.

Схема размещения микротрона приведена на рис.1. Ускоренный пучок электронов выводится из микротрона 1 и с помощью поворотного магнита направляется в каналы 2 или 6, в конце которых расположены узлы тормозных мишеней, либо в канал 4, где пучок электронов попадает на урановый конвертор нейтронов, окруженный графитовым замедлителем в форме куба со стороной 120 см. Толщина бетонной глобальной защиты указана на рисунке.

Мощность дозы нейтронного и гамма-излучений в первом случае измерялась над бетонным потолочным перекрытием толщиной 150 см. Расстояние от плоскости пучка до потолка составляет ~300 см. Пучок электронов выводился в канал 6 и попадал на вольфрамовую мишень толщиной 0,2 см. Тормозная мишень была окружена свинцовой защитой толщиной 20 см, которая отстояла от мишени на 15 см по ходу пучка. Тем самым была создана наихудшая радиационная ситуация для излучения в сторону потолка, так как тормозная

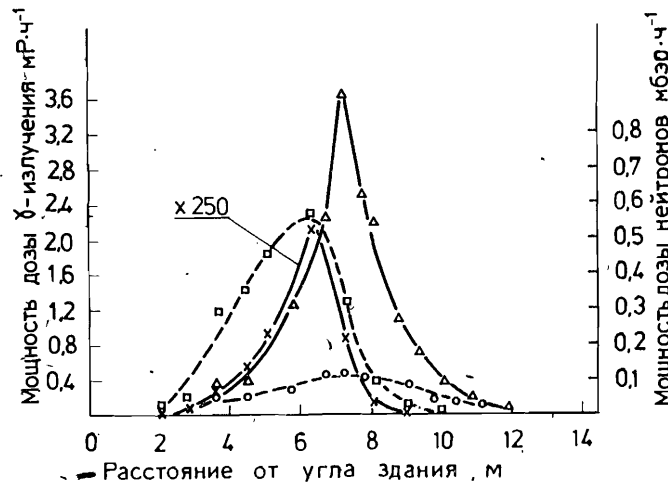
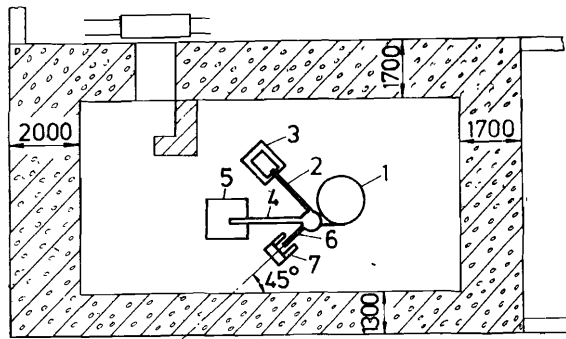


Рис.1. Схема размещения микротрона МТ-22 и распределение уровней мощностей доз нейтронного и тормозного излучений за бетонной защитой толщиной 1300 мм. /1 - микротрон, 2 - электроновод правого канала, 3,7 - свинцовая ловушка, 4 - электроновод центрального канала, 5 - графитовый куб, 6 - электроновод левого канала/. x и □ - мощности дозы тормозного излучения при непосредственном его падении из мишени на бетонную защиту и нейтронного соответственно. Δ и ○ - мощности дозы тормозного излучения в случае экранирования тормозной мишени 20 см свинца и нейтронного соответственно.

мишень сверху не защищалась, а свинец служил в качестве конвертора нейтронов. В результате измерений выявлено, что максимальная мощность дозы гамма-излучения над потолочным перекрытием наблюдается под углом $70 \div 80^\circ$ к направлению пучка электронов и составляет 11 ± 2 Mr·ч⁻¹. Максимальная мощность дозы нейтронного излучения P_n равна $0,03 \pm 0,02$ мБэр·ч⁻¹.

Для проверки рекомендуемых в^{6/} методов расчета описанная выше радиационная ситуация была оценена аналитически. Для расчета величины мощности дозы $P_\gamma(75^\circ)$ тормозного излучения под углом 75° к направлению пучка электронов за бетонной защитой толщиной $d = 150$ см использована формула:

$$P_\gamma(75^\circ) = P_\gamma(20,5 \text{ МэВ}, 75^\circ) \frac{I}{r^2} \cdot 10^{-\frac{d}{\lambda(E_{эф.}, 15^\circ)}} \quad /1/$$

где $P_\gamma(20,5 \text{ МэВ}, 75^\circ)$ - мощность дозы без защиты от тормозного излучения из тяжелой мишени под углом 75° к направлению движения падающих электронов с энергией 20,5 МэВ^{6/}, I - ток пучка электронов /мкА/, r - расстояние до точки измерения /м/, $\lambda(E_{эф.}, 15^\circ)$ - слой десятикратного ослабления тормозного излучения с эффективной энергией $E_{эф.} = 10$ МэВ при падении гамма-квантов под углом 15° к плоскости защиты^{6/}. Эффективная энергия тормозного излучения под углом 90° к пучку электронов также определена по данным из^{6/}.

Расчетное значение $P_\gamma(75^\circ)$ равно $17 \text{ Mr} \cdot \text{ч}^{-1}$. Из сопоставления расчетного и экспериментального результатов видно, что согласие удовлетворительное. Некоторое расхождение в результатах связано с ошибкой, с которой могли быть взяты из графиков^{6/} данные для расчетов. Результат расчета по данным из^{6/} для мощности дозы тормозного излучения под углом 90° к направлению пучка электронов еще более сильно завышен по сравнению с измеренным. Это связано с самопоглощением в тормозной мишени, которое зависит от ее размеров и не учитывается в расчетах по формуле /1/ и в данных^{6/}.

Расчет мощности дозы нейтронного излучения проведен по формуле:

$$P_n = \frac{IY}{4\pi r^2} Q_{Be} \frac{d}{\lambda_n} \quad /2/$$

где $Y = 1,5 \cdot 10^{10}$ нейтр.мкА⁻¹ - выход нейтронов из толстой свинцовой мишени, $Q_{Be} = 30 \cdot 10^{-3}$ мкБэр·с⁻¹ /нейтр.см⁻²·с⁻¹ - коэффициент перевода плотности потока нейтронов в мощность дозы^{2/}, $B = 2,5$ - дозовый фактор накопления в бетоне^{2/}, $\lambda_n = 12 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ - длина ослабления в бетоне для спектра деления^{2/}.

Расчет по формуле /2/ дает $P_n = 0,06$ мБэр·ч⁻¹. Мощность дозы нейтронного излучения за бетонной защитой может быть рассчитана и при использовании данных^{6/}. В работе^{6/} имеется график ослабления эквивалентной дозы нейтронов бетонной защитой в зависимости от ее толщины для различных комбинаций энергий электронов и материалов мишеней. При использовании в расчетах кривой ослабления для комбинации, наиболее близкой к рассматриваемой ситуации, получено $P_n = 0,045$ мБэр·ч⁻¹.

Результаты вычислений в пределах точности, которую они могут обеспечить из-за неопределенности ослабляющих свойств различ-

ных бетонов, совпадают между собой и близки к измеренным. Их превышение над измеренными может быть объяснено тем, что в расчетах не учитывалось самопоглощение нейтронов свинцом.

При выводе того же электронного пучка в канал 2, тормозная мишень которого сверху имела защиту 5 см свинца, было подтверждено, что максимальная мощность дозы тормозного излучения над потолком наблюдается под углами $75^\circ \pm 5^\circ$. Величина мощности дозы уменьшилась примерно в 10 раз для тормозного излучения и в 2 раза для нейтронного по сравнению со случаем, когда мишень не имела защиты сверху.

Результаты измерений мощностей доз за бетонной защитой для случая падения гамма-пучка под углом к нормали приведены на рис.1. Измерения выполнены за наиболее тонкой стеной здания толщиной 1300 мм. Пучок электронов выводился на тормозную вольфрамовую мишень канала 6. Измеренные распределения нейтронного и гамма-излучений вдоль стены приведены для двух ситуаций: в первой - тормозное излучение из вольфрамовой мишени толщиной 0,2 см непосредственно падало на бетонную защиту, а во второй - тормозная мишень со всех сторон окружена свинцовым экраном толщиной 20 см. Ошибка измерений мощности дозы гамма-излучения, согласно описанию примененного прибора ДРГЗ-04, не превышает 20%, а при измерении нейтронного может достигать 70%^{/8/} из-за отличия спектра нейтронов за защитой микротрона от спектра $Pu + Ve$ -источника, используемого для калибровки дозиметра.

Из результатов измерений /рис.1/ видно, что во второй ситуации пик максимальной мощности дозы сместился вправо и мощность дозы уменьшилась примерно в 250 раз. Эти данные объясняют результат экспериментов по исследованию ослабляющих свойств свинцового барьера^{/11/}. Полученное в^{/11/}ослабление тормозного излучения 20 см свинца также равно 250, а рассчитанное на основании данных из^{/6/}ослабление равно $5,9 \cdot 10^3$. Это противоречие можно объяснить сильным подавлением гамма-излучения от тормозной мишени и проявившимся излучением от других источников. Другие источники образуются за счет потерь пучка в выводном устройстве, поворотном магните и распределенных потерь в микротроне и электроноводе. Причиной расхождения является то, что в^{/11/} не учли вклада излучения от других источников.

Из результата, полученного в настоящей работе, можно сделать вывод, что при существующей на микротроне динамике пучка электронов, когда не приняты специальные меры по снижению распределенных потерь при ускорении и транспортировке пучка, нет смысла сооружать локальную защиту для основных источников тормозного излучения более чем из 15 см свинца. Наличие распределенных потерь создает такую ситуацию, что, как следует из данных, приведенных на рис.1, даже при сильном экранировании тормозной мишени мощность дозы гамма-излучения за бетонной защитой превышает мощность дозы нейтронного.

Для расчета максимальной дозы за защитой при падении тормозного излучения под углом 45° к нормали использована форму-

ла /1/, но вместо $P_\gamma(20,5 \text{ МэВ}, 75^\circ)$ в формулу подставлено значение из^{/6/} $P_\gamma(20,5 \text{ МэВ}, 0^\circ)$, а вместо $\lambda(E_{эф}, 15^\circ) - \lambda(20,5 \text{ МэВ}, 45^\circ)$. Значения величины $\lambda(20,5 \text{ МэВ}, 45^\circ)$ нет в^{/6/}, но оно было получено с помощью экстраполяции имеющихся данных для более низких энергий. Расчетное значение максимальной мощности дозы за бетонной защитой равно $1,7 \text{ Р} \cdot \text{ч}^{-1}$. Это значение в 3 раза больше измеренного, что может быть объяснено возможной неточностью значения λ , полученного экстраполяцией, а с другой стороны, возможной неточностью экспериментального определения максимального значения, так как пик в распределении излучения очень узкий.

В остальных местах за бетонными стенами вокруг здания микротрона, при наличии локальных защит для основных источников тормозного излучения, выявленных в^{/8/}, эквивалентная мощность дозы нейтронного и гамма-излучения меньше $0,1 \text{ мБэр} \cdot \text{ч}^{-1}$.

НАВЕДЕННАЯ АКТИВНОСТЬ

Для высокочастотного питания резонатора, ускоряющего электроны, на микротроне МТ-22 используется тот же самый генератор со средней мощностью 2 кВт, что и на МТ-17, поэтому мощность пучка, выведенного на мишень, практически одинакова для обоих ускорителей. С другой стороны, выход фотоядерных реакций для большинства конструкционных материалов при изменении энергий от 16 до 20,5 МэВ увеличивается в 4-5 раз^{/12/}. Естественно ожидать, что уровень мощности дозы от наведенной активности также значительно увеличится. Фактически ситуация несколько другая. Например, наведенная активность резонатора практически не увеличилась. С одной стороны, это объясняется тем, что потери ускоряемого пучка электронов уменьшаются с увеличением номера орбиты. И увеличение числа орбит на МТ-22 мало изменило общие потери. С другой стороны, на микротроне МТ-22 введена система стабилизации электрического питания всех узлов, за счет чего работа микротрона стала стабильнее. Это привело к общему уменьшению потерь пучка, которые неизбежны при ручной регулировке.

Мощность дозы от наведенной активности вакуумной камеры микротрона МТ-22 меньше, чем она была на МТ-17 и составляет $0,1 \text{ мкР} \cdot \text{ч}^{-1}$ через 1 ч после выключения. Это уменьшение связано с конструктивными изменениями, камера МТ-22 изготовлена из нержавеющей стали, а на МТ-17 - из латуни.

Так как для выводного канала, изготовленного из мягкой стали, никаких существенных изменений не произошло, его наведенная активность увеличилась в соответствии с оценками примерно в 3 раза и составила $\sim 0,8 \text{ мкР} \cdot \text{с}^{-1}$ на расстоянии 20 см через 1 ч после выключения микротрона.

Значительно увеличилась мощность дозы от наведенной активности узла тормозной мишени. Это, в основном, связано с изменением

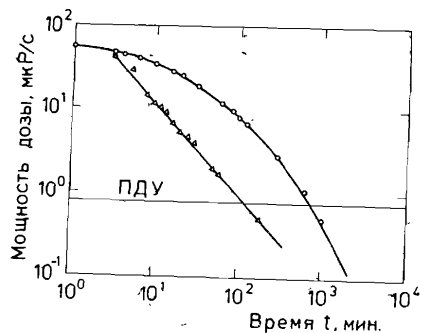


Рис. 2. Мощность дозы наведенной активности в зависимости от времени после восьмичасового облучения. Δ - от узла тормозной мишени, \circ - вблизи графитового куба. ПДУ - предельно допустимый уровень излучения.

конструкции узла. Для лучшей юстировки пучка перед тормозной мишенью поставлена толстая диафрагма из латуни, а для лучшего охлаждения мишени и захвата электронов, не успевших в ней затормозиться, вплотную к вольфрамовому диску толщиной 2 мм пристыкован цилиндр из дюралюминия толщиной 23 мм. Мощность дозы от наведенной активности узла тормозной мишени на расстоянии 50 см в зависимости от времени остывания приведена на рис. 2. Там же приведена зависимость от времени уровня мощности дозы вблизи графитового куба, внутри которого расположен урановый конвертор. Это основные источники гамма-излучения при выключенном микротроне. В остальных точках зала микротрона наблюдается общий фон от наведенной активности $0,2 \text{ мкР} \cdot \text{с}^{-1}$ через 10 мин после выключения.

РАДИОАКТИВНОСТЬ ВОЗДУХА И ВОДЫ

Энергия тормозного излучения 20,5 МэВ превышает пороги фото-ядерных реакций на азоте $/E_{\text{пор}} = 10,55 \text{ МэВ}/$ и на кислороде $/E_{\text{пор}} = 15,67 \text{ МэВ}/$, поэтому при работе микротрона происходит активация охлаждающей воды и воздуха в зале. Количественная оценка образования изотопов ^{13}N и ^{15}O из воздуха может быть сделана при использовании данных, приведенных в $^{13,14}/$. В этих работах экспериментально исследованы выходы реакций образования радиоактивных азота, кислорода и др. изотопов в злаковых культурах при облучении их тормозным излучением с граничными энергиями от 15,4 до 21,3 МэВ. В результате расчета получено, что в объеме свинцового домика, в котором производится облучение образцов, образуется $1 \cdot 10^{-6} \text{ Ки}$ ^{13}N и $2 \cdot 10^{-6} \text{ Ки}$ ^{15}O . Пучок тормозных гамма-квантов проходит в домике путь 70 см. При объеме зала МТ-22 226 м^3 удельная активность этих газов составит $1,5 \cdot 10^{-11} \text{ Ки} \cdot \text{л}^{-1}$. Как следует из санитарных правил ОСП-72/80, "радиационное воздействие от присутствия в воздухе радионуклидов благородных газов и короткоживущих радионуклидов азота и кислорода определяется не внутренним облучением, а внешним бета- и гамма-излучением из объема воздуха помещения" $^{11}/^{15}/$. Мощность дозы внешнего облучения, создаваемого изотопами азота

и кислорода, составляет $10^{-2} \text{ мкР} \cdot \text{с}^{-1}$. Эта величина пренебрежимо мала в сравнении с мощностью дозы от наведенной активности узлов микротрона.

Так как при работе микротрона образуются нейтроны, то в воздухе помещения активируется аргон. Рассчитанная величина его активности без учета воздухообмена составляет $\sim 10^{-9} \text{ Ки} \cdot \text{л}^{-1}$, что ниже допустимых концентраций радиоактивных благородных газов в воздухе рабочих помещений $^{15}/$. При наличии воздухообмена величина активности аргона еще меньше.

Удельная радиоактивность газов, содержащихся в воздухе помещения микротрона МТ-22, измерялась с помощью проточной ионизационной камеры объемом 70 л. Камера была проградуирована по содержанию ^{41}Ar в воздухе. Нижний предел измерения содержания радиоактивных газов составлял $\sim 10^{-9} \text{ Ки} \cdot \text{л}^{-1}$. В результате измерений установлено, что содержание радиоактивных газов в помещении при работе микротрона не превышает предела определения.

С помощью прибора СРП-1 $^{10}/$ была измерена мощность дозы от излучения воды, сбрасываемой после охлаждения узлов микротрона. Измеренная мощность дозы меньше $30 \text{ мкР} \cdot \text{ч}^{-1}$. Столь малая величина наведенной активности воды объясняется тем, что охлаждающие трубки нигде не находятся в прямом пучке тормозных квантов. В то же время период полураспада ^{15}O мал, а расход воды незначителен $/2 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}/$ и активированная вода не может значительно удалиться от места облучения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании измерений радиационных полей на микротроне МТ-22 при энергии 20,5 МэВ и на микротроне МТ-17 $^{8}/$ при энергии 16 МэВ можно сделать вывод, что тормозное излучение является определяющим радиационную обстановку за бетонной защитой в любых направлениях по отношению к падающему пучку электронов.

Этот вывод противоречит указаниям работ $^{2,3}/$, но подтверждается данными работы $^{6}/$. На рис. 3 приведены $^{6}/$ соотношения доз различных видов вторичного излучения до защиты. В соответствии с данными настоящей работы мощность дозы тормозного излучения за защитой еще более преобладает над нейтронным, чем до защиты.

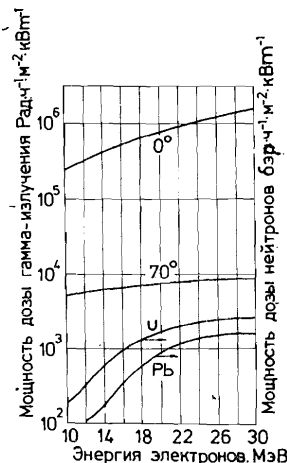


Рис. 3. Соотношения мощности эквивалентной дозы для различных видов вторичного излучения до защиты электронных ускорителей. 0° и 70° - тормозное излучение под углами 0° и 70° к направлению пучка электронов. U и Pб - излучение нейтронов для урановой и свинцовой мишеней соответственно.

Проведенные сопоставления измеренных и расчетных величин мощностей доз позволяют сделать вывод о том, что рекомендации^{1/6/} по расчету защит могут быть использованы в исследованном здесь диапазоне энергий.

Наведенная активность микротрона МТ-22, так же как и МТ-17, не требует принятия специальных мер при обслуживании, профилактике и ремонте.

Автор выражает глубокую благодарность М.М.Комочкову, В.И.Цовбуну и Ю.С.Замятнину за обсуждение полученных результатов; А.Г.Белову и В.А.Архипову за помощь при проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Прайс Б.П., Хортон К., Спинни К. Защита от ядерных излучений. М., ИЛ, 1959.
2. Кимель Л.Р., Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений. Справочник. Атомиздат, М., 1972.
3. Гусев Н.Г. и др. Защита от излучения ядерно-технических установок. Атомиздат, М., 1973, т.2.
4. Цовбун В.И. ОИЯИ, 16-7104, Дубна, 1973.
5. Radiation Protection Design Guidelines for 0.1-100 MeV Particle Accelerator Facilities. NCRP report No.51, Washington, 1977.
6. Цовбун В.И. Аннотации докладов 9 Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц. ОИЯИ, Р9-84-641, Дубна, 1984, с.163.
7. Белов А.Г. и др. ОИЯИ, Р9-82-301, Дубна, 1982.
8. Белов А.Г. и др. АЭ, 1983, т.54, вып.1, с.38-43.
9. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. Атомиздат, М., 1977.
10. Радиационная безопасность. Величины, единицы, методы и приборы. /Пер. с англ. под ред. И.Б.Кейрима-Маркуса/. Атомиздат, М., 1974.
11. Ковалев В.П. Вторичные излучения ускорителей электронов. Атомиздат, М., 1979.
12. Власов Н.А. Нейтроны. "Наука", М., 1971.
13. Флеров Г.Н. и др. ОИЯИ, 18-83-699, Дубна, 1983.
14. Зен Чан Ук, Замятнин Ю.С., Жучко В.Е. ОИЯИ, 18-83-915, Дубна, 1983.
15. Нормы радиационной безопасности НРБ-76 и основные санитарные правила работы с радиоактивными веществами и другими источниками ионизирующих излучений ОСП 72/80. Энергоиздат, М., 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел
11 января 1985 года.

Тетерев Ю.Г.

16-85-23

Радиационная обстановка на микротроне МТ-22

Проведены эксперименты для проверки существующих рекомендаций по расчету защиты от ионизирующего излучения ускорителей электронов на энергию 10-30 МэВ. Сравнивались измеренные и рассчитанные значения мощностей доз нейтронного и гамма-излучения при косом падении пучка гамма-квантов к плоскости защиты, а также под большими углами к направлению движения электронов. Измерялась мощность дозы от наведенной активности узлов микротрона, охлаждающей воды и воздуха помещения. Измерения проводились гамма-дозиметром ДРГЗ-04 и дозиметром нейтронов на основе счетчика СМ-14 в комбинированном полиэтиленовом замедлителе. Установлено, что за защитой микротрона тормозное излучение определяет радиационную обстановку под всеми углами к направлению пучка электронов. Наведенная активность не требует принятия специальных мер при обслуживании ускорителя.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ.
Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1985

Перевод автора