

## СТАТЬИ

### Показатели эффективности регулирования безопасности при использовании атомной энергии

Малышев А.Б. (Ростехнадзор), Гордон Б.Г. (НТЦ ЯРБ)

В настоящее время в рамках административной реформы большое значение придается разработке показателей эффективности работы федеральных органов исполнительной власти. Это нужно и для уточнения функций ведомств, и для формирования целевых программ, и для повышения результативности бюджетных расходов [1]. Совершенствование государственного управления предусматривает постепенный переход от так называемого “сметного” планирования к программно-целевому, нацеленному на “достижение общественно значимых и желательных **количественно измеримых результатов деятельности** администраторов бюджетных средств” (Выделено авторами. – Ред.).

В прежние времена перед Госатомнадзором не ставилась извне задача формирования показателей работы. Но ведомство, стремясь объективно оценивать деятельность своих подразделений, само разработало систему показателей собственной работы наряду с показателями, характеризующими нарушения эксплуатации объектов и подлежащими учету (внеплановые отключения, срабатывания аварийной защиты, ошибки персонала и т.п.). Стоит лишь внимательно проанализировать отчеты Госатомнадзора за 1998-2002 гг., чтобы увидеть, какие данные приводились ежегодно для характеристики регулирующей деятельности (см. ниже).

#### Показатели регулирования безопасности

Количество утвержденных нормативных документов
Количество выданных лицензий
Количество проведенных экспертиз безопасности
Количество инспекций по разным их видам
Количество установленных нарушений, в том числе:
норм и правил
условий действия лицензий
Количество предписаний по устранению нарушений
Количество предписаний о приостановке работ
Оштрафовано руководителей
Предупреждено руководителей

У этой системы показателей было достаточно критиков. Документ документу так же, как инспекция инспекции рознь. Предписания могут касаться как серьезных упущений в обеспечении безопасности, так и незначительных. Количество санкций может отражать разную требовательность инспекторов. В целом, разумеется, все приведенные выше показатели регулирования безопасности характеризуют трудозатраты регулирующего органа, но непонятно, как они связаны с безопасностью. Может быть поэтому в поисках показателей своей деятельности Ростехнадзор использовал подход Госгортехнадзора к оценке аварийности предприятий и их воздействия на окружающую среду. В этих показателях не видны собственные трудозатраты ведомства, зато ясен результат его работы. Хотя точно такими же показателями характеризуется деятельность эксплуатирующих организаций.

Следует отметить, что системы качественных показателей эффективности регулирования ядерной и радиационной безопасности (ЯРБ) разрабатывают такие авторитетные международные организации, как МАГАТЭ и Агентство по ядерной энергии ОЭСР [2, 3]. Однако количественные показатели для оценки деятельности регулирующего органа пока не разработаны.

Сразу после своего образования в 2004 г. Ростехнадзором была разработана система, состоящая из трех основных показателей деятельности [4]:

$$1) \text{ Снижение уровня аварийности} = \frac{A_{\phi} O_{\text{cp}}}{A_{\text{cp}} O_{\phi}}, \quad (1)$$

где  $A_{\phi}$  – количество учетных событий по видам (аварий, происшествий, нарушений, инцидентов);  
 $A_{\text{cp}}$  – среднее за предыдущие пять лет количество учетных событий по видам;  
 $O_{\phi}$  – фактическое количество поднадзорных объектов;  
 $O_{\text{cp}}$  – среднее за предыдущие пять лет количество поднадзорных объектов.

$$2) \text{ Эффективность надзора по типам опасных объектов за отчетный год} = \frac{A_i}{N_i / M_{\text{оно}}}, \quad (2)$$

где  $A_i$  – количество аварий на поднадзорных объектах по типам сложности;  
 $N_i$  – количество выявленных нарушений;

$M_{\text{опо}}$  – количество поднадзорных объектов;  
 $i$  – тип опасности объекта.

$$3) \text{ Снижение техногенного воздействия на окружающую среду} = \frac{M_{(n)i} \Pi_{n-1}}{M_{(n-1)i} \Pi_n}, \quad (3)$$

где  $M_{(n)i}$ ,  $M_{(n-1)i}$  – масса загрязняющих веществ в отчетном ( $n$ ) и предшествующем ( $n-1$ ) годах;

$\Pi_n$ ,  $\Pi_{n-1}$  – объем промышленного производства в отчетном и предшествующем годах;

$i$  – тип загрязнения (выбросы вредных веществ в воздух, сбросы вредных веществ в воду, размещение переработанных отходов I-IV классов опасности).

Разумеется, мы не были столь наивны, чтобы предполагать, будто этими тремя показателями удастся описать все множество государственных функций Ростехнадзора при всем разнообразии поднадзорных отраслей. Это был первый шаг вновь созданного ведомства по оценке своей деятельности, и предложенные показатели вполне могут служить в первом приближении достижению указанной цели.

Тем не менее, очевидно, что данные показатели очень ограниченно можно использовать для оценки эффективности надзора за объектами использования атомной энергии. В [5] предложена классификация угроз, направленных на человека и окружающую среду, подвергнут анализу комплекс показателей безопасности атомных станций (АС), и было бы весьма целесообразно развить предложенные подходы для установления основных показателей эффективности атомного надзора.

### 1. Показатели активных угроз

В [5] предложено разделить все угрозы безопасности человека и окружающей среде со стороны радиационно опасного объекта на активные и потенциальные. Активные угрозы характеризуются реальным воздействием объекта на окружающую среду, они представляют реальную опасность при нормальной эксплуатации, если превышают нормативно установленные предельно допустимые концентрации вредных веществ (ПДК) и эквивалентные дозы ионизирующего облучения (ПДД). Активные угрозы могут быть охарактеризованы численно, измерены инструментально или расчетно и уменьшены до заведомо известных величин в силу детерминированности причин их возникновения (сбросы, выбросы, проникающая радиация).

Активные угрозы могут представлять не только радиоактивные, но и химические, микробиологические вещества. Для радиационных воздействий можно установить меру (масштаб, показатель) опасности:

$$\delta_a = D_p - D_n, \quad (4)$$

где  $D_p$  – величина измеренной или рассчитанной эквивалентной дозы, полученной человеком;

$D_n$  – нормативное значение ПДД, различное для персонала и населения.

То есть  $\delta_a$  – превышение реальной величины дозы в некоторой точке над его нормативным значением. Эта угроза существует независимо от того, находится или нет в данной точке человек или иные объекты флоры и фауны, а величина ее зависит от времени пребывания в этой точке.

Разумеется, указанный подход можно признать весьма приближенным. Эквивалентная доза рассчитывается через среднюю поглощенную дозу в органах человека и интегрирование по времени после поступления радиоактивных веществ в организм. Не учитываются различные влияния дозы на людей разного возраста, отсроченные эффекты вреда здоровью и т.п. Количество людей, получивших повышенную дозу, зависит не только от мероприятий администрации АС или инспекций регулирующих органов, но и от состояния энергоблока, длительности ремонтов и т.д.

Однако для оценки эффективности регулирующей деятельности в разных отраслях промышленности нужны ясные, легко рассчитываемые показатели, полученные при прочих равных условиях по единым методикам и статистическим формам. Поэтому на данном этапе предложенный масштаб представляется весьма удобным.

Таким образом, вокруг радиационно опасного объекта при его нормальной эксплуатации при  $\delta_a > 0$  существует нестационарное поле радиационных угроз, величина которого зависит от интенсивности источника излучения, координат точки, ослабляющих свойств среды и т.п. В процессе эксплуатации и персонал объекта, например, АС, и население могут попасть в это поле в течение фиксированного периода времени, скажем, года. Именно поэтому в качестве основного **показателя нарушения безопасности (степени опасности) можно предложить количество лиц  $N$ , у которых это превышение установлено**, а в качестве дополнительного – величину превышения нормативных пределов эквивалентной дозы у этих контингентов:

$$N = N_{\text{перс.}} + N_{\text{нас.}}; \quad (5)$$

$$D_{\text{нас./перс.}} = \sum_{i=1}^N (D_{pi} - D_{\text{нас./перс.}}), \quad (6)$$

где  $D_{pi}$  – величина эквивалентной дозы, полученная конкретным лицом;

$D_{\text{нас./перс.}}$  – нормативные значения ПДД для населения или персонала.

Выражения (4) и (6) надо применять отдельно для персонала и населения, так как для них установлены различные нормативные значения предельно допустимых эквивалентных доз  $D_H$ . Легко представить ситуацию, при которой персонал переоблучается, а население – нет. Но могут быть аномально высокие выбросы и сбросы, которые приведут к переоблучению населения, не затрагивая персонал. Эксплуатирующие организации постоянно ведут учет эквивалентных доз персонала. Разумеется, учет доз населения – не простая организационная задача, но технических препятствий для ее осуществления нет.

Отметим, что  $D_{\text{перс.}}$ , рассчитанное по выражению (6), отличается от показателя **уровня радиационной защиты**, который рассчитывается согласно [6], как:

$$D_{\text{урпз}} = \sum_{i=1}^M D_i \cdot \quad (7)$$

Здесь  $M$  – число контролируемых лиц, включая командированных на АС;

$D_i$  – годовая эквивалентная доза, полученная  $i$ -м лицом. То есть  $D_{\text{урпз}}$ , рассчитанный по (7), – это коллективная эквивалентная доза персонала, которая в нормальных условиях эксплуатации, усредненная на  $M$  лиц, много ниже нормативных значений дозы.

Это принципиальное отличие двух показателей, из которых  $N_{\text{перс.}}$  свидетельствует о количестве лиц, получивших **повышенные дозы** облучения величиной, рассчитываемой по (6), а коллективная доза персонала (7) – величина, удобная для расчетов медицинских последствий облучения, но не отражающая размеры реальной угрозы, так как  $M$  существенно превышает  $N_{\text{перс.}}$  и большинство контролируемых лиц получает дозы меньше, чем ПДД.

Предложенный подход к формированию показателей эффективности регулирующей деятельности может быть применен для разработки основных показателей радиационной безопасности, используемых эксплуатирующей организацией для оценки своей деятельности.

Надо сказать, что в настоящее время палитра показателей, характеризующих безопасность, стабильность работы, культуру безопасности и т.п., весьма разнообразна. Эксплуатация АС тщательно изучена, дифференцирована, каждый показатель характеризует различные ее аспекты, включая нарушения, и может быть использован при совершенствовании эксплуатации [7]. Однако создать из этих показателей некий интегральный комплекс или установить меж ними функциональную связь пока не получалось.

Предложенный показатель  $N$ , по сути, является таким показателем, который интегрирует все условия эксплуатации и ее нарушений, приводящие к активному радиационному воздействию на человека и окружающую среду. Векторы усилия эксплуатирующей организации по модернизации энергоблоков, повышению культуры безопасности, снижению радиоактивных выбросов и сбросов и т.п. совпадают с вектором усилий регулирующего органа по разработке нормативных документов, тщательной экспертизе безопасности при лицензировании, непрерывному надзору за безопасностью и т.д. Но насколько все эти усилия эффективны, в конечном счете, определяется количеством людей, получивших повышенные дозы, и, так сказать, “удаленностью” от ядерной аварии.

Вторым вопросом мы займемся далее, а по поводу (5) следует отметить, что предложенный показатель обладает разумным консерватизмом. Дело в том, что, согласно [8, 9], при однократном превышении  $D_H$  человека переводят в такие условия, чтобы в течение последующих пяти лет его средняя эквивалентная доза за этот период не превышала  $D_H$ . То есть установленные значения  $D_H$  также консервативны.

Это тонкий момент, связанный с двумя способами определения безопасности [3]. Получается так, что безопасность, определяемая как состояние защищенности человека, еще сохраняется при средней за пять лет эквивалентной дозе, меньшей  $D_H$ . А безопасность, как свойство объекта, сохраняется только тогда, когда в течение года не было превышения  $D_H$ .

Вместе с тем, можно заключить, что  $N$  вполне может служить показателем эффективности работы и органа регулирования безопасности, и эксплуатирующей организации, так как, по существу, является показателем безопасности людей, работающих на объекте использования атомной энергии и вблизи него. Если при эксплуатации любого источника ионизирующего излучения произошло событие, которое “привело к облучению людей выше установленных норм”, то согласно [8], это основной признак **радиационной аварии**. Поэтому снижение  $N$  до нуля за все время эксплуатации АС есть основная цель всех участников использования атомной энергии.

## 2. Показатели потенциальных угроз

Как известно, для оценки масштабов возможных событий, которые могут представлять угрозу для человека и окружающей среды, широко используется понятие риска. В разных отраслях промышленности, для разных последствий событий конкретные определения того, что называют риском, весьма различаются между собой. Анализ литературы свидетельствует, что события, называемые аварией, качественно различны в разных отраслях промышленности по всем существенным признакам. Понятно, что от определения того, что считать аварией, зависят статистика первичных данных по аварийности и последующие расчеты вероятностей, ущербов и рисков аварий.

Риск аварии, риск смерти, радиационный и экологический риски имеют разные определения и методы расчета. И основная причина этого разнообразия состоит в том, что различные события сопровождаются многообразными последствиями. Поэтому попытка создания единой методики расчета риска раз-

личных событий пока не привела к успеху. Например, предложенная величина  $N$  – это показатель организационного и технического несовершенства радиационной защиты. А сколько людей заболеет или, не дай Бог, умрет от радиации оценивается вероятностными методами из общего числа лиц, подвергшихся облучению. В настоящее время в разных отраслях промышленности используются различные подходы.

В процитированном выше определении радиационной аварии есть еще два признака: “могли привести к облучению” и “могли привести или привели к радиационному загрязнению окружающей среды” [8, 9]. То есть показатель (5) должен быть распространен и на возможные события, масштаб которых уже не может быть описан детерминистскими зависимостями, а характеризуется риском облучения, равным:

$$R = PY, \quad (8)$$

где  $P$  – вероятность наступления аварии;

$Y$  – величина последствий аварий, которая, в частности, может рассчитываться по (6).

В области использования атомной энергии, например, для действующих АС существует понятие предельного аварийного выброса радиоактивных веществ, превышение которого потребует эвакуации населения за пределы зоны планирования защитных мероприятий. При этом в [10] вводится вероятностный целевой показатель  $10^{-7}$  событий на реактор в год, к которому следует стремиться для исключения необходимости эвакуации населения. Таким образом, **величина последствий предельной аварии в атомной отрасли в отличие от иных отраслей как бы фиксируется, что позволяет оценивать риск тяжелой запроектной аварии по ее вероятности.**

Значит, если существуют методы расчета вероятности реализации потенциальной угрозы  $P(\tau)$ , то мерой (масштабом, показателем) потенциальной угрозы  $\delta_n$  можно считать:

$$\delta_n = -P'(\tau), \quad (9)$$

то есть изменение вероятности опасного события, аварии с течением времени,  $\tau$ . Понятно, что вероятность может являться функцией многих других параметров, и частная производная  $P'(\tau)$  берется только по времени при прочих равных условиях.

Согласно [10], под ядерной аварией понимается повреждение оборудования, содержащего ядерные материалы, твэлов, превышающее установленные пределы безопасной эксплуатации. Риск ядерной аварии оценивается в рамках вероятностного анализа безопасности (ВАБ). Далее, в основном, речь будет идти о ВАБ АС.

В соответствии с действующими рекомендациями [11] существуют два уровня ВАБ: ВАБ-1 – расчет вероятностей повреждения твэлов свыше установленных пределов, и ВАБ-2 – расчет вероятностей аварийного выброса радиоактивных веществ. На практике существует еще ВАБ-3 – расчет вероятностей сверхнормативного облучения населения.

Понятно, что все три типа ВАБ анализируют вероятность ядерной аварии, которая может произойти в результате конкретного набора исходных событий, но с разными последствиями: повреждение твэлов может не сопровождаться переоблучением персонала, а облучению персонала не обязательно сопутствует переоблучение населения. Это, повторяем, фиксированные последствия аварии, которые зависят от путей протекания, сценария аварии, ее масштабов и т.п.

Методология ВАБ позволяет получить комплексную количественную сиюминутную оценку ЯРБ одного конкретного реактора. Эта оценка используется для различных целей: анализ сбалансированности проекта; разработка мероприятий по повышению ЯРБ; оценка надежности важных для безопасности систем; их защищенности от отказов по общим причинам, в том числе от ошибок персонала; обоснования эксплуатационной документации, в том числе технологического регламента эксплуатации; разработка программ аварийного реагирования и т.п. Вот для чего пока не следует использовать ВАБ, так это для сопоставления ЯРБ разных реакторов между собой.

Разумеется, ЯРБ зависит от режима работы АС (номинальная или пониженная мощность, пуск или останов, начало или конец топливной кампании), от заполнения бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива и т.п. Хотя величина оценки ЯРБ для разных состояний и режимов эксплуатации АС будет различна, методика оценки состоит из общих этапов, которые в конечном счете можно довести до уровня ВАБ-2.

А если имеются результаты ВАБ-2, сделанные в два момента времени, например, при выдаче двух последовательных лицензий на эксплуатацию, то в качестве показателя потенциальной угрозы, которую могут представлять АС, целесообразно, используя (9), рассмотреть изменение вероятности предельного аварийного выброса от энергоблока АС, оцененное за период действия лицензии на эксплуатацию АС,  $\Delta\tau$ :

$$\Delta_n = \frac{P_{i-1} - P_i}{10^{-7} \Delta\tau}, \quad (10)$$

где  $P_i, P_{i-1}$  – значения вероятностей предельного аварийного выброса, рассчитанных в год получения новой и предыдущей лицензий на эксплуатацию, а  $10^{-7}$  – целевой показатель, установленный в [10].

К сожалению, в настоящее время ВАБ-2 проводится не для всех энергоблоков. Поэтому пока в качестве первого приближения вполне можно использовать результаты первого уровня, ВАБ-1, которые имеются для практически всех энергоблоков. Правда, объем выполненных исследований ВАБ-1 для основной части энергоблоков АС, эксплуатируемых в России, ограничивается рассмотрением только внутренних иницирующих событий при работе энергоблоков на номинальном уровне мощности. Тогда вместо (10) для оценки показателя потенциальной составляющей безопасности можно использовать выражение:

$$\Delta_n = \frac{P_{i-1} - P_i}{10^{-5} \Delta \tau}, \quad (11)$$

где  $P_i, P_{i-1}$  – значения вероятностей сверхнормативного повреждения твэлов, рассчитанных в год получения новой и предыдущей лицензий на эксплуатацию, а  $10^{-5}$  – целевой показатель вероятности сверхнормативного повреждения твэлов, также установленный в [10].

В таблице приведены полученные разработчиками точечные оценки частоты повреждения активной зоны и результаты расчета  $\Delta_n$  по (11).

#### Результаты расчета $\Delta_n$

Энергоблок АС	Основной разработчик ВАБ	Точечная оценка ЧПЗ, 1/(реактор-год), год разработки ВАБ		$\Delta_n$
Нововоронежская АС, ВВЭР-1000, энергоблок 5, проект В-187.	НТЦ ЯРБ, г. Москва	6,85Е-4, 1999 г.	4,03Е-4, 2005 г.	4,7
Кольская АС, ВВЭР-440, энергоблок 2, проект В-230,	Кольская АС	2,77Е-5, 2002 г.	2,52Е-5, 2004 г.	0,125
Нововоронежская АС, ВВЭР-440, энергоблок 3, проект В-179	ФГУП АЭП, г. Москва	1,08Е-4, 2000 г.	3,44Е-5, 2002 г.	3,68
Нововоронежская АС, ВВЭР-440, энергоблок 4, проект В-179	ФГУП АЭП, г. Москва	1,08Е-4, 2000 г.	5,12Е-5, 2002 г.	2,84
Ленинградская АС, РБМК, энергоблок 1	Ленинградская АС	2,32Е-4, 2002 г.	9,5Е-6, 2003 г.	22,3
Ленинградская АС, РБМК, энергоблок 2	Ленинградская АС	8,7Е-5, 2001 г.	8,8Е-6, 2004 г.	2,61

Отрицательные  $\Delta_n$  сигнализируют бы об ухудшении безопасности. Зато положительное значение этого показателя является однозначным свидетельством исполнения [10], по крайней мере, до тех пор, пока  $P_i$  не сравняется с  $10^{-5}$ .

Как видно из таблицы, на Ленинградской АС этот показатель уже достигнут, и мировому сообществу еще предстоит тщательно изучить проблему: понижать ли дальше целевой показатель или остановиться на достигнутом, чтобы не тратить деньги там, где отдача незначительна, установив не целевой показатель, а полноценный критерий ЯРБ. Именно на этом пути, как нам представляется, можно будет сформировать показатели как активной, так и потенциальной составляющих основных показателей безопасности.

К обоим показателям (5) и (11) можно предъявить те же претензии, что и к (1) – (3) в том, что они характеризуют работу эксплуатирующей организации в той же степени, что и регулирующего органа. И в этом нет ничего плохого. История развития методов ВАБ в России свидетельствует, что важность вероятностных подходов осознавалась обеими сторонами, необходимость проведения ВАБ-1 зафиксирована в документах, согласованных концерном «Росэнергоатом» и Росатомом. Показатель (11) был бы особенно эффективен, если бы на наших АС был разработан так называемый «живой» ВАБ, позволяющий в реальном времени оценивать вероятность плавления активной зоны в зависимости от текущих действий эксплуатирующей организации по ремонтам, модернизациям, совершенствованию регламентов и т.п. Надеемся, что это и будет введено на российских АС в недалеком будущем.

Мы вполне отдаем себе отчет, что предложенный в [5] подход, по сути дела, претендует на смену парадигмы в оценках ЯРБ. Разграничив угрозы на активные и потенциальные, этот подход содержит два показателя, один из которых (5) позволяет оценить активную составляющую безопасности, а другой (11) – потенциальную. При отсутствии людей, подвергшихся сверхнормативному радиационному воздействию, вполне можно говорить об исключении активных угроз. А при положительной величине  $\Delta_n$  можно обоснованно утверждать, что защита от потенциальных угроз выполнена и объект находится в состоянии, «при котором отсутствует недопустимый риск», как того требует [12].

Предложенная система показателей (5) и (11) может быть отнесена к числу основных, по которым оценивается эффективность регулирования безопасности, а также сама ЯРБ энергоблока АС. В то же время показатели (1) – (3) не теряют своего значения и могут использоваться в качестве дополнительных. Такое предложение позволяет обеспечить преемственность подхода к оценке эффективности регулирования безопасности и сделать шаг к введению, наряду с целевыми вероятностными показателями, вероятностных критериев оценки безопасности АС. А впоследствии, после всестороннего обсуждения ввести эти критерии в отечественные нормативные документы.

## Литература

1. Постановление Правительства РФ от 22 мая 2004 г. № 249 “О мерах по повышению результативности бюджетных расходов” (с изменениями от 23 декабря 2004 г.).
2. IAEA Document PDRP-4, “Assessment of Regulatory Effectiveness”.
3. NEA (2004) “Direct Indicators of Nuclear Regulatory Effectiveness”. Pilot Project Results, NEA No.3669, OECD 2004 г.
4. Доклад о результатах и основных направлениях деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. М., 2004 г.
5. Малышев А.Б., Гордон Б.Г. Анализ оценок безопасности атомных станций//Вестник концерна “Росэнергоатом”. - 2005. - № 10.
6. Положение о годовых отчетах по оценке состояния безопасности при эксплуатации энергоблоков АЭС. Концерн “Росэнергоатом”. РД ЭО 0143-99. М., 1999 г.
7. Показатели эксплуатационной безопасности АС. IAEA-TECDOC-1141. МАГАТЭ, 2000.
8. Федеральный закон “О радиационной безопасности населения”. 1995 г.
9. Нормы радиационной безопасности. НРБ-99.
10. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88/97).
11. Основные рекомендации по выполнению вероятностного анализа безопасности атомных станций. РБ-032-04.
12. Федеральный закон “О техническом регулировании”. № 184-ФЗ. 2002 г.