

# Статистическая обработка данных в дозиметрах и радиометрах. Пособие для начинающих

*Письмо на Балабановскую спичечную фабрику:  
"Здравствуйте, я 11 лет считаю спички у вас  
в коробках - их то 59, то 60, а иногда и 58. Вы  
там сумасшедшие что ли все?"*

## Введение

Меня частенько спрашивают: «Ваш дозиметр точный?». Я всегда отвечаю «Да», потому что с таким же успехом можно сказать: «Нет», но всё же первый ответ людей обнадеживает. Парадоксально, но в этом разговоре оба собеседника не могут объяснить суть вопроса и ответа...

В этой статье я постараюсь доходчиво изложить математические основы обработки данных в любительской дозиметрии, а также объяснить, почему наблюдается чудовищный разброс значений при определении естественного радиационного фона (ЕРФ) многими приборами как бытового, так и профессионального назначения, позволяющими получить результат за типичные 35...45 секунд. Уверен, что некоторые подробности удивят даже специалистов с учёной степенью, поскольку большинство приборов со статусом «средство измерения» и стопками разнообразных сертификатов, увы, попросту «дурят» своими показаниями простых граждан.

Материал рассчитан на людей, успешно окончивших среднюю общеобразовательную школу. Читателям же с высшим инженерным образованием представленные примеры помогут освежить в памяти понимание терминов, чтобы сконцентрироваться именно на тонкостях статистической обработки применительно к дозиметрии.

## Глава 1. Математическое ожидание и правило трёх сигм – это норма!!!

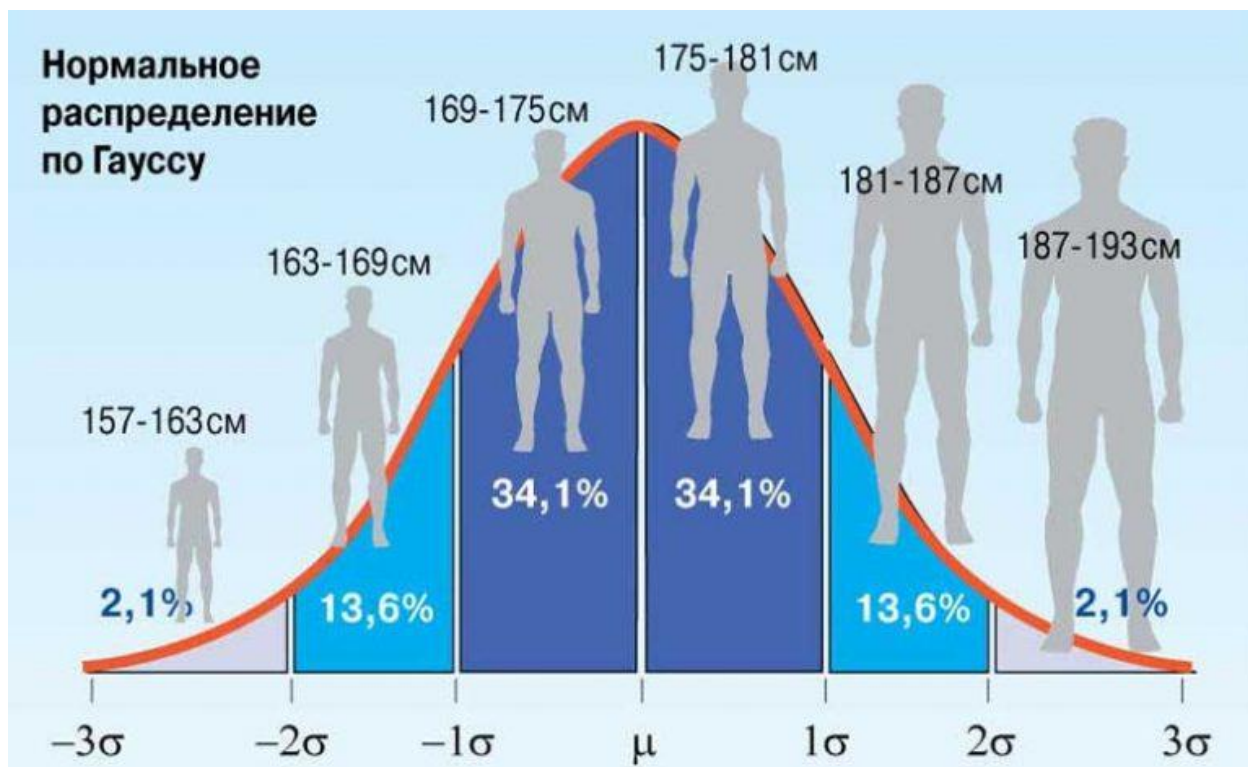
Первое, с чего следует начать, так это раз и навсегда запомнить фразу: **«Радиоактивный распад – это процесс, которому присущ вероятностный характер!!!»** Закройте глаза и трижды повторите эту магическую фразу.

Мощность дозы, которую мы собираемся контролировать, является случайной величиной: у неё нет какого-то одного четко зафиксированного значения. Даже если у нас на руках будет фантастический «самый точный» дозиметр-радиометр (с нулевыми погрешностями), то каждый раз он будет показывать разные значения. Любое из полученных значений будет соответствовать истине, поскольку на момент одного измерения исследуемая величина имела одно значение, а на момент другого измерения –

другое. Ну а учитывая, что реальные дозиметры обладают ещё и собственными погрешностями, то дело принимает серьёзный оборот!!!

Если мы возьмём лист бумаги и начнём записывать все полученные результаты (как тот самый мужик, что 11 лет считал количество спичек в коробках), то сможем заметить, что некоторые близкорасположенные значения встречаются часто, а другие – реже, причём чем больше разница между этими значениями, тем заметнее разница в частоте их появления. Зависимость частоты появления случайной величины от принимаемого этой величиной значения называется **плотностью распределения вероятностей**, или функцией плотности распределения вероятностей (не путать с функцией распределения непрерывной случайной величины, производной от которой является плотность).

Самой известной плотностью распределения вероятностей является функция, описывающая нормальное распределение, которое также часто называют распределением Гаусса, или Гаусса-Лапласа. Такое оригинальное название «нормального распределения» говорит само за себя, даже знаменитая фраза Елены Малышевой «Это норма!» как раз из нашего случая. Нормальное распределение в окружающем нас мире встречается повсеместно: рост и масса людей (очень толстых и очень худых людей всегда меньше, чем людей с привычной массой, аналогично как и очень высоких и очень низких людей); размеры всех органов и конечностей биологических особей; износ напольных покрытий и тротуаров (в центре всегда сильнее, чем по краям); цены на один и тот же товар в разных магазинах; заработная плата граждан; продолжительность жизни существ и срок службы изделий; распределение прибылей и убытков в торговле и т.п. График функции плотности распределения вероятностей для нормального распределения имеет вид колоколообразной кривой.



Интуитивно понятно, что если мы усредним все имеющиеся в нашем распоряжении значения случайной величины, то получим среднее значение, которое будет встречаться

чаще всех остальных. В теории вероятностей такое значение именуется **математическим ожиданием**. Смысл термина также заложен в его названии: если мы собираемся что-то измерить, то ожидаем появление именно этого значения. На приведенном выше графике оно обозначено греческой буквой  $\mu$  («мю») и для роста людей составляет 175 см.

Величина, отложенная от математического ожидания в область как меньших, так и больших значений и обозначенная греческой буквой  $\sigma$  («сигма»), называется средним квадратическим отклонением (устоявшаяся аббревиатура СКО), иногда его ещё называют стандартным отклонением.

Характерное свойство нормального распределения состоит в том, что:

- 68,27% значений случайной величины расположены в «коридоре»  $\pm 1\sigma$ ;
- 95,45% значений случайной величины расположены в «коридоре»  $\pm 2\sigma$ ;
- 99,73% значений случайной величины расположены в «коридоре»  $\pm 3\sigma$ .

Отсюда же происходит знаменитое правило «трех сигм»: если случайная величина распределена нормально, то абсолютная величина ее отклонения от математического ожидания не превосходит утроенного СКО. Таким образом, профессор и отличный специалист своего дела Елена Васильевна Малышева в телепередаче «Жить здорово» говорит: «Это норма!» о тех величинах, которые мы сможем обнаружить в среднем у 997 человек из 1000 обследованных.



Для нормального распределения следует сделать небольшую оговорку: оно подразумевает, что случайная величина непрерывная.

При оценке характеристик радиоактивного распада нужно понимать, что распад может или произойти, или не произойти, - другого не дано! Следовательно, за некоторый промежуток времени распадов может произойти только целое количество, а случайная величина будет принимать только дискретные значения. Похожим на нормальное распределение, но описывающим именно дискретные случайные величины является распределение Пуассона. В строгой трактовке распределение Пуассона возникает при выполнении следующих условий:

1. Случайная величина может принимать только целые положительные значения, включая 0.
2. Распределение Пуассона описывает редкие события – вероятность двух (и более) событий на достаточно малом временном или пространственном интервале бесконечно мала по сравнению с вероятностью одного события. Это свойство называется ординарностью.
3. События должны быть статистически независимыми (во времени или пространстве).
4. Время (или пространство) должно быть однородным для изучаемых событий. В этом случае поток событий можно считать стационарным, т. е. не зависящим от начала отсчета временной или пространственной координаты.

Таким образом, характеризовать интенсивность ионизирующего излучения (количество распадов за некоторый промежуток времени) более правильно именно параметрами распределения Пуассона, нежели нормального распределения.

У распределения Пуассона есть одна замечательная присущая только ему особенность: математическое ожидание однозначно связано с СКО численным равенством:

$$\sigma = \sqrt{\mu}$$

В относительных единицах СКО обычно обозначается греческой буквой  $\delta$  («дельта»):

$$\delta = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\mu}}{\mu} = \frac{1}{\sqrt{\mu}}, \%$$

Если распространить это условие и на нормальное распределение, то при увеличении значения математического ожидания довольно быстро формы графиков распределения начинают совпадать настолько, что уже при  $\mu=10$  практическую разницу между ними уже не заметить. В предельном случае (когда  $\mu$  устремлено в бесконечность) оба распределения тождественны друг другу. Именно поэтому мы сможем воспользоваться правилом трёх сигм.

Итак, предположим, что мы включили дозиметр и за минуту насчитали 25 импульсов. Полученное значение 25 имп/мин является оценкой случайной величины ЕРФ, а чему же точно равна эта случайная величина? Рассчитаем СКО: единицу делим на корень квадратный из 25 и получаем 0,2 или 20%. Применяем правило трёх сигм:

- с вероятностью 68,27% случайная величина спряталась в «коридоре»  $\pm 1\sigma$ , то есть 25имп/мин  $\pm 20\%$ , или в абсолютных значениях между 20 и 30 имп/мин;
- с вероятностью 95,45% случайная величина спряталась в «коридоре»  $\pm 2\sigma$ , то есть 25имп/мин  $\pm 40\%$ , или в абсолютных значениях между 15 и 35 имп/мин;
- с вероятностью 99,73% случайная величина спряталась в «коридоре»  $\pm 3\sigma$ , то есть 25имп/мин  $\pm 60\%$ , или в абсолютных значениях между 10 и 40 имп/мин.

Результат расчётов следует понимать так: мы получили математическое ожидание 25 имп/мин, но сама истинная случайная величина с указанными вероятностями может быть где угодно в пределах рассчитанных «коридоров». Вероятности для коридоров  $\pm 1\sigma$ ,  $\pm 2\sigma$  и  $\pm 3\sigma$  называются **доверительными интервалами**. Пожалуйста имейте в виду, что

наша «спрятанная» случайная величина может пребывать в любой точке указанных промежутков с одинаковой вероятностью.

Получается, чем уже «коридор», тем с меньшей вероятностью там находится наша случайная величина. «Что же делать, как померить точнее, чтобы и «коридор» поуже был и вероятность побольше?», - спросите Вы. Давайте будем мерить не одну минуту, а например 4 минуты. Пускай за это время мы насчитаем 100 имп. Получается математическое ожидание будет 100 имп / 4 минуты (это опять 25 имп/мин). Рассчитываем СКО: единицу делим на корень квадратный из 100 и получаем 0,1 или 10%. Применяем правило трёх сигм:

- с вероятностью 68,27% случайная величина спряталась в «коридоре»  $\pm 1\sigma$ , то есть 25имп/мин  $\pm 10\%$ , или в абсолютных значениях между 22,5 и 27,5 имп/мин;
- с вероятностью 95,45% случайная величина спряталась в «коридоре»  $\pm 2\sigma$ , то есть 25имп/мин  $\pm 20\%$ , или в абсолютных значениях между 20,0 и 30 имп/мин;
- с вероятностью 99,73% случайная величина спряталась в «коридоре»  $\pm 3\sigma$ , то есть 25имп/мин  $\pm 30\%$ , или в абсолютных значениях между 17,5 и 32,5 имп/мин.

Как видите, за счёт увеличения времени экспозиции дозиметра нам удалось существенно повысить точность измерения. Обратите внимание на то, для увеличения точности в 2 раза пришлось увеличить время экспозиции в 4 раза!!!

**Вывод: чем точнее должно быть произведено измерение, тем дольше должен работать прибор, причём увеличение точности квадратично увеличивает необходимое время экспозиции. Чем выше точность радиометра, тем он медленнее и хуже в поисковых задачах.**

## Глава 2. Первое, второе, компот... А где добавка?

В предыдущей главе мы разобрались со столь сложной темой статистической неопределённости. Попробуем раскусить как семечку простую задачу с бытовым дозиметром.

Алгоритм пересчёта набранных за интервал измерения импульсов в мкР/ч у бытовых индикаторов, как правило, довольно прост: время экспозиции подбирается таким, чтобы сосчитанное за него количество импульсов в точности соответствовало значению мощности дозы, выраженному в мкР/ч. Для дозиметров со счётчиком СБМ20 это время обычно составляет около 35...40 секунд. Если в условиях ЕРФ за это время наберётся 12 импульсов, то прибор покажет 12 мкР/ч, а если наберётся 15 импульсов, то прибор покажет 15 мкР/ч. Рассчитаем неопределённости для 12 мкР/ч:

- с вероятностью 68,27% мощность дозы равна 12 мкР/ч  $\pm 29\%$  или 8,5...15,5 мкР/ч;
- с вероятностью 95,45% мощность дозы равна 12 мкР/ч  $\pm 58\%$  или 5,0...19,0 мкР/ч;
- с вероятностью 99,73% мощность дозы равна 12 мкР/ч  $\pm 87\%$  или 1,2...22,4 мкР/ч.

В дозиметрии по умолчанию предполагается использование доверительного интервала  $\pm 2\sigma$ , как видите неопределённость измерения впечатляет!!! Получается, что с таким алгоритмом обработки в условиях ЕРФ неопределённость составит около  $\pm 70...50\%$ ,

то есть надеяться на какой-либо устойчивый результат в таких измерениях всё равно, что водить вилами по воде. Но это ещё не всё; опять вспомним мужика, который 11 лет считал количество спичек в коробках, и методично запишем 20...30 результатов измерений. «На глазок» вы заметите, что результаты частенько выскакивают за пределы значений, рассчитанных при доверительной вероятности  $\pm 2\sigma$ . Это «первый звоночек» к тому, что наша теория начала расходиться с практикой, давайте разбираться в чём же дело.

Попробуем взглянуть на эту проблему с другой стороны. Чувствительность счётчика СБМ20 указана в паспорте и составляет  $260 \pm 20$  имп/с при облучении с интенсивностью 4 мкР/с (14 400 мкР/ч) изотопом Cs-137. Нетрудно посчитать, что на 1 мкР/ч должно приходиться 0,018 имп/с, а при фоне 12 мкР/ч интенсивность должна получиться 0,217 имп/с.

Для экспериментального подтверждения я взял счётчик СБМ20 и заставил его потрудиться несколько дней на своём столе, где математическое ожидание ЕРФ равно 12 мкР/ч. По завершению эксперимента оказалось, что интенсивность счёта составила в среднем 0,427 имп/с.

Сравниваем результаты теоретического прогноза и эксперимента и обнаруживаем, что на практике интенсивность счёта оказалась завышена на  $0,427 - 0,217 = 0,21$  имп/с. А вот это уже «второй звоночек» о том, что предыдущая теория точно расходится с практикой.

Физический смысл разностной величины таков: счётчик Гейгера даёт импульсы в отсутствии внешней причины. Именно эта величина называется собственным фоном счётчика или натуральным фоном. Причины наличия собственного фона заключаются в спонтанной эмиссии электронов с поверхности катода и в некоторой собственной радиоактивности материалов из которых изготовлен счётчик, в том числе поддерживаемой космическим излучением (наведённая активность).

У каждого экземпляра газоразрядного счётчика значение натурального фона сугубо индивидуально. Производитель счётчиков СБМ20 в паспортах указывает, что натуральный фон не более 1 имп/с, но на практике он редко превосходит 0,5 имп/с. В абсурдности предельного значения «1 имп/с» для СБМ20 убедиться легко: при нулевом фоне окружающей среды счётчик должен выдавать точно не менее 60 импульсов за минуту, на практике даже в условиях воздействия ЕРФ набирается не более 30...40 импульсов.

Главное, на что стоит обратить внимание, так это на соотношение количества истинных импульсов от внешнего облучения к количеству импульсов, вызванных собственным фоном. В эксперименте с ЕРФ местности 12 мкР/ч оказалось, что почти половина всех импульсов обусловлена собственным фоном счётчика, а значит, на случайную величину мощности дозы, которую мы хотим оценить, за те самые 30...40 секунд пришлось всего 6 импульсов. Давайте пересчитаем неопределенность измерения при различных доверительных вероятностях:

- с вероятностью 68,27% мощность дозы равна 12 мкР/ч  $\pm 41\%$  или 7,1...16,9 мкР/ч;
- с вероятностью 95,45% мощность дозы равна 12 мкР/ч  $\pm 82\%$  или 2,2...21,8 мкР/ч;
- с вероятностью 99,73% мощность дозы равна 12 мкР/ч  $\pm 122\%$  или 0...26,6 мкР/ч.

При доверительной вероятности  $\pm 2\sigma$  или примерно 95% мы имеем неопределенность измерения ЕРФ 12 мкР/ч аж  $\pm 82\%!!!$  Здесь нужно сделать замечание: при таких низких значениях математического ожидания уже нельзя применять правило «трёх сигм», поскольку пуассоновский процесс начинает сильно разниться с нормальным распределением. Какой бы навороченный радиометр не был, пусть даже корпус у него из золота и вместо кнопок – бриллианты, но за 40 секунд с одним счётчиком СБМ20 для 12 мкР/ч мы получим только такой прискорбный результат. Этим объясняются «броски» показаний у подавляющего большинства приборов в условиях ЕРФ. Если Вам захочется измерить околоразмерные значения поточнее, например с доверительной вероятностью 95% и неопределенностью 30%, то будьте готовы к тому, что придётся затратить на это не менее 3,5 минут.

Многие производители дозиметров скромно умалчивают об этом факте, ну а если прибор является профессиональным средством измерения и у него должны быть чётко прописаны метрологические характеристики, то в таком случае начинается либо откровенная ложь, либо разнообразные уловки: например, в документации указывают, что прибор предназначен для измерений от 100 мкР/ч или же занижают доверительную вероятность вместо положенных  $\pm 2\sigma$ . Если же всё делать по-честному, то никто не купит прибор, который будет измерять ЕРФ минут 5...10. Это же обстоятельство делает невозможным процедуру поиска источников, где требуется быстрое обновление показаний.

Радиометры, в которых отсутствует коррекция собственного фона (простые считалочки импульсов за ограниченное время), имеют очень неприятное свойство: при увеличении интенсивности радиационных полей такой прибор довольно скоро начнёт заметно занижать показания. Если применить именно тот счётчик, который использовался в описанном в этой главе эксперименте, то при фоне около 200 мкР/ч будет показывать всего около 100 мкР/ч. Заметьте, это довольно неплохой экземпляр, собственный фон которого был оценен нами примерно в 0,21 имп/с, по техническим условиям он может достигать и 1 имп/с. Практически все калиброванные по ЕРФ любительские конструкции на основе счётчика СБМ20 обладают описанным недостатком и при увеличении мощности дозы будут стремиться существенно занижить показания. Для предотвращения такого опасного эффекта в изделиях, выпускаемых промышленным способом, калибровку производят при мощности дозы, значительно большей по отношению к ЕРФ, но тогда при оценке ЕРФ показания будут завышены (например, 18...22 мкР/ч вместо 12...15 мкР/ч). Как видите, из двух зол выбирают меньше.

К сожалению, калибровка с применением источников ионизирующего излучения для любительских самоделок недоступна по вполне понятным причинам, но применение соответствующей математической коррекции, исключающей из общего количества импульсов составляющую его долю, вызванную собственным фоном, позволяет довольно качественно линеаризовать счётную характеристику прибора, что полностью решает проблему собственного фона.

Истинную скорость счёта  $I_{ист}$  можно вычислить из фактической скорости счёта  $I_{факт}$  поправкой на интенсивность собственного фона  $I_{собств}$  следующим образом:

$$I_{ист} = I_{факт} - I_{собств} ,$$

при этом следует помнить, что размерность всех переменных должна быть одинаковой, например [имп/мин], или [имп/с]. Если же математическая коррекция осуществляется в отношении количества импульсов, а не интенсивности счёта, то удобно пользоваться следующей формулой:

$$N_{ист} = N_{факт} - T \cdot I_{собств} ,$$

где  $N_{ист}$  – истинное количество импульсов,  
 $N_{факт}$  – фактическое количество импульсов,  
 $T$  – время экспозиции.

Здесь также следует быть внимательным с размерностями: размерность времени экспозиции  $T$  должна соответствовать размерности интенсивности собственного фона  $I_{собств}$ , например  $T$  [с] и  $I_{собств}$  [имп/с], или  $T$  [мин] и  $I_{собств}$  [имп/мин].

Типичное значение собственного фона для счётчиков СБМ20 составляет 0,1...0,2 имп/с, что позволяет организовать простой способ коррекции: каждые 10...5 секунд из количества сосчитанных импульсов нужно вычитать 1 импульс. При других значениях натурального фона такой алгоритм легко приспособить, изменив значение времени и значения декрементации (уменьшения переменной).

Следует сделать важное замечание. Количество срабатываний счётчика, обусловленных собственным фоном, также является случайной величиной, распределённой по закону Пуассона. Так, например, если собственный фон счётчика равен 0,2 имп/с, то за минуту будет поступать в среднем 12 «ложных» импульсов, но не строго 12 «ложных» импульсов каждую минуту. Теоретически доказывается, что сумма двух независимых случайных величин, распределённых по закону Пуассона, также распределена по закону Пуассона и формула коррекции собственного фона по своей сути оперирует с математическими ожиданиями этих величин. На практике данное обстоятельство рано или поздно приведёт к тому, что истинное количество импульсов окажется отрицательным, что в свою очередь может привести к непредсказуемому поведению счётного устройства и катастрофическим последствиям. Если счётное устройство является программным и применены беззнаковые типы переменных (unsigned), то уход в область отрицательных значений может закончиться полным крахом выполнения алгоритма, ложному запуску исполнительных устройств или же к аппаратному выходу из строя (например, если через трансформатор высоковольтного преобразователя длительное время подаётся постоянный ток, то есть создаётся короткое замыкание).

Принимая во внимание указанные потенциальные опасности (риски), в ответственных устройствах коррекция собственного фона умышленно не предусмотрена, при этом в эксплуатационной документации делаются соответствующие пометки о том, что в условиях слабых радиационных полей показания устройства не являются достоверными.

Кстати, согласно документации на широко распространённый счётчик СБМ20, нижней границей его применимости является 0,04 мкР/с (144 мкР/ч), то есть измерения ниже 144 мкР/ч (в том числе и значений ЕРФ) любыми дозиметрами на основе счётчика СБМ20 являются юридически несостоятельными.



**Выводы:**

1. Все газоразрядные счётчики обладают собственным фоном.
2. Чем ниже контролируемая мощность дозы, тем сильнее проявляет себя собственный фон.
3. Калибровать дозиметры по естественному фону нельзя.
4. При коррекции собственного фона нужно быть готовым получить отрицательное количество «истинных» импульсов.

### Глава 3. Пять пишем, один в уме

Из предыдущей главы мы узнали, что на низких скоростях счёта существенно искажает результат собственный фон счётчика. Что же будет происходить при высоких скоростях счёта?

Всё используемые в любительской практике газоразрядные счётчики сконструированы таким образом, что возникающий их в объёме разряд через некоторое время гасится самостоятельно. Эффект самогашения достигается за счёт введения в объём счётчика некоторого количества органических многоатомных газов или примеси галогенов, которые постепенно расходуются с каждым разрядом счётчика. Такие счётчики называются самогасящимися. Явление самостоятельного газового разряда, на котором основан принцип действия таких счётчиков, имеет одну не очень приятную особенность в виде неспособности регистрировать ионизирующее излучение в течение некоторого времени после разряда и появления импульсов с меньшей амплитудой по окончании этого времени. Этот временной интервал называют «мёртвым» временем.

При высоких интенсивностях счёта сразу после каждого разряда счётчик будет нечувствителен к ионизирующему излучению на протяжении «мёртвого» времени, поэтому некоторое количество импульсов будет потеряно. Смысл требуемой коррекции заключается в том, что время экспозиции, по сути, уменьшается на промежуток времени, в течение которого счётчик был нечувствителен.

Истинную скорость счёта  $I_{ист}$  можно вычислить из фактического количества импульсов  $N_{факт}$ , подсчитанных за время экспозиции  $T$ , поправкой на «мёртвое» время  $\tau$  следующим образом:

$$I_{ист} = \frac{N_{факт}}{T - \tau \cdot N_{факт}}$$

При переходе к количеству импульсов предыдущая формула принимает вид:

$$N_{ист} = T \cdot I_{ист} = \frac{N_{факт}}{1 - (\tau/T) \cdot N_{факт}}$$

Здесь также следует быть предельно внимательным с размерностями. Приведённая во многих книгах и растиражированная в Интернете упрощённая формула предполагает время экспозиции, равное единице, но при этом ничего не упоминается о размерности этой

единицы и соответствующих размерностях задействованных переменных. В результате такого предположения интенсивность счёта и количество импульсов становятся численно равны и начинается путаница, приводящая в итоге к грубейшим ошибкам в вычислениях.

Типичные значения «мёртвого» времени для счётчиков СБМ20 колеблются от 170 мкс до 210 мкс (в среднем 190 мкс). Следует заметить, что значение этого времени не фиксировано, оно уменьшается при увеличении напряжения на электродах счётчика в пределах счётного плато (см. главу 5) и зависит также от схемотехнических решений, но существуют специальные приёмы аппаратной стандартизации этого времени. При высоких интенсивностях ионизирующего излучения зачастую наблюдается просадка высокого напряжения на электродах счётчика, что также влияет на результаты коррекции.

Коррекцию «мёртвого» времени целесообразно предусматривать для приборов на основе счётчиков СБМ20, когда требуется контролировать ионизирующие излучения с мощностью выше 15...20 тыс. мкР/ч, если же интенсивности слабее, то «просчётами» можно пренебречь.

Как уже упоминалось выше, сразу после «мёртвого» времени есть небольшой промежуток восстановления счётчика. Если разряд произойдёт в этот промежуток, то импульс будет иметь меньший размах по сравнению с импульсами, далеко отстающими от соседних. Чувствительность пороговой схемы, принимающей решение: произошёл разряд или нет, тоже вносит свой вклад в линейность счётной характеристики при высоких интенсивностях. Если чувствительность низкая, то радиометр будет невосприимчив к этим разрядам, следовательно, часть импульсов будет пропущена.

**Вывод: при интенсивностях излучения выше 20 мР/ч в дозиметрах со счётчиком СБМ20 нужно предусматривать коррекцию «мёртвого» времени.**

## **Глава 4. Одна голова хорошо, а две лучше**

В главе 1 было показано, что увеличение времени экспозиции уменьшает неопределенность результата измерений. Одним из способов повысить точность измерений является известный прием, когда производят серию измерений и вычисляют среднее значение. Проведение четырех измерений вместо одного повысит точность измерений почти в два раза, а проведение серии из девяти измерений вместо одного повысит точность измерений почти в три раза.

Если мы одновременно включим четыре идентичных радиометра, и снимем с них показания с последующим усреднением, то получим аналогичный результат, как если бы мы производили измерения одним прибором, но вчетверо дольше. Получается приличный выигрыш во времени. На таком принципе основаны приборы, в которых применяются одновременно несколько счётчиков.

Строго говоря, параллельный счёт с нескольких счётчиков – это очень сложная тема. Существенное влияние на счётные характеристики всего устройства оказывает схема включения этих счётчиков. Немаловажное значение имеют разделительные цепи, чтобы сработка одного счётчика не влияла на процессы, протекающие в соседних счётчиках.

Некоторые схемы даже позволяют автоматически переключать между собой счётчики грубых и точных диапазонов в широкодиапазонных приборах.

Типичным примером использования параллельного счёта могут быть приборы с двумя счётчиками СБМ20 (АНРИ-01-02 «Сосна», РКСБ-104, РКС-20.03 «Припять», Радекс РД1703), тремя счётчиками СТС-6 (радиометр «Прогноз»), с четырьмя счётчиками СБМ20 (карманный радиометр-сигнализатор «Сигнал», АНРИ «Сосна», ДРГ-01Т1, Стора-ТУ) и т.д. Как ни странно, но все приборы со счётчиками СБТ-10 тоже относятся к параллельному счёту, поскольку фактически считают импульсы сразу с 10 секций этого замечательного счётчика, а некоторые позволяют ещё и отключать часть секций при высокой интенсивности.

Вроде бы всё здорово, мы уже знаем и про собственный фон, и про «мёртвое» время, но появляется теперь новая проблема. Дело в том, что импульсы от нескольких счётчиков могут накладываться друг на друга и чем больше счётчиков и выше интенсивность излучения, тем вероятнее будут происходить эти наложения. Такой эффект приведёт к снижению показаний радиометра при высоких интенсивностях.

Как оказалось, задача учёта количества наложений случайных величин получается катастрофически сложной, поскольку при наличии собственного фона и «мёртвого» времени случайные процессы перестают быть абсолютно случайными (не выполняется условие независимости событий) и модель нормального или пуассоновского распределения применима лишь на небольшом участке интенсивностей, но и здесь нарушается условие ординарности (одновременно могут произойти несколько событий).

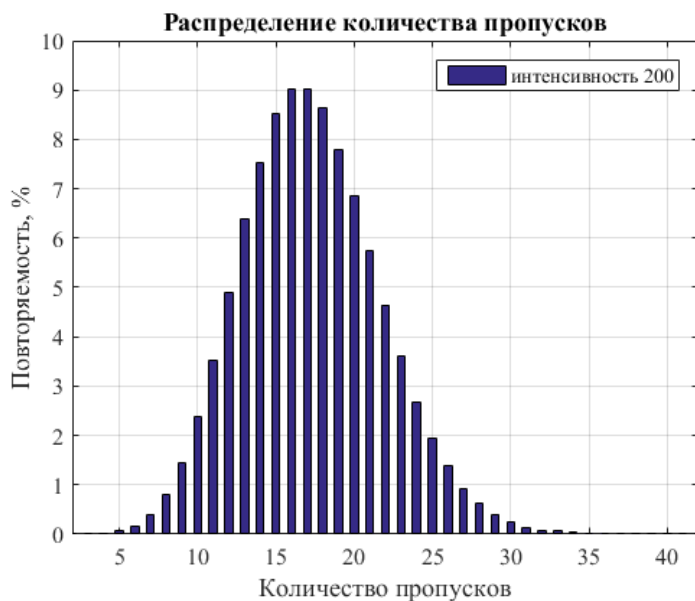
Автору данного материала пришлось затратить около месяца машинного времени на компьютерное моделирование и приличное количество электроэнергии, но это того стоило.

Итак, в приборе идёт параллельный счёт с четырёх счётчиков СБМ20. Каждый счётчик за единицу времени выдаёт случайное количество импульсов, подчиненное распределению Пуассона для заданной интенсивности. Параметры всех счётчиков идентичны: «мёртвое» время 190 мкс, длительность импульса 35 мкс и собственный фон 0,2 имп/с. Моделирование произведено для точек с интенсивностью счёта от 0 до 200 имп/с по миллиону экспериментов для одной точки. Все импульсы появляются в случайные моменты времени, но не ближе друг к другу, чем значение «мёртвого» времени.

Для примера приведу гистограмму распределения значений количества импульсов с одного счётчика при математическом ожидании 200 имп/с, функция плотности распределения вероятностей носит выраженный колоколообразный вид, присущий нормальному распределению.



Как можете видеть, в 99,7% случаев счётчик будет выдавать импульсы от 160 до 240 единиц. Каждый из 4 счётчиков выдаёт разнообразные количества импульсов с заданными параметрами. Для интенсивности 200 импульсов в секунду мы получаем, что при параллельном счёте за счёт наложения двух, трёх и даже четырех импульсов будут потеряны примерно 17 импульсов.



Интерес вызывает и тот факт, что распределение пропущенных импульсов (наложений) имеет типичный пуассоновский вид.

Аналогичный эксперимент был произведён для расчёта наложений, когда все четыре счётчика генерируют количество импульсов, в точности равное математическому ожиданию. Магическим образом распределение количества пропусков в точности совпадает с экспериментом, где количество импульсов случайно. Объяснение этого феномена связано с эффектом нормализации, когда результат взаимодействия случайных

процессов с любыми распределениями стремится к нормальному распределению. Это одна из великих тайн окружающего нас мира.

Замена случайного количества импульсов, подчиняющегося распределению Пуассона, на количество импульсов от каждого счётчика, равного математическому ожиданию, позволяет аналитически точно получить вероятностное распределение количества просчётов при известных интенсивностях. Формула такой зависимости при увеличении количества счётчиков резко усложняется за счёт комбинаторных составляющих, а количество степеней переменных в ней также будет соответствовать количеству счётчиков.

График зависимости количества просчётов, вызванных наложением импульсов на предыдущие (которые, в свою очередь, тоже могли наложиться на предыдущие) приведён ниже.



Эта функциональная зависимость может быть аппроксимирована хорошо знакомой нам из школьной программы параболой.

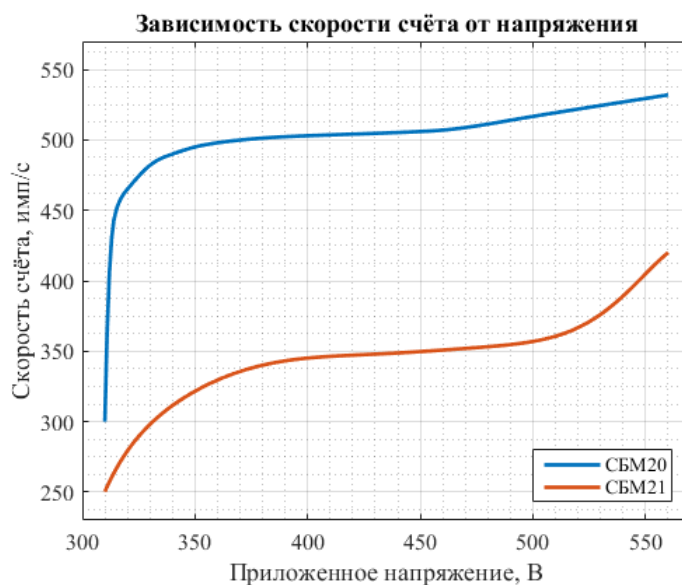
**Вывод:** при параллельном счёте с увеличением интенсивности и количества счётчиков будет наблюдаться нелинейное занижение показаний, вызванное наложением импульсов.

## Глава 5. Мудрец избегает всякой крайности

Нет ничего печальнее вопроса расчёта повышающего трансформатора для изготовления высоковольтного преобразователя в любительских конструкциях. Каждый, кто собирал дозиметр своими руками, рано или поздно сталкивался с трудностями в поиске нужного трансформатора или в его изготовлении собственными руками. Дело тут даже не в лени или отсутствии нужных материалов, а именно в том, что такие трансформаторы не поддаются теоретическому расчёту. Магнитная энергия, запасённая в индуктивности при

отключении источника внешнего тока, будет создавать электродвижущую силу, поддерживающую ток в цепи, поэтому при резком отключении источника напряжение на выводах катушки индуктивности теоретически должно оказаться бесконечным, однако на практике этого конечно же не происходит. Классический расчёт выходного напряжения через коэффициент трансформации не работает, поскольку форма тока не гармоническая. Расчёты, свойственные для импульсной техники, тоже не дают положительного результата, так как прогнозируемой токовой нагрузки нет, а каждый раз отбирается лишь некоторый заряд. В итоге: все рабочие конструкции имеют трансформаторы, про которые можно сказать лишь то, что они удачно подошли. Возможно, любительские дозиметры не получили бы такого широкого распространения, если бы Юрий Алексеевич Виноградов в далёкие 1990-е на страницах журнала «Радио» не начал бы делиться своими удачными конструкциями, которые действительно работали. Промышленные производители дозиметров скромно умалчивают о том, что трансформаторы в их приборах появились тоже только после изнурительных проб и экспериментов инженеров-разработчиков, колдовавших с количеством витков, магнитопроводом, сечением проводников и формой питающих токов.

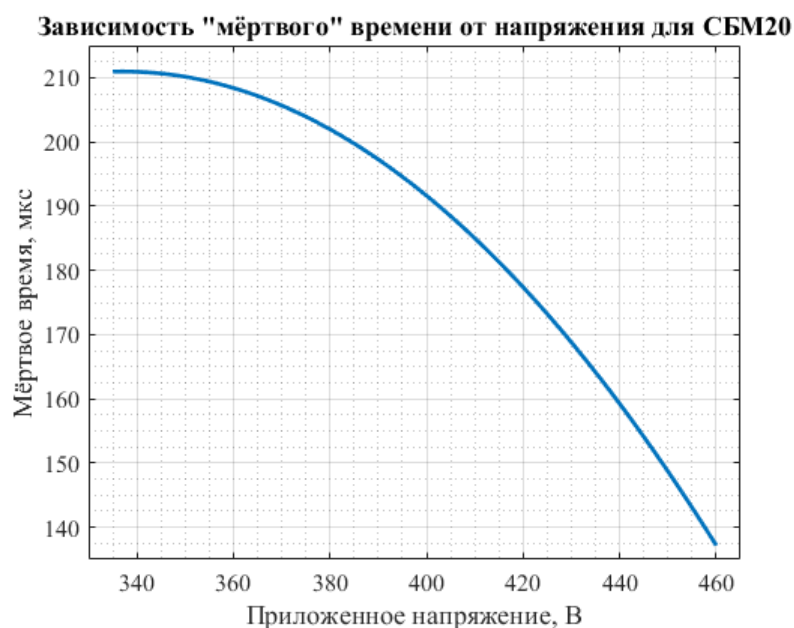
В предположении, что у нас уже получилось сделать преобразователь, генерирующий высокое напряжение, поставим главный вопрос: «На какое напряжение его нужно настроить?» Логично было бы выбрать напряжение в центре счётного плато – пологой области счётной характеристики детектора. На счётном плато число зарегистрированных импульсов практически не зависит от напряжения, т.к. каждая ионизирующая частица, попадающая в объем счетчика, вызывает электронно-ионную лавину и самостоятельный разряд в газе. В действительности плато имеет некоторый наклон, вызванный ложными импульсами за счет неполного гашения, краевых эффектов и т.д. Наличие плато обеспечивает устойчивую работу счетчика.



Итак, перед нами зависимости скорости счёта от напряжения для двух распространённых счётчиков: СБМ20 и СБМ21. Как мы можем легко заметить у СБМ 20 счётное плато простирается от 350 до 450 вольт с серединой на отметке 400 вольт, но вот у

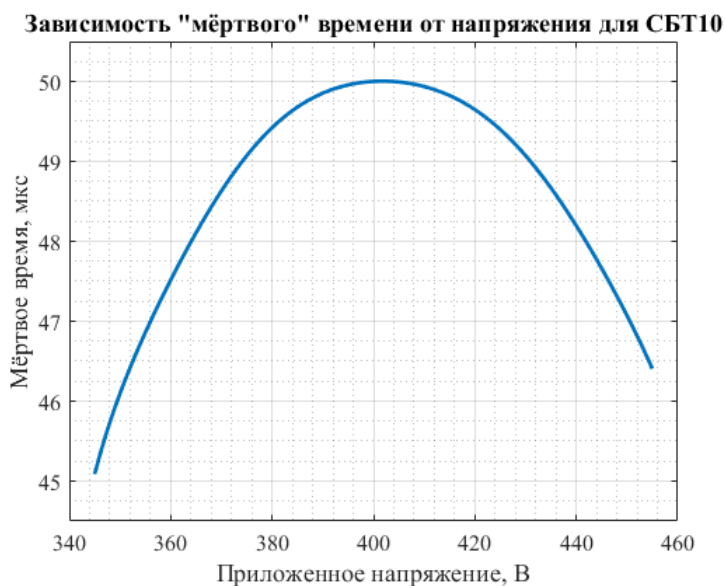
СБМ21 это значение смещено в область более высокого напряжения, а именно – на отметку 450 В. У слюдяного счётчика СБТ10 счётная характеристика также, как и у СБМ21, смещена в область больших напряжений с центром плато примерно на 450 вольт. Согласно эксплуатационной документации на эти счётчики номинальным напряжением питания является величина, равная 400 вольт. Какое же напряжение выбрать: 400 или 450 вольт?

Небольшое замечание по этому поводу уже было высказано в главе № 3. Дело в том, что от приложенного напряжения зависит не только счётная характеристика детектора, но и такой важный параметр, как «мёртвое» время. Соответствующая типовая зависимость для счётчика СБМ20 приведена ниже (для каждого конкретного экземпляра изделия она может быть смещена).



Обратите внимание на то, что в пределах счётного плато 350...450 вольт «мёртвое» время изменяется от 210 мкс до 148 мкс. Отклонение «мёртвого» времени относительно номинального значения 190 мкс (при номинальном напряжении 400 вольт) составит от плюс 10 % до минус 22 %. Получается, что напряжение питания счётчика заметно влияет на результат измерения при высокой интенсивности счёта, когда необходимо производить коррекцию просчётов. Флюктуации напряжения питания могут быть вызваны как температурным фактором (особенно в случае применения блокинг-генераторов), так и недостаточной мощностью высоковольтного преобразователя: при увеличении интенсивности счёта возрастает потребление энергии, что «просаживает» напряжение на выходе преобразователя. В случаях, когда невозможно обеспечить удовлетворительную мощность источника высокого напряжения, в качестве номинального иногда выбирают несколько завышенное напряжение 430...440 вольт из расчёта его просадки при увеличении скорости счёта, но при таком подходе могут пострадать метрологические характеристики: коррекция просчётов не учитывает динамическое растяжение «мёртвого» времени.

Намного интереснее в этом плане ведёт себя слюдяной счётчик СБТ10.



Зависимость «мёртвого» времени от приложенного напряжения у счётчика СБТ10 имеет колоколообразный вид с экстремумом в точке с напряжением 400 вольт. При флуктуации напряжения как в большую, так и в меньшую сторону, «мёртвое» время будет только сжиматься. Если при напряжении 400 вольт задаться заранее заниженным значением «мёртвого» времени, например, 49 мкс, то можно минимизировать ошибку коррекции просчётов при отклонении напряжения в любую сторону.

Таким образом, у счётчика СБТ10 с точки зрения коррекции просчётов оптимальным напряжением является 400 вольт, а с точки зрения линейности счёта – 450 вольт. Для такого случая удобно подать более высокое напряжение при низкой нагрузке, а при её увеличении специально обеспечить «просадку» до 400 вольт.

Ещё одно немаловажное обстоятельство: так как в самогасящемся счетчике в процессе развития и гашения разряда происходят необратимые явления, приводящие к диссоциации молекул гасящего газа, количество последнего по мере эксплуатации счетчика уменьшается. С уменьшением числа молекул гасящего газа увеличивается вероятность образования ложных импульсов и свойства счетчика ухудшаются: наклон счетной характеристики увеличивается, а протяженность счетного плато сокращается.

В современной дозиметрической технике (в том числе любительской) успешно применяется форсированное динамическое управление преобразователем напряжения: при высокой нагрузке счётчика количество «подкачиваемой» в преобразователь энергии увеличивается, а при снижении нагрузки – уменьшается. Подобный приём позволяет стабилизировать высоковольтное напряжение, но и здесь есть свои тонкости: всякая подобная система обладает некоторой инерцией. Если произойдёт внезапное увеличение интенсивности излучения, то счётчик резко повысит отбор энергии и некоторое время может наблюдаться «просадка» напряжения, а преобразователь вскоре наверстает упущенное и напряжение восстановится.

Обратный же процесс грозит серьезными неприятностями: если интенсивность излучения внезапно снизится, то счётчик также резко снизит отбор энергии, а в это время разогнанный преобразователь может запросто превысить напряжение счётного плато,



одновременно с этим скорость счета резко возрастает, так как счетчик переходит в режим спонтанного разряда, что потребует от преобразователя «поднажать» ещё больше. Описанная ситуация может возникнуть у любителей ткнуть впритык к детектору чем-нибудь активным, а потом резко убрать своё сокровище. Примерно после 550 вольт счётчики уходят в область насыщения: разряд уже не гасится, а присутствующие в объёме органические многоатомные газы или примеси галогенов с катастрофической скоростью расходуются, не в силах противостоять этому разряду, поддерживаемому излишним напряжением. Такое насилие над счётчиками также очень часто встречается в китайских модулях для конструкторов типа «ардуино» и подобных, в которых напряжение питания зачастую оказывается близким к 500...550 вольтам, вместо ожидаемых 400 вольт. К великому сожалению, по неопытности любители пробуют контролировать это напряжение мультиметрами, входное сопротивление которых достаточно, чтобы создать сильную просадку и уменьшить реальное значение до неузнаваемости. **Запомните: напряжение питания газоразрядного счётчика нужно контролировать исключительно с помощью электростатического вольтметра!!!**

Самым действенным способом защиты счётчиков от ускоренного износа и вывода на режим неугасаемого разряда является применение супрессоров, например, в зависимости от конструкции КС600А, 1N4764А, Р6КЕ400А, или же газовых стабилитронов типа СГ-301С-1 и ему подобных; весь излишек напряжения сбросится на этих элементах.

При сильных морозах возникает ещё одна неприятность – резкое уменьшение концентрации паров веществ, гасящих разряд в объёме счётчика, из-за их конденсации. Первые модели счётчиков СССР оказались совершенно непригодными к работе уже при минус 20 °С (чему геологи были «очень рады»). Счётчики СТС-5 для военных радиометров ДП-5 позволяли работать в диапазоне температур от минус 40 °С до плюс 50 °С, а современные СБМ20 – уже от минус 60 °С до плюс 70 °С, с гарантией работоспособности при температуре плюс 85 °С в течение не менее 125 часов. Для любительских целей хватит с лихвой, но вот в космосе такие штучки становятся бесполезными.

#### **Выводы:**

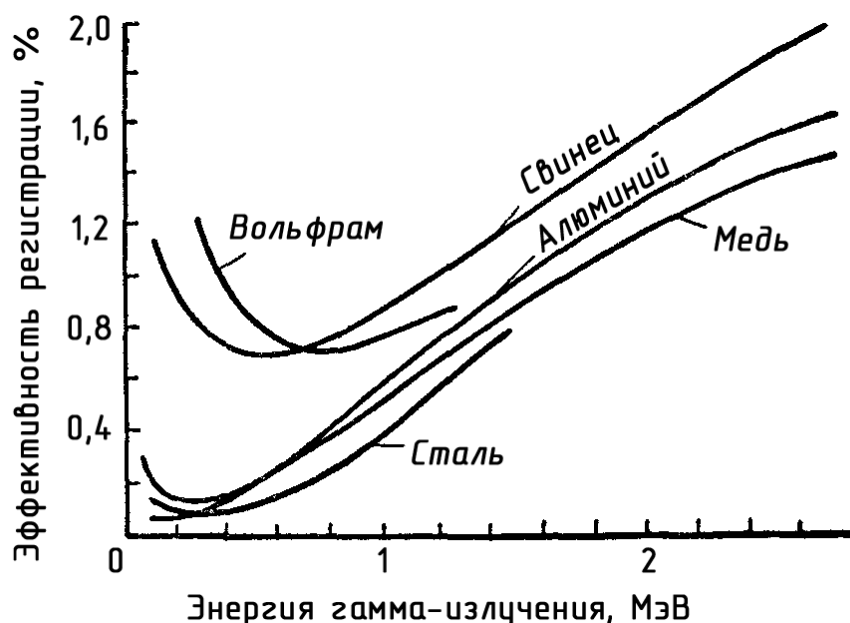
- 1. Номинальное напряжение счётчика не всегда является оптимальным.**
- 2. Для обеспечения высокой точности измерения необходимо стремиться как можно более качественно стабилизировать высокое напряжения, прикладываемого к электродам счётчика.**
- 3. При конструировании дозиметрической техники необходимо помнить, что не все преобразователи могут развить необходимую мощность для питания счётчика в условиях высоких скоростей счёта**
- 4. Напряжение питания газоразрядного счётчика нужно контролировать исключительно с помощью электростатического вольтметра.**
- 5. Наличие аппаратной защиты счётчика от пробоя является хорошим тоном.**

## Глава 6. Очень жёсткая глава или 50 оттенков сияющего

Суть этой главы, также, как и прежней, не связана с математической обработкой данных напрямую, но в значительной мере оказывает влияние на скорость счёта дозиметра и неопределённость результатов.

Счёт квантов газоразрядным счётчиком напрямую связан обусловлен взаимодействием излучения с веществом катода счётчика. Проникающая способность гамма-квантов крайне высока, то есть вещество слабо поглощает эти кванты. Поскольку гамма-счётчики регистрируют фотоэлектроны, вырванные из катода счётчика, то эффективность этих счётчиков будет зависеть от энергий гамма-квантов.

Ниже представлены кривые зависимости эффективности счётчика от энергии квантов для нескольких типичных катодов оптимальной толщины.



Как видите, назвать газоразрядный счётчик эффективным в регистрации гамма-квантов довольно затруднительно. Эффективность распространённых счётчиков СБМ20 с корпусом-катодом из нержавеющей стали для гамма-квантов с энергиями до 1,5 МэВ не превосходит 0,8 процентов, то есть в среднем из 100 квантов, попадающих на счётчик, 99 пройдут его на вылет и не вызовут разряда!!! Именно поэтому для поисковых задач в условиях естественного фона предпочтительнее аппаратура, основанная на сцинтилляционном методе регистрации ионизирующего излучения. А вот эффективность регистрации бета-частиц у слюдяных газоразрядных счётчиков заметно лучше – от 50% до 80%.

На сленге ядерщиков о гамма-квантах, обладающих большой энергией, принято говорить как о жёстком излучении, поэтому энергетическую зависимость эффективности регистрации часто называют «ход с жёсткостью».

Для уменьшения зависимости показаний от энергии излучения в дозиметрах применяют компенсирующие фильтры, которые притормаживают шустрые гамма-кванты,

чтобы у тех появилось больше шансов провзаимодействовать с катодом счётчика. В простейшем случае компенсирующий фильтр представляет собой обёртку из свинцовой фольги, которая выравнивает ход с жёсткостью, естественно жертвуя чувствительностью прибора к мягкому гамма-излучению. Более качественную коррекцию хода с жёсткостью обеспечивают многослойные фильтры сложной геометрии из разных материалов.

Здесь можно провести прямую аналогию с девушками, которые вызывающе одеваются. С такой одежкой они хорошо притормаживают дерзких ребят (с надеждой дальнейшего взаимодействия, разряда и может быть даже рождения пар), но вот более обстоятельные и нерасторопные ребята уже на подходе начинают останавливаться, понимая, что скоро их энергия иссякнет и лавину эмоций они вызвать не смогут. И тем, и другим ребятам сопутствует статистическая удача: бывает, что у нерасторопных всё получается, а бывает, что и дерзких не цепляет. Ну а в среднем, привлекательность вульгарно одетых дам значительно ниже, чем у тех, кто одевается «с изюминкой».

Необходимо подчеркнуть, что именно различная энергетическая чувствительность дозиметров может приводить к значительному расхождению показаний. Так, при измерениях МЭД, создаваемой источником с изотопом Цезий-137 (Cs-137, энергия 662 кэВ), счётчик без компенсирующего фильтра даст почти в два раза меньше импульсов, чем от источника с изотопом Кобальт-60 (Co-60, энергии 1173 кэВ и 1333 кэВ) при одинаковой ионизирующей способности (реальной МЭД) в точке измерения. При наличии же компенсирующего фильтра интенсивность счёта сравняется, но конечно же будет меньше наименьшей: счётчик станет одинаково плохо чувствительным к разным изотопам, но зато чувствительным одинаково.

Компенсирующие фильтры с перфорацией позволяют выравнивать жёсткость хода без значительных потерь в области мягкого излучения, например, в дозиметрах ДКГ-PM1621 чувствительность прибора гарантируется в широчайшем диапазоне: от 10 кэВ до 20 МэВ и с отклонением не более 30 % от энергии 662 кэВ (Cs-137)!!!

В подавляющем большинстве бытовых задач интерес представляет не точная характеристика излучения ионизировать окружающую среду, а именно обнаружение этого излучения на фоне естественной составляющей. Сложно представить ситуацию, когда гражданин стоит возле металлических труб неизвестного происхождения и выбирает товар для покупки между «фонящими» 1,01 Р/ч или 1,28 Р/ч. Здравомыслящий человек будет драпать одинаково быстро, что от первой трубы, что от второй. С задачей обнаружения конечно же лучше справляются приборы без энергетической компенсации. Отсутствие корректирующего фильтра позволяет этим приборам быть чувствительны и к бета-частицам.

#### **Выводы:**

- 1. Для компенсации хода с жёсткостью нужны специальные фильтры.**
- 2. Для бытовых целей предпочтительнее прибор без коррекции.**

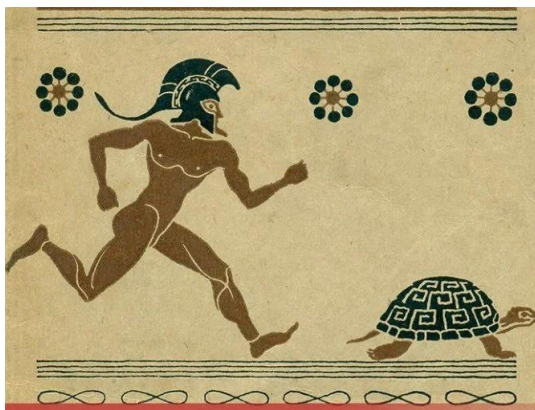
## **Глава 7. Большое видится на расстоянии**

Для того, чтобы понять принцип действия описываемого ниже хитроумного метода, придётся посмотреть на радиоактивный распад так-сказать «издалека». Возможно, некоторые читатели не смогут в полной мере осознать глубокий смысл происходящих процессов, поскольку далеко не у всех есть развитое в требуемой мере чувство абстрактного мышления, но всё же постарайтесь читать медленно и вдумчиво. Результаты сложного умозрительного анализа будут изложены в доступной форме, поэтому заранее не унывайте!

Итак, у нас в воображении случайно нашёлся один атом, который оказался радиоактивным изотопом. Пока мы думаем об этом атоме, он, в свою очередь, замышляет как бы облегчить свою участь и перейти в стабильное состояние. Рано или поздно наш нестабильный атом осуществит этот замысел: может в течении ближайших секунд, а может быть и в следующем тысячелетии. Всё, что можно сказать о вероятности распада прямо здесь и сейчас, так это то, что атом либо распадётся, либо не распадётся. Следовательно, вероятность распада в настоящее мгновение времени составит 50%. Предположим, что атом не распался и наступило следующее мгновение с такой же 50-ти процентной вероятностью распада, а наш атом не распался и в новом мгновении.

Теперь проанализируем ситуацию: чтобы атом распался во втором мгновении, нужно, чтобы он не распался в первом мгновении, следовательно, вероятность распада во втором мгновении будет равна произведению вероятностей того, что событие произойдёт во втором мгновении (0,5), на вероятность того, что событие не произошло в предыдущем мгновении (1-0,5), итого 0,25 или 25%. А ведь наверняка до этих двух мгновений было ещё очень много других мгновений? Учитывая, что длительность мгновения бесконечно мала, то других предшествующих мгновений было бесконечно много, следовательно, продолжая вычислять условную вероятность, получим, что искомая вероятность бесконечно мала или, как говорят математики, событие невероятно. Вот это «поворот»!!! Мы ведь знаем, что атомы распадаются, дозиметры трещат, кванты разлетаются, а получается, что распад в какое-то мгновение – это невероятное событие!!!

С аналогичной трудностью столкнулись и наши далёкие предки из времён античности. В философии для описания подобной ситуации используется термин «апория», что означает вымышленную, логически верную ситуацию, которая не может существовать в реальности. Наиболее знамениты апории Зенона из Элеи «Ахиллес и черепаха», «Стрела Зенона», «Дихотомия» и «Стадион». Апорийное суждение фиксирует несоответствие эмпирического факта и описывающей его теории. Логическое заблуждение удалось преодолеть только после того, как появился Математический анализ (интегральное и дифференциальное исчисление), основы которого заложили сэр Исаак Ньютон и Готфрид Вильгельм Лейбниц. Для разрешения нашей апории (назовём её «радиофил и неустойчивый атом»), придётся тоже подойти к проблеме совсем с иной стороны.



Чудесным и замечательным является тот факт, что множество атомов распадаются в единицу времени в строго определённой пропорции, хотя сам по себе каждый одиночный акт радиоактивного распада является спонтанным. Создаётся впечатление, что всем этим «роем» атомов управляет некоторый коллективный разум, отдающий чёткие команды атомам о том, что некоторым нужно немедленно распасться, а атомы беспрекословно выполняют эти команды. Закон радиоактивного распада эмпирически был открыт Фредериком Содди и Эрнестом Резерфордом и сформулирован ими в 1903 году. Термин «период полураспада», о котором слышал, наверное, каждый, обозначает время, в течении которого распадётся половина нестабильных атомов из нашего «роя». Удивительно, но в природе не происходит ситуаций, когда атомы вдруг перестают распасться, навёрстывая упущенное позже, что могло бы проявиться всплеском активности исследуемого образца. Для каждого изотопа период полураспада является неизменным и не зависящим от каких-либо внешних факторов (за редчайшими исключениями, которые до сих пор оспариваются и проверяются). Таким образом, несмотря на полную неопределённость с планами на будущее у каждого отдельно взятого нестабильного атома, при рассмотрении большого количества таких же атомов, мы абсолютно точно можем спрогнозировать, какая доля из всего их количества распадётся за некоторый промежуток времени. Тут не может не вспомниться знаменитая мысль М. А. Булгакова «Кирпич ни с того ни с сего никому и никогда на голову не свалится» из романа «Мастер и Маргарита». Открытие закона радиоактивного распада взбудоражило многие умы: а что, если поведение людей подобно поведению атомов? Что бы ни делал каждый отдельно взятый человек, какие бы он ни строил планы, всё человечество будет неуклонно двигаться к какой-то одной цели? Кстати, у М.А. Булгакова поднята и эта тема: «Позвольте же вас спросить, как же может управлять человек, если он не только лишен возможности составить какой-нибудь план на смехотворно короткий срок, ну, лет, скажем, в тысячу, но не может ручаться даже за свой собственный завтрашний день?» Но, как говорит Леонид Каневский, это уже совсем другая история...

Возвращаясь к нашей апории «радиофил и неустойчивый атом», мы будем теперь отталкиваться уже от данных, полученных опытным путём, а именно: в некоторый промежуток времени обязательно произойдёт некоторое количество распадов. Представьте, что мы на минуту включили дозиметр и слушаем щелчки, свидетельствующие о регистрации попадающих на его детектор квантов. Практически невероятно, если 59 секунд будет полная тишина, а в последнюю секунду последует шквал щелчков. Аналогично невероятной будет и та ситуация, когда кванты будут регистрироваться со строго определённым интервалом, например точно через каждую секунду. Значит кванты прилетают со случайным промежутком, но всё же прослеживается некоторая периодичность, меняющаяся со скоростью, сопоставимой со временем полураспада.

Ситуацию можно представить как маршрут общественного транспорта без диспетчера, где водители самостоятельно координируют свои действия: автобусы ходят примерно с определённым интервалом, иногда отстают от графика, иногда опережают его, но никогда не случается ситуации, чтобы за весь день на маршруте было пусто и все эти автобусы только один раз прошли колонной непосредственно друг за другом. Точно также автобусы никогда не приходят на остановку строго по графику, секунда-в-секунду. Вы не знаете какой именно водитель приедет следующим, но знаете, что следующий автобус прибудет примерно через столько же времени, через сколько прибудет и тот, который следует уже за ним. Чем дольше времени проходит от «часа-пик», тем большим становится интервал следования. Таким образом, мы подошли к тому, что интенсивность распада можно измерять не только количеством зарегистрированных квантов в заданный промежуток времени, но и наоборот – путем измерения промежутка времени между поступлением квантов!

Математически оба способа абсолютно одинаковы, но физический смысл принципиально разный, и вот почему. На спонтанный распад не влияют никакие внешние факторы, и уж тем более включение нашего дозиметра: «рой» живёт собственной жизнью. Учитывая то, что каждый в отдельности атом не спрашивает других атомов ~~«выходят ли они на следующей остановке»~~ «будут ли они сейчас распадаться», то все акты распада являются независимыми. Таким образом, включение детектора и каждый акт распада – это всё независимые события. Если мы будем включать детектор дозиметра в абсолютно произвольные моменты и замерять промежуток времени от включения до поступления первого импульса, то получим среднее «время ожидания», равное среднему интервалу следования этих импульсов между собой при постоянно включенном дозиметре. Строгая формулировка полученного результата звучит так: «В силу независимости событий в неперекрывающихся временных интервалах измерений распределение длительности времени между включением счетчика и первым отсчетом такое же, как распределение времени между двумя последовательными отсчетами».

В англоязычной литературе метод оценки интенсивности распада при помощи измерения времени до прихода первого импульса после подачи напряжения на счетчик Гейгера получил название «time-to-count». Алгоритм работы измерительного прибора, реализующего метод «time-to-count», следующий:

1. На газоразрядный счётчик подаётся высокое напряжение, одновременно запускается таймер.
2. При поступлении импульса по его переднему фронту таймер останавливается и со счётчика незамедлительно снимается высокое напряжение.
3. Возвращаемся в п.1 абсолютно в любое время, но не раньше, чем требуется для восстановления работоспособности счётчика и стабилизации напряжения после однократного разряда.
4. При достижении требуемого количества промежуточных измерений производится вычисление осреднённого значения частоты следования импульсов и окончательное вычисление интенсивности поля.

При внимательном рассмотрении алгоритма, обнаруживается, что ни на один из множества результатов измерения временного интервала не оказывает влияние «мёртвое» время счётчика. Действительно: измерение оканчивается до того, как начнутся процессы гашения разряда. Данное обстоятельство намекает на то, что верхний предел измерения

оказывается не ограниченным «мёртвым» временем детектора. Именно этим фактом обусловлено большинство преимуществ метода «time-to-count» по сравнению с традиционным методом. Перечислим эти преимущества:

1. Более точный результат прямого измерения (нет просчётов).
2. Значительное расширение диапазона измерений.
3. Линейность счёта в широком диапазоне измерений из-за отсутствия насыщения.
4. Отсутствие искажений формы импульса, наблюдаемых во время восстановления.
5. Значительное увеличение срока службы счетчика
6. Требования к высоковольтному преобразователю существенно ниже, поскольку расход электроэнергии при регистрации некоторого количества частиц не будет зависеть от мощности дозы в точке измерения.
7. Возможность «отвлечения» измерительной системы на произвольное время для решения других задач (крайне актуально для микроконтроллеров).
8. Возможность обнаружения резкого изменения обстановки непосредственно во время измерения, «на лету».

Естественно, за все эти прелести приходится платить усложнением конструкции: во-первых, нужно быстро коммутировать высокое напряжение, во-вторых, требуется точно отслеживать временные интервалы, что требует высокой стабильности наряду с высокой тактовой частотой времязадающих узлов. Кроме того, широкий диапазон измерений временных интервалов требует от вычислительной системы наличие высокой разрядности и соответствующих объёмов оперативной памяти не только для хранения результата каждого единичного замера, но и для манипуляций с большим массивом этих промежуточных замеров. Поскольку преимущества метода «time-to-count» непосредственно связаны с исключением влияния «мёртвого» времени, то для приборов, в которых этот параметр оказывает на результат пренебрежимо малое воздействие, конечно же, целесообразно использовать традиционный метод счёта количества импульсов.

Метод «time-to-count» и работающее на его основе устройство были предложены группой американских изобретателей в 1983 году, а в 1986 году они получили соответствующий патент. Примечательно, что теоретическая база подобного метода применительно к измерениям в области ядерной физики была опубликована талантливыми советскими учёными задолго до этого - в 1959 году. А вот массовое серийное изготовление приборов с алгоритмом «time-to-count» началось где-то уже после 2000 года в приборах ДКГ-РМ1203М и МКС-05 «Терра». При верхнем пределе диапазона регистрируемых мощностей экспозиционных доз гамма-излучения 144 мР/ч у счётчика СБМ20, указанные приборы позволяют производить измерения до 200 мР/ч и до 999,9 мР/ч соответственно. Некоторые современные (по состоянию на 2018 год) эксперименты со счётчиком СБМ21 (верхний предел при традиционном методе счёта 1,44 Р/ч) позволили установить, что при использовании метода «time-to-count» замечательно получается контролировать поля с мощностью дозы до 2 тыс. Р/ч, причём это значение было ограничено возможностями элементной базы измерителя, а прогнозируемая работоспособность – не менее 6 тыс. Р/ч.

С развитием метода «time-to-count» зарождается ещё одна крайне дерзкая идея, которой теперь уже ничего не мешает осуществиться. Дело в том, что при отключении приложенного к счётчику напряжения сразу при возникновении разряда мы имеем в точности аппаратное гашение этого разряда, следовательно, от счётчика уже не требуется самостоятельное гашение разряда. Таким образом, состав газовой смеси счётчика

упрощается всего до одного инертного газа: никаких добавок не требуется, а следовательно, расходоваться нечему. На страже радиационной обстановки с успехом может применяться даже обычная неоновая лампочка, а для достижения необходимых эксплуатационных характеристик потребуется только лишь удачная геометрическая конфигурация электродов такой лампочки и определённое давление газа (что уже существует в счётчиках с самогашением). Также можно будет забыть о таких неприятностях, как «звон счётчика», когда вместо одного разряда наблюдается множество разрядов, и «залипание» счётчика при возникновении одного неугасающего разряда, поскольку все такие некондиционные изделия при использовании метода «time-to-count» будут неотличимы от полностью исправных счётчиков.

Идея применения несамогасящихся счётчиков далеко не нова, подобные изделия существуют давно, успешно эксплуатируются, и, по сути, являются предшественниками счётчиков с самогашением. История умалчивает о том, как именно в 1937 году господину Трост пришла в голову идея «вдуть» немного паров этилового спирта в объём счётчика с аргоном и обнаружить эффект самогашения, но, вероятно, в скором времени несамогасящиеся счётчики начнут вытеснять ставшие традиционными самогасящиеся модели. Конечно, на практике наверняка будет не всё так гладко, но многие теоретические предпосылки к реализации такой вот научной фантастики уже экспериментально подтверждаются.

**Вывод: применение метода «time-to-count» позволяет создавать уникальную дозиметрическую технику с огромным диапазоном измеряемой величины, эффективным энергопотреблением и высокой долговечностью даже на основе уже существующих детекторов с гораздо более низкими эксплуатационными характеристиками, наблюдаемыми при традиционном способе счёта.**

*Уверен, впереди нас ждут очень интересные времена со своими чудесными изобретениями!!!*