

реакторов с временным отказом от переработки, по крайней мере, примерно до 2055 г.;

ввод в эксплуатацию специализированного производства по переработке отработавшего топлива быстрых реакторов производительностью не менее 200 т тяж. мет./год, что означает окончание начального этапа замыкания ЯТЦ.

Заключение. В условиях отсутствия дефицита плутония предлагается начать переход к двухкомпонентной ядерной энергетической системе с отложенной переработкой отработавшего уран-плутониевого топлива быстрых реакторов на период после 2050 г. Немедленная переработка этого отработавшего топлива нецелесообразна по экономическим причинам вследствие его незначительного количества, при отсутствии дефицита природного урана и плутония — отказ на время и от использования воспроизводящего бокового blankets.

Экономически оправданным для начального этапа замыкания ЯТЦ может быть сооружение 6—9 энергоблоков с БН-1200М. При сооружении единичного энергоблока вследствие масштабного фактора следует ожидать высокие топливные затраты в расчете на единицу произведенной электроэнергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Двухкомпонентная** ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле. Под ред. Н.Н. Пономарева-Степного. М.: Техносфера, 2016.
2. **Алексеев П.Н., Гагаринский А.Ю., Калугин М.А. и др.** К стратегии развития ядерной энергетики России. — Атомная энергия, 2019, т. 126, вып. 4, с. 183—187.
3. **Белая книга** ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами. Под общ. ред. Е.О. Адамова. М., АО «НИКИЭТ», 2020. 496 с.
4. **Гулевич А.В., Гурская О.С., Декусар В.М., Мосеев А.Л.** Начальный этап замыкания ЯТЦ двухкомпонентной ядерной энергетики. Вызовы и возможные решения: Препринт ФЭИ-3297, 2022. 28 с.
5. **Калашников А.Г., Мосеев А.Л., Декусар В.М. и др.** Развитие программного комплекса CYCLE для системного анализа ядерного топливного цикла. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2016, № 1, с. 91—99.
6. **Communication** Received from the Russian Federation Concerning its Policies Regarding the Management of Plutonium. IAEA Information Circular: INFCIRC/549/add.9/21. Date: 05.11.2019.
7. **Клинов Д.А., Гулевич А.В., Елисеев В.А. и др.** Корректировка изотопного состава плутония с помощью быстрых реакторов. — Атомная энергия, 2020, т. 129, вып. 5, с. 265—272.
8. **Eliseev V., Klinov D., Camarcat N. e.a.** On the possibility to improve mixed uranium-plutonium fuel in fast reactors. — NUCET, 2020, v. 6, № 2, p. 131—135.
9. **Shropshire D., Williams K., Boore W. e.a.** Advanced Fuel Cycle Cost Basis. INL/EXT-07-1207, Rev.1, 2008.
10. **Spencer B., Cul G., Collins E.** Effect of scale on capital cost of nuclear fuel reprocessing. — In: Intern. Conf. GLOBAL 2003, p. 2255—2259 (CD).
11. **Shropshire D., Williams K., Boore W. e.a.** Advanced Fuel Cycle Economic Analysis of Symbiotic Light-Water Reactor and Fast Burner Reactor Systems. INL/EXT-09-15254, 2009.
12. **Stroll W.** Lessons Learned at the Karlsruhe and Hanau Plants for Future MOX Technology Developments. IJU/MD-001, 2002.
13. **Зродников А.В., Декусар В.М., Гурская О.С.** Системная топливная составляющая стоимости производства электроэнергии в двухкомпонентной ЯЭС с замкнутым уран-плутониевым ЯТЦ. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2021, № 3, с. 5—17.
14. **Кларк Дж.** Международные гарантии: точка зрения промышленности. — Бюл. МАГАТЭ, 1996, т. 38, № 4, с. 25—28.

Поступила в Редакцию 16.08.22

УДК 621.039

ТРИ ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА

Шабалин Е.П. (ОИЯИ, Дубна, Московская обл.)

e-mail: shab36@nf.jinr.ru

Пульсирующий реактор — это реактор, работающий в режиме часто и периодически повторяющихся импульсов мощности, длительность которых намного меньше периода их повторения, период повторения — намного меньше времени распада самых короткоживущих осколков деления — эмиттеров запаздыва-

ющих нейтронов. При этом фоновая мощность в промежутках между импульсами намного меньше средней мощности пульсирующего реактора. Периодический характер энерговыделения существенно изменяет связь как прямую, так и обратную между реактивностью и мощностью в сравнении с реакторами непрерывного

действия. В работе выделены и обоснованы три специфических динамических свойства пульсирующих реакторов. Одно из них — неизбежность появления положительной реактивности при возникновении периодических колебаний реактивности. Ранее оно не было описано в специальной литературе, хотя его проявляют и реакторы непрерывного действия, но в значительно более слабой мере, чем пульсирующие.

В соответствии с темой настоящей статьи целесообразно сначала привести некоторые соотношения из классической кинетики пульсирующего реактора.

Кинетика пульсирующего реактора впервые была рассмотрена для случая отсутствия возмущения реактивности, кроме периодической модуляции, необходимой для осуществления импульсного режима работы с постоянной амплитудой и формой нейтронного импульса, в работе [1]. В дальнейшем она уточнялась в целях учета влияния частоты пульсации, отклонения формы модулирующей реактивности от параболы, неточности активной зоны и др. (список работ см. в [2]).

Равновесный режим работы пульсирующего реактора (стабильность энергии импульсов) достигается при определенной надкритичности на мгновенных нейтронах в максимуме модуляции реактивности. Соответственно в равновесном режиме интенсивность запаздывающих нейтронов при развитии импульса мощности одинакова в каждом импульсе и пропорциональна средней мощности реактора. Энергия импульсов для случая, когда импульс развивается в области изменения реактивности во времени по закону параболы, определяется по выражению

$$Q = 3,35 S (\alpha \epsilon_m)^{-1/2} \exp[1,33 (\epsilon_m)^{3/2} (\alpha^{1/2} \tau)^{-1}], \quad (1)$$

где S — источник запаздывающих нейтронов; α — коэффициент параболы реактивности модулятора реактивности, с^{-2} ; τ — среднее время жизни поколения нейтронов; ϵ_m — равновесная (критическая) надкритичность на мгновенных нейтронах в максимуме модуляции реактивности, которая подчиняется уравнению

$$Q/S \sim T_m / \beta_{\text{эф}}, \quad (2)$$

где T_m — период пульсации реактивности; $\beta_{\text{эф}}$ — классическая эффективная доля запаздывающих нейтронов, равная $\sim 0,002 k_{\text{эф}}$ для реактора на плутонии и $\sim 0,001 k_{\text{эф}}$ для реактора на нептунии.

В классическом понимании устойчивого режима работы пульсирующего реактора энергия импульсов постоянна и может флуктуировать только вследствие воздействия на реактивность внешних факторов. При этом разброс энергии импульсов мощности $\Delta Q/Q$ определяется однозначно флуктуациями реактивности $\Delta \rho = \Delta \epsilon_m$. При малых изменениях реактивности связь Q и ϵ_m в уравнении (1) обычно сводят к линейной:

$$\Delta Q/Q = \Delta \rho / \beta_{\text{имп}}, \quad (3)$$

где импульсная доля запаздывающих нейтронов $\beta_{\text{имп}}$ не связана с эффективной долей запаздывающих нейтронов и зависит от комплекса величин α и τ :

$$\beta_{\text{имп}} \sim C (\alpha \tau^2)^{1/3}. \quad (4)$$

Безразмерный множитель $C \sim 0,5$ и слабо зависит от α и τ . При большой надкритичности $\Delta \rho > 0,3\text{—}0,5 \beta_{\text{имп}}$ более точное значение энергии импульса определяется экспоненциальным законом, вытекающим из разложения в ряд показателя экспоненты в формуле (1):

$$Q \sim Q_{\text{ном}} \exp(\Delta \rho / \beta_{\text{имп}}). \quad (5)$$

Соотношение (5) определяет энергию импульсов мощности с завышением не более 10% при $\Delta \rho < 2 \beta_{\text{имп}}$, в то время как линейное приближение (3) занижает энергию импульсов на 10% уже при $\Delta \rho = 0,5 \beta_{\text{имп}}$. Величина $\beta_{\text{имп}}$ обычно намного меньше $\beta_{\text{эф}}$. Так, при параметрах пульсирующего реактора $\alpha = 6720 \text{ с}^{-2}$ и $\tau = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$, характерных для проекта реактора Нептун [3], $\beta_{\text{имп}} = 7,5 \cdot 10^{-5}$ согласно соотношению (4). Для такого $\beta_{\text{имп}}$ флуктуации реактивности $\pm 10^{-5} k_{\text{эф}}$ вызовут разброс энергии импульсов мощности на $\pm 13\%$, при флуктуациях реактивности $7,5 \cdot 10^{-5} k_{\text{эф}}$ размах колебаний импульсов мощности достигнет уже $2,5 Q_{\text{ном}}$, что можно считать предельно допустимым для пульсирующего реактора. Таким образом, в рабочем диапазоне мощности пульсирующего реактора использование экспоненциального приближения в аналитических расчетах безусловно предпочтительнее.

Классическое описание кинетики пульсирующего реактора, основанное на работе [1] и оправдавшее себя для реакторов ИБР и ИБР-30 (ОИЯИ), требует уточнения при повышенных температурных режимах со значительным

нагревом ядерного топлива за время импульса примерно десятки градусов (реакторы ИБР-2, ИБР-2М, Нептун). Динамические процессы в пульсирующем реакторе обычно рассчитывают в приближении «размазанного импульса», что позволяет делать аналитические оценки устойчивости пульсирующего реактора на основе теории реакторов непрерывного действия при низких температурных режимах [2, 4]. Но при этом импульсный характер тепловыделения учитывается некорректно — не принимается во внимание динамическая деформация твэлов. В итоге из расчета исключаются быстрые процессы воздействия импульсов мощности на последующие. Классическая теория устойчивого режима работы пульсирующего реактора оказывается справедливой только в случае очень слабых мощностных эффектов.

Численная симуляция динамических процессов в пульсирующем реакторе с учетом динамических деформаций показывает, что равновесный (установившийся) режим работы может проявляться не только как режим постоянной амплитуды импульсов мощности, но и как периодически повторяющаяся последовательность нескольких (или многих) импульсов разной амплитуды. Такой пакетный режим автоколебаний возникает вследствие собственных изгибных колебаний твэлов или других элементов, состояние которых зависит от энергии импульсов реактора и само влияет на коэффициент размножения нейтронов. Пакетный режим может быть как устойчивым, так и нестабильным или квазистабильным.

Об устойчивости пульсирующего реактора в простейшем случае температурной обратной связи. Пусть в пульсирующем реакторе существует только мгновенный отрицательный температурный эффект реактивности как следствие теплового расширения столба таблеток топлива в твэлах реактора, других эффектов реактивности нет. Предполагаем также, что длительность импульса намного меньше временного промежутка между импульсами, тот — намного меньше времени жизни запаздывающих нейтронов. Эти условия суть определения понятия «пульсирующий реактор». Здесь и далее реактивность измеряется в единицах $\beta_{\text{имп}} = 0,5 (\alpha \tau^2)^{1/3}$ [см выражение (4)]. Если реактивность изменилась в одном импульсе относи-

тельно равновесной надкритичности, определяемой соотношениями (1) и (2), на малое значение ρ_0 , то реактивность в следующем импульсе ρ_1 будет определяться изменением температуры и температурным коэффициентом реактивности $\gamma < 0$. В линейном приближении связи энергии импульса и реактивности получим

$$\rho_1 = \rho_0 \phi \gamma \Delta T,$$

где $\phi < 1$ — изменение температуры сердечника твэла за время между импульсами мощности относительно нагрева ΔT за один импульс. Реактивность в последующих импульсах, как и отклонение энергии импульсов от номинального равновесного значения $\Delta Q \sim Q \rho_n$, будет изменяться по тому же закону

$$\rho_n = \rho_{n-1} \phi \gamma \Delta T = \rho_0 (\phi \gamma \Delta T)^n. \quad (6)$$

Обратим внимание на попеременное изменение знака в каждом последующем периоде пульсации при $\gamma < 0$. Это означает, что любое однократное возмущение реактивности в пульсирующем реакторе влечет за собой череду импульсов с попеременным знаком отклонения их энергии от равновесного значения. Таким образом, в пульсирующем реакторе с мгновенным отрицательным температурным эффектом реактивности всегда есть колебания амплитуды импульсов мощности с частотой, в 2 раза меньше частоты пульсаций модуляции реактивности. Это есть первая принципиальная особенность пульсирующего реактора, обусловленная импульсным периодическим характером энерговыделения.

Переход к экспоненциальному приближению зависимости энергии импульса от реактивности сути не меняет, кроме того, что половинная частота в спектре частот колебаний мощности будет проявляться при меньших флюктуациях реактивности и более интенсивно.

Обозначим произведение параметров $\phi, \gamma, \Delta T$ в формуле (6) знаком Φ . Если значение Φ находится в интервале $[0, 1]$, то после внесения внешней реактивности реактор возвращается к стабильной работе постепенно и монотонно. Если комплекс Φ находится в интервале $[0, -1]$, то реактор возвращается к стабильной работе постепенно, но не монотонно, с колебаниями энергии импульсов, которые тем сильнее, чем ближе модуль Φ к единице. При $\Phi < -1$ пульсирующий реактор после возмущения выходит на

режим автоколебаний или расходящихся колебаний (область импульсной неустойчивости), при $\Phi < -2$ — в режим стохастической неустойчивости [5]. Следует учесть, что условие $\Phi > -1$ определяет стабильность реактора «в малом». При возмущениях реактивности более $0,2—0,3\beta_{\text{имп}}$ нелинейность связи реактивности и энергии импульсов мощности сдвигает границу стабильности в сторону меньших (по модулю) значений Φ .

Кинетика пульсирующего реактора с колеблющимся элементом. Пусть существуют колебания внешней реактивности — периодические и симметричные относительно нулевого значения. Можно показать, что в этом случае они оказывают положительный эффект на реактивность пульсирующего реактора. Причина этого — в нелинейном характере связи реактивности и энергии импульсов мощности. Действительно, отношение энергии n -го импульса к номинальному определяется экспонентой [см. соотношение (5)], которую можно представить в виде суммы членов степенного ряда:

$$Q_n/Q_0 \sim \exp(\rho_n/\beta_{\text{имп}}) = \exp(x) = 1 + x + x^2/2 + x^3/6 + \dots, \quad (7)$$

где x — реактивность в n -м импульсе. При суммировании энергии импульсов за период симметричных колебаний члены последовательности (7) нечетной степени обнуляются, и соответственно вклад в реактивность определяется суммой четных членов, т.е. всегда положителен. В итоге если, например, частота импульсов пульсирующего реактора намного выше частоты колебаний внешней реактивности, симметричные колебания последней приводят к разгону пульсирующего реактора. При других соотношениях частот модуляции реактивности и колебаний внешней реактивности точное решение определяется биением частот и фазировкой. Нетрудно видеть, что для симметричных колебаний реактивности с частотой в 2 раза меньше частоты импульсов реактора изменение энергии импульсов за один период при полной синхронизации будет равно $\cosh(x)$, что всегда больше 1. Иначе говоря, это означает разгон реактора с виртуальной положительной реактивностью

$$\rho = \cosh(x) - 1.$$

С точностью до членов четвертого порядка малости виртуальная положительная реактивность, вносимая колеблющимся элементом, равна $x^2/2$, где x — реактивность. Нарушение синхронизации сущности не меняет, только разгон идет с большим периодом.

Итак, показано, что периодически колеблющийся элемент, влияющий на реактивность, создает виртуальную положительную реактивность и разгон пульсирующего реактора. Это есть вторая принципиальная особенность пульсирующего реактора, обусловленная нелинейным характером связи реактивности и энергии импульсов мощности. Естественно, отрицательная обратная связь по температуре с повышением мощности компенсирует виртуальную положительную реактивность колебательного элемента, и мощность стабилизируется. Колеблющийся элемент не вносит положительный вклад в обратную связь и не может привести к неустойчивости реактора, если амплитуда колебаний не зависит от мощности реактора.

Подобный вывод можно сделать и для реакторов непрерывного действия, так как период разгона на запаздывающих нейтронах согласно формуле «обратных часов» имеет нелинейный характер относительно реактивности. Однако эффект колебаний в пульсирующем реакторе на несколько порядков выше, чем в реакторах постоянного действия, вследствие малости $\beta_{\text{имп}}$ сравнительно с $\beta_{\text{эф}}$.

О динамике пульсирующего реактора с источником колебаний реактивности. Если амплитуда колебаний элемента, влияющего на реактивность, зависит от мощности реактора, то эффект виртуальной положительной реактивности вносит положительный вклад в обратную связь мощность—реактивность и приводит к сложному характеру динамического процесса. Ситуация осложняется из-за присущих пульсирующему реактору колебаний энергии импульсов с частотой, в 2 раза ниже частоты модуляции реактивности. Формально это соответствует тому, что в формуле (6) коэффициент γ следует принять большим по модулю, чем реальный температурный коэффициент. При некоторой комбинации динамических параметров реактора возможна парадоксальная ситуация: в реактор с достаточно сильным отрицательным коэффициентом обратной связи добавляем положительную виртуальную реактивность внешнего ос-

циллятора и получаем дополнительный отрицательный эффект реактивности. При этом он может оказаться настолько большим, что стабильный до того реактор войдет в область автоколебаний — комплекс Φ окажется меньше -1 .

Для исследовательских реакторов характерны малые размеры активной зоны и сравнительно толстые твэлы, что приводит к заметному градиенту температуры в сердечнике твэла и его стальной оболочке в радиальном направлении к центру активной зоны. Следствием этого являются изгибы, вносящие значительный вклад в динамику пульсирующего реактора.

Важно понимать, что в пульсирующем реакторе существуют как статический, так и динамический изгиб. Под статическим подразумевается изгиб оболочки или сердечника, обусловленный средним по времени энерговыделением, под динамическим — нестационарная составляющая изгиба и вызываемые ею колебания оболочки (сердечника) и соответственно реактивности вследствие периодических импульсов мощности. Направление дуги статического изгиба обусловлено способом закрепления концевиков твэла, при этом вклад в реактивность изменяется медленно в соответствии со средней мощностью реактора и не играет роли в быстрых динамических процессах.

Динамический изгиб невелик, обычно примерно сотые доли миллиметра, и соответствующее изменение реактивности несущественно для реакторов с непрерывным течением цепной реакции деления, где мерилем стабильности мощности является эффективная доля запаздывающих нейтронов. Но для пульсирующих реакторов с их низкой импульсной долей запаздывающих нейтронов динамический изгиб — существенный фактор в динамических процессах. При динамическом изгибе возникают колебания реактивности со спектром, близким к ритму импульсов, и вследствие прямой зависимости изгиба от мощности — положительная обратная связь независимо от способа подвески колеблющегося топливного элемента.

Теперь можно сформулировать третью особенность пульсирующего реактора: поперечные колебания твэлов или ТВС пульсирующего реактора всегда вносят положительный вклад в обратную связь мощность—реактивность независимо от направления градиента энерговыделения. При этом, очевидно, продолжает играть

свою роль температурная отрицательная составляющая обратной связи, включающая также эффект статического изгиба.

Заключение. Сформулированные в статье три особенности пульсирующих реакторов в совокупности определяют сложный характер быстрых динамических процессов. Следует, однако, отметить, что эти особенности не свидетельствуют о неизбежности нестабильной работы пульсирующего реактора. Устойчивость пульсирующего реактора зависит от соотношения положительной и отрицательной составляющих эффекта обратной связи мощность—реактивность, которые монотонно изменяются с его мощностью. Знание эффектов реактивности и использование соответствующей модели динамики пульсирующего реактора позволяют найти предел мощности для его устойчивой работы с допустимыми колебаниями амплитуд импульсов мощности после детального численного анализа на быстрых ЭВМ.

Опираясь на описанные особенности динамики пульсирующего реактора, есть основания предполагать, что приближенная аналитическая оценка стабильности такого реактора относительно быстрых процессов, т.е. при постоянной интенсивности источника запаздывающих нейтронов может определяться по соотношению

$$\varphi \exp \gamma \Delta T \cosh(k_b \Delta T) < 1, \quad (8)$$

где k_b — функция трех переменных — частоты импульсов, частоты и времени затухания собственных колебаний твэлов, имеющая сложный немонотонный характер и являющаяся собственно главным предметом динамического анализа. Определение области применимости формулы (8) может являться предметом отдельного анализа.

Автор признателен М.М. Подлесному и А.Е. Верхоглядову, результаты работы которых по численному моделированию динамических процессов привели его к выводам, сформулированным в настоящей статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко И.И., Ставиский Ю.Я. Импульсный режим работы быстрого реактора. — Атомная энергия, 1959, т. 7, вып. 5, с. 417—420.
2. Шабалин Е.П. Импульсные реакторы на быстрых нейтронах. М.: Атомиздат, 1976. 248 с.

3. Аксенов В.Л., Рзянин М.В., Шабалин Е.П. Исследовательские реакторы ОИЯИ: взгляд в будущее. — ЭЧАЯ, 2021, т. 52, вып. 6, с. 13—49.
4. Попов А.К. Передаточная функция и устойчивость импульсного реактора периодического действия. — Атомная энергия, 1987, т. 62, вып. 3, с. 195.

5. Шабалин Е.П. О колебаниях мощности и пределе устойчивости импульсного реактора. — Атомная энергия, 1986, т. 61, вып. 6, с. 401.

Поступила в Редакцию 26.08.22

УДК 519.254+621.039.4

УТОЧНЕНИЕ ПОСТУЛИРУЕМОЙ ДЕФЕКТНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ И ТРУБОПРОВОДОВ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БАЙЕСОВСКИХ ПРОЦЕДУР

Кузьмин Д.А., Верташенюк М.В. (АО «ВНИИАЭС», г. Москва)

e-mail: vertashenok_m@mail.ru

Объем и периодичность эксплуатационного неразрушающего контроля регулируются нормами [1] и устанавливаются в типовых программах проведения с учетом результатов предыдущего контроля на основании рискориентированного подхода, который заключается в расчете риска разрушения элемента и определяется произведением вероятности на последствия этого разрушения.

Оценка вероятности разрушения элемента контроля оборудования или трубопроводов АЭС проводится на основании постулируемой дефектности, которая выражается в виде зависимости вероятности остаточного после контроля и ремонта дефекта от его размера и определяется по данным неразрушающего контроля однотипных объектов, эксплуатируемых в схожих условиях нагружения. При появлении результатов нового контроля вероятность разрушения должна уточняться таким образом, чтобы учитывать историю наблюдений за однотипными объектами и новую информацию об исследуемом объекте. Поэтому возникает необходимость разработки метода уточнения вероятности разрушения конструкционного элемента с учетом вновь поступившей информации. Для обновления статистических данных применяются байесовские процедуры, которые широко используются при уточнении вероятностных параметров технических систем после поступления дополнительной информации об их состоянии в ходе технических инспекций [2].

Формула Байеса — одна из основных в теории вероятностей, которая позволяет определить вероятность события при условии, что произошло другое статистически взаимозависимое с ним событие. Другими словами, по формуле

Байеса можно более точно пересчитать вероятность, взяв в расчет как ранее известную информацию, так и данные новых наблюдений. Формула Байеса может быть выведена из основных аксиом теории вероятностей, в частности, из определения условной вероятности.

Формула Байеса применима для дискретных, непрерывно распределенных случайных величин и смешанных комбинаций данных. Выбор способа применения формулы зависит от поставленной задачи. В настоящей статье будем рассматривать первоначальные данные как непрерывно распределенную случайную величину, новые результаты контроля будут иметь непрерывный закон распределения в связи с тем, что при оценке вероятности разрушения элемента контроля необходимо учитывать диапазон возможного размера несплошностей от чувствительности прибора до максимально возможного, равного площади поперечного сечения трубопровода.

Формула Байеса позволяет изменить первоначальное распределение (априорное) случайной величины v с учетом новой информации η на уточненное (апостериорное)

$$f^{\text{ап}}(v|\eta) = \frac{f^{\text{а}}(v) f^{\text{п}}(\eta|v)}{f(\eta)}, \quad (1)$$

где $f^{\text{а}}(v)$ — априорное распределение v ; $f^{\text{п}}(\eta|v)$ — функция правдоподобия, которая является вероятностью события η при условии события v ; $f^{\text{ап}}(v|\eta)$ — апостериорное распределение v при условии события η ;

$f(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} f^{\text{а}}(v) f^{\text{п}}(\eta|v) dv$ — полная вероят-