

- ру. — Проблемы анализа риска, 2018, т. 15, № 5, с. 26—37.
4. **Радиационная** обстановка на территории России и сопредельных государств в 2014, 2015, 2016, 2017 гг. Ежегодник НПО «Тайфун». Обнинск, 2015. — 350 с., 2016. — 344 с., 2017. — 398 с., 2018. — 360 с.
 5. **Отчет** по экологической безопасности за 2014 год. Росатом, Филиал АО «Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова», 2015. 26 с.
 6. **Гусев Н.Г., Беляев В.А.** Радиоактивные выбросы в биосфере. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
 7. **Gifford F.** Atmospheric dispersion calculations using the generalized Gaussian plume model. — Nucl. Saf., 1960, v. 2, p. 56.
 8. **Бызова Н.Л., Гарнер Е.К., Иванов В.Н.** Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчет распространения примеси. Л.: Гидрометеоздат, 1991.
 9. **Арутюнян Р.В., Припачкин Д.А., Семенов В.Н. и др.** Описание системы прогнозирования аварийного распространения радионуклидов в атмосфере для действующих российских АЭС (ПАРАД). Технология и функционирование: Препринт IBRAE—2016-02. 42 с.

Поступила в Редакцию 6.02.20

УДК 621.039.003,621.039.009

ВОЗМОЖНОСТЬ РЕЗЕРВИРОВАНИЯ КАПИТАЛА НА ПОКРЫТИЕ РИСКА АВАРИЙ В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ ПРИ РАЗВИТИИ АСММ

*Журавлев И.Б. (Отраслевой центр аналитических исследований и разработок,
Частное учреждение «Наука и инновации», г. Москва)
e-mail: ibozhuravlev@rosatom.ru*

Целью настоящей статьи является проверка гипотезы о реальной ответственности оператора АЭС за последствия тяжелой аварии в случае развития атомных станций малой мощности (АСММ) с предварительным обоснованием экономического ущерба.

Произошедшие тяжелые аварии на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима» (Япония) привели к значительному экономическому ущербу. В статье оценивается ущерб от гипотетической тяжелой аварии на АЭС для заданного уровня доверия. Сделать это на основе только фактических данных об ущербе аварий не представляется возможным по трем причинам: малость выборки таких данных, оценка экономического ущерба от аварии на АЭС «Фукусима-1» постоянно уточняется, в силу самой природы сложных систем невозможно сделать вывод о масштабе катастрофических событий в таких системах на основе исторических данных. Для количественной оценки последствий событий, т.е. риска, происходящих в сложных системах, оказывается плодотворным применение теории экстремальных значений (EVT). Как теоретически показано, ущерб от гипотетической аварии на АЭС, оцененный с применением подхода на основе EVT, в 1000 раз превышает принятые в настоящее время лимиты страхования гражданской ответственности операторов АЭС за ущерб от ядерной аварии, что не позволяет говорить о

реальном страховании гражданской ответственности оператора АЭС. Нелинейный характер снижения ущерба от возможных аварий при переходе к меньшей единичной установленной мощности энергоблока (модуля) позволяет обеспечить реальную ответственность оператора АЭС за ущерб вследствие ядерной аварии.

Для сложных систем, к которым, безусловно, относятся АЭС, включая человекомашинный интерфейс, характерно поведение, обладающее свойствами динамического хаоса — ограниченностью предсказуемости неким горизонтом прогноза, за пределами которого состояние системы перестает однозначно определяться начальными условиями. Функция распределения последствий событий в таких системах описывается степенным законом, при котором для плотности вероятности справедливо соотношение

$$p(x) \sim x^{-(1+\gamma)}. \quad (1)$$

Распределение, описываемое степенным законом, называют также распределением с «тяжелым хвостом». Данное свойство оказывает решающее влияние на возможность оценки моментов распределения, характеризующих случайную величину:

$$M_k = \int x^k p(x) dx. \quad (2)$$

Скомбинировав формулы (1), (2), можно установить, что при $\gamma < 2$ становится расходящимся интеграл, соответствующий моменту при $k = 2$, т.е. дисперсия, при $\gamma < 1$ расходящимся становится уже математическое ожидание ($k = 1$).

Практическим следствием расходимости моментов случайной величины является неинформативность оценок ущерба от реализации риска на основе исторических данных, или, иначе говоря, склонность систем, в которых реализуется степенной закон распределения, к событиям, приводящим к неожиданно высокому ущербу. Такие события обычно называют катастрофами. Примером могут служить приведенные в табл. 1 данные об убытках от страхования ущерба от землетрясений в Калифорнии: основываясь на статистике 1971—1993 гг., для 1994 г. можно предполагать какое угодно значение, но вряд ли то, которое имело место в действительности.

Таблица 1. Убытки от страхования ущерба от землетрясений в Калифорнии, млн дол.

| Год | Убыток | Год | Убыток | Год | Убыток |
|------|--------|------|--------|------|--------|
| 1971 | 17,4 | 1979 | 2,2 | 1987 | 22,8 |
| 1972 | 0 | 1980 | 9,2 | 1988 | 11,5 |
| 1973 | 0,6 | 1981 | 0,9 | 1989 | 129,8 |
| 1974 | 3,4 | 1982 | 0 | 1990 | 47 |
| 1975 | 0 | 1983 | 2,9 | 1991 | 17,2 |
| 1976 | 0 | 1984 | 5 | 1992 | 12,8 |
| 1977 | 0,7 | 1985 | 1,3 | 1993 | 3,2 |
| 1978 | 1,5 | 1986 | 9,3 | 1994 | 2272,7 |

Поскольку предсказание ущерба на основании исторических данных невозможно, для оценки риска следует обратиться к теории. Наиболее важным практическим выводом подхода на основе EVT является теорема [1], согласно которой условное распределение превышения ущербом некоторого предела u описывается обобщенным распределением Парето (GPD):

$$G(x) = 1 - (n_u/n)[1 + \xi(x - u)/\beta]^{-1/\xi}$$

с параметрами ξ , β ; n_u — число превышений порога u ; n — общее число данных в выборке.

Подходящей мерой риска в данном случае является математическое ожидание ущерба ES,

превышающего некоторый уровень. Выражение для ES для заданного уровня доверия α в модели GPD с порогом u и параметрами ξ и β имеет вид

$$ES_\alpha(u) = \frac{VaR_\alpha}{1 - \xi} + \frac{\beta + \xi u}{1 - \xi},$$

если $VaR_\alpha > u$, $\xi < 1$, где VaR — широко используемая в риск-менеджменте мера риска:

$$VaR_\alpha(X) = \inf \{x : P(X) \geq \alpha\}.$$

В модели GPD можно получить следующую формулу для определения меры риска VaR:

$$VaR_\alpha(x) = u + \frac{\beta}{\xi} \left\{ \left[\frac{n}{n_u} (1 - \alpha) \right]^{-\xi} - 1 \right\}.$$

Мера риска VaR, оценивая нижнюю границу потерь в хвосте распределения, преуменьшает оценку уровня риска. Названного недостатка лишена мера риска ES, которая оценивает возможный размер потерь, превышающих выбранный уровень. Наиболее устойчивый результат дает использование вместо математического ожидания медианы превышений порогового значения:

$$ES_\alpha(u) = q + \frac{\beta + \xi(q - u)}{\xi} [2^\xi - 1],$$

где

$$q = \frac{\beta}{\xi} [(1 - \alpha)^{-\xi} - 1].$$

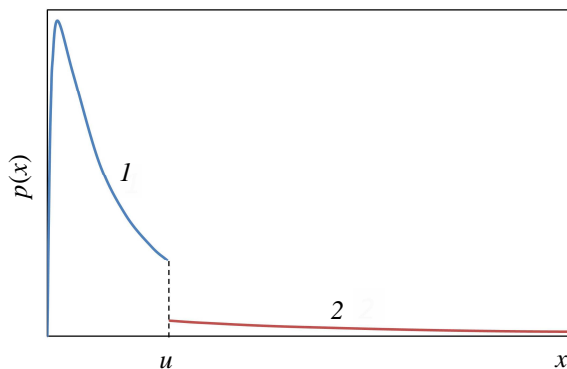
Описанный подход требует оценки параметров распределения ущерба ξ и β , а также порогового значения u . Неустойчивость получаемых оценок затрудняет оценку перечисленных параметров по относительно небольшой выборке. При байесовском подходе параметры распределения ущерба рассматриваются как некоторые случайные переменные, имеющие апостериорную плотность вероятности $p(\theta|\mathbf{X})$, где θ — вектор параметров распределения. Согласно теореме Байеса апостериорное распределение параметров модели определяется с точностью до константы как произведение некоторого априорного распределения (гипотезы) и правдоподобия, определяемого по имеющимся данным традиционным способом. Поскольку аналитическое описание искомого распределения не представляется возможным, интегрирование по

нему проводится методом Монте-Карло по достаточно большой выборке, для построения которой был реализован алгоритм семплинга с помощью метода Метрополиса—Гастингса [2, 3].

Следующим шагом является нахождение порогового значения, которое должно, с одной стороны, быть достаточно высоким для обеспечения применимости методов EVT, с другой, чем выше пороговое значение, тем меньше точек остается в хвосте распределения ущерба и тем сложнее обеспечить устойчивость оценки параметров GPD. Для решения этой проблемы с применением байесовского подхода требуется рассмотрение всего массива операционных потерь со спецификацией тела распределения на основе логарифмически нормального закона, данных, лежащих выше порогового значения тяжести операционных потерь, — на основе GPD (рис. 1). Вектор параметров модели, подлежащих определению, в окончательном виде содержит, помимо параметров GPD, параметры распределения тела операционных потерь и пороговое значение.

Рассмотренный подход был применен для оценки капитала под операционным риском крупного российского банка [2]. Данный подход также применялся для оценки рыночного риска и был развит для учета экспертных оценок наряду с данными об операционных потерях [3, 4].

В отличие от оценки ущерба от операционных потерь в банке точная оценка ущерба от значительной аварии на АЭС зачастую требует длительного времени. Аварии на АЭС происходят не так часто и в разных экономиках. Тем не



Р и с. 1. Плотность вероятности распределения ущерба: 1 — логарифмически нормальный закон распределения; 2 — обобщенное распределение Парето (u — пороговое значение)

менее ущерб от аварий и инцидентов в ядерной энергетике можно выразить в денежном выражении [5]. Устойчивые оценки меры ожидаемого ущерба ES с использованием описанного подхода и массива потерь от аварий на АЭС, содержащего 19 наиболее крупных событий, составляют при параметре $\xi = 1,7$, пороговом значении $u = 4,9$ млрд дол., уровне доверия 90, 95, 99% 97, 330, 5100 млрд дол. соответственно.

Исходя из оценки ущерба для уровня доверия 95% 330 млрд дол. и принимая частоту тяжелой аварии на АЭС 1 раз в 25 лет (интервал времени между авариями на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима»), можно оценить размер необходимых ежегодных отчислений каждого энергоблока в 40 млн дол. без учета дисконтирования, что на 50% превышает ежегодные затраты на ядерное топливо для перегрузки реактора установленной электрической мощностью 1 ГВт (при текущих котировках на товары и услуги ЯТЦ). С учетом дисконтирования на 25 лет при ставке 4,5% эта сумма уменьшается в 1,8 раза и становится сравнимой с размером ежегодных затрат на топливо для реактора установленной мощностью 1 ГВт. В настоящее время в мире имеют статус действующих около 400 энергоблоков.

Помимо резерва (финансовой гарантии), для обеспечения ответственности оператора АЭС может применяться страхование. Страхование ядерных рисков, в том числе гражданской ответственности позволяет значительно снизить размеры платежей оператора АЭС до размера страховой премии. Венская конвенция 1963 г. устанавливает минимальную сумму лимита ответственности по страхованию гражданской ответственности операторов ядерных установок в размере 5 млн дол. по золотому паритету на 29 апреля 1963 г. (35 дол. за одну тройскую унцию), что в настоящее время составляет около 215 млн дол. В странах-членах Венской конвенции 1963 г. максимальный размер ответственности операторов АЭС устанавливается немногим выше указанной величины. Так, в Словакии в соответствии с Законом о гражданской ответственности за ядерный ущерб и ее финансовом обеспечении, вступившим в силу 1 января 2016 г., максимальный размер ответственности эксплуатирующей организации за ядерный ущерб от энергетических реакторов составляет 300 млн евро, что в 100—1000 раз

ниже максимально возможного ущерба от тяжелой аварии на АЭС. Необходимость покрытия диапазона потенциального ущерба в 100—1000 раз обуславливает разработку и внедрение проектных средств смягчения последствий тяжелых аварий:

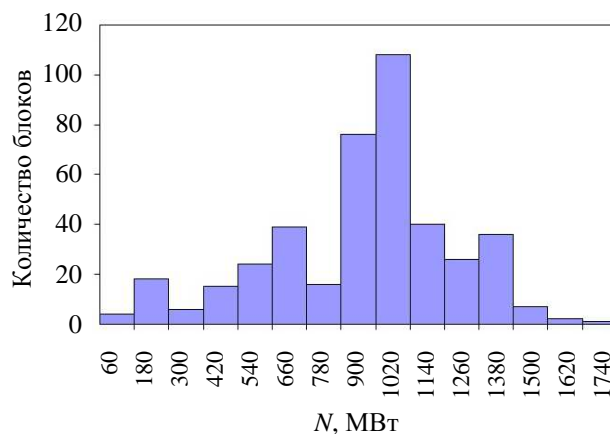
стратегий удержания расплава активной зоны внутри корпуса реактора или в ловушке расплава для тех проектов АЭС, где удержание расплава внутри корпуса не представляется возможным;

рекомбинаторов водорода для предотвращения нарушения целостности защитной оболочки — последнего физического барьера на пути распространения радионуклидов в окружающую среду.

Парижская конвенция 2004 г. устанавливает минимум лимита ответственности оператора АЭС в 700 млн дол., что также представляется недостаточным с учетом приведенных оценок. Емкость ядерных страховых пулов предполагается довести до 1,5 трлн дол. Это, например, более чем в 25 раз превышает совокупный объем средств Резервного фонда и Фонда национального благосостояния РФ (около 59 млрд дол. на 1 апреля 2019 г.). Если будет создан всемирный пул, исходя из оценки частоты тяжелой аварии на АЭС 1 раз в 25 лет, для аккумуляции необходимых 1,5 трлн дол. на каждый энергоблок потребуется ежегодно отчислять около 150 млн дол., что в 6 раз превышает ежегодные затраты на топливо для реактора установленной электрической мощностью 1 ГВт. С учетом дисконтирования на 25 лет при ставке 4,5% эта сумма уменьшается в 1,8 раза, т.е. до 84 млн дол. в год (340% ежегодных затрат на топливо для реактора установленной мощностью 1 ГВт). Поскольку вклад топливных затрат в средневзвешенную стоимость производимой на АЭС электроэнергии составляет около 8%, это означало бы почти двукратный рост ее себестоимости — и это при и без того непростой текущей ситуации с экономической эффективностью ядерной энергетики в условиях конкуренции с дешевеющими и зачастую субсидируемыми возобновляемыми источниками энергии и дешевой углеводородной генерацией. Отсюда следует отсутствие экономически приемлемого способа резервирования средств на ликвидацию последствий гипотетических аварий.

Добавление ущербов от мелких событий, регистрируемых на АЭС, не меняет оценку риска, поскольку такие события влияют на «тело» распределения ущерба, хвост распределения, по которому оценивается риск, все равно калибруется по крупным событиям масштаба аварии на АЭС «Фукусима» и Чернобыльской АЭС. Подход к оценке риска, основанный на комбинации собственных и внешних потерь с использованием масштабирующих множителей, отражающих выручку или иные финансовые показатели, применяется в банках, в том числе для стресстестов. В современной ядерной энергетике ощутимого эффекта масштаба нет — электрическая мощность 90% эксплуатируемых энергетических реакторов составляет не ниже 500 МВт с максимальной плотностью распределения около 1000 МВт, что позволяет говорить о различии в установленной электрической мощности энергоблоков всего в 2, максимум — в 3 раза (рис. 2). Эти соображения приводят к выводу о неэффективности подхода, основанного на резервировании капитала, в современной ядерной энергетике и приоритетности недопущения аварий на проектном уровне.

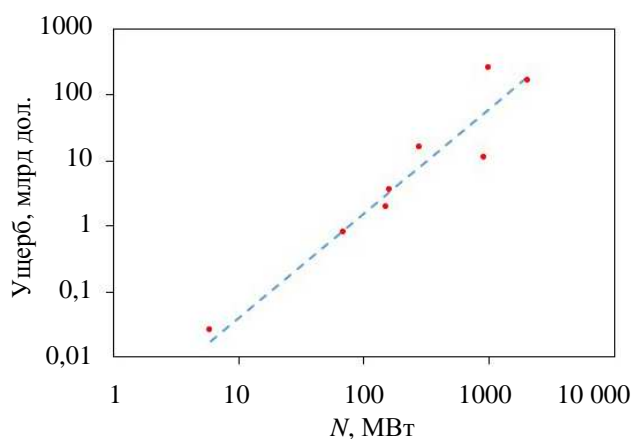
Если перейти к ядерной энергетике, основанной на АСММ, то можно ожидать нелинейного снижения ущерба от гипотетической аварии при снижении установленной мощности модуля. С использованием приведенных в табл. 2 данных построена эмпирическая регрессионная зависимость ущерба от тяжелых аварий в зависимости от установленной мощности реактора с показателем качества регрессии 99,2%, которая выражается степенным законом с показателем 1,6 (рис. 3). На снижение риска в



Р и с. 2. Распределение эксплуатируемых на АЭС реакторов по установленной мощности

Таблица 2. Аварии на АЭС, сопровождавшиеся наибольшим ущербом для заданной мощности

| Дата | АЭС | Ущерб, млн дол. (2013) | Электрическая мощность, МВт | Уровень по шкале INES |
|-----------|-----------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| 26.4.1986 | Чернобыльская АЭС | 259 336 | 1000 | 7 |
| 11.3.2011 | АЭС «Фукусима» (Япония) | 166 089 | 2028 | 7 |
| 8.12.1995 | Реактор «Мондзю» (Япония) | 15 500 | 280 | — |
| 28.3.1979 | АЭС «Три-Майл-Айленд» (США) | 10 910 | 906 | 5 |
| 1.1.1977 | Белоярская АЭС | 3500 | 160 | 5 |
| 22.2.1977 | АЭС «Богуннице» (ЧССР) | 1964,5 | 150 | 4 |
| 5.10.1966 | Реактор «Ферми-1» (США) | 793,9 | 69 | 4 |
| 21.1.1969 | Реактор «Люсен» (Швейцария) | 25,7 | 6 | 5 |



Р и с. 3. Зависимость максимального ущерба от аварии на АЭС от установленной мощности реакторов

1000 раз при уменьшении установленной мощности энергоблока в 10 раз с показателем степени, равным 3, указано в работе [6].

Отчисления в ядерный пул одного энергоблока мощностью 100 МВт при показателе степенной зависимости ущерба от аварии от установленной мощности 1,6, при той же общей установленной мощности АЭС и той же частоте крупных аварий можно оценить 13% предполагаемого размера ежегодных топливных затрат реактора соответствующей мощности (или менее 10% с учетом дисконтирования), что делает резервирование капитала на покрытие риска аварий в ядерной энергетике реальным. Неиз-

менность частоты тяжелых аварий при увеличении числа блоков меньшей мощности предполагает, что безопасность АЭС малой мощности повышается за счет снижения вероятности возникновения тяжелой аварии вследствие масштабного фактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Balkema A., Haan L.** Residual life time at great age. — *Ann. Probability*, 1974, № 2, p. 792—804.
2. **Журавлев И.Б.** Байесовский анализ операционных потерь с выбором порогового значения для оценки капитала под операционным риском. — *Управление финансовыми рисками*, 2008, № 3(15), с. 244—253.
3. **Журавлев И.Б.** Теория экстремальных значений и байесовский анализ в оценивании уровня рыночного риска. — Там же, 2011, № 4(28), с. 284—293.
4. **Журавлев И.Б.** Использование байесовского подхода для количественного измерения операционного риска с включением экспертных оценок. — *Банковские технологии*, 2011, № 2, с. 44—48.
5. **Wheatley S., Sovacool B., Sornette D.** Of Disasters and Dragon Kings; a Statistical Analysis of Nuclear Power Incidents & Accidents. <https://arxiv.org/abs/1504.02380v1> (дата обращения 25.11.2019).
6. **Sadao Hattory.** Energy source for the human demand. — In: *Advanced Nuclear Systems Consuming Excess Plutonium*. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1997, p. 69—77.

Поступила в Редакцию 28.11.19