

СРАВНЕНИЕ АВАРИЙНЫХ РИСКОВ В РАЗНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ НАСКОЛЬКО ОНИ ПРИЕМЛЕМЫ?

ШТЕФАН ХИРШБЕРГ И АНДЖЕЙ СТРУПЧЕВСКИ

Несмотря на то что электричество очень нужно для нашей жизни, его использование не “свободно от рисков”. Ни одна технология в области производства электричества не смогла достичь цели их полного устранения.

Из всех общественно значимых рисков, связанных с энергетическими системами, риски, обусловленные потенциальными авариями, составляют всего лишь незначительную часть. Но даже при таком положении основное внимание общественности зачастую направляется на аварийные риски. Вполне очевидно, что разработка конкретных энергетических систем будет заторможена или полностью прекращена, если сопутствующие им риски окажутся неприемлемыми для общества.

Вопрос о том, что такое приемлемый или неприемлемый риск, имеет много аспектов. Ответы на него зависят не только от объективной оценки частоты и последствий аварий аналитиками в области энергетики, но также и от восприятия рисков общественностью. Такое восприятие может основываться на стремлении общественности предупредить крупные катастрофы, определенные заболевания, такие как рак или наследственные болезни, а также нанесение ущерба окружающей среде.

Общественное мнение, безусловно, оказывает влияние на лиц, ответственных за разработку политики в области энергии, однако основой принятия информированных решений при выборе энергетических вариантов должны оставаться объективные научные оценки. Значительные

объемы работ в этой области уже выполняются в международном масштабе. Посредством своих программ по безопасности МАГАТЭ уделяет большое внимание проблеме объективной и документально обоснованной оценки аварийных рисков.

В течение ряда лет сотрудничество экспертов позволяло сформулировать необходимые и желательные условия для сравнения аварийных рисков от различных энергетических систем. Поскольку результаты сравнительной оценки рисков обычно представляются в поддержку новых мер по развитию энергетических систем при принятии соответствующих решений, используемые в анализах данные должны быть совместимы с реальными техническими параметрами безопасности рассматриваемых электростанций. Охвату подлежат все звенья энергетических цепочек, даже если некоторые из них находятся за пределами национальных или региональных границ. Такая ситуация может иметь место в случаях, связанных с добычей и транспортировкой угля, нефти или урана.

Далее, показатели тяжести аварии должны охватывать целый спектр последствий, хотя обусловленные ею летальные исходы оказывают наибольшее влияние как на связанные с ней издержки, так и на общественное восприятие. Данные, используемые при оценке опасностей аварии, должны корректироваться в соответствии с новыми данными и с учетом достижений техники, однако при этом не следует слишком полагаться на ожидаемые технологические усовер-

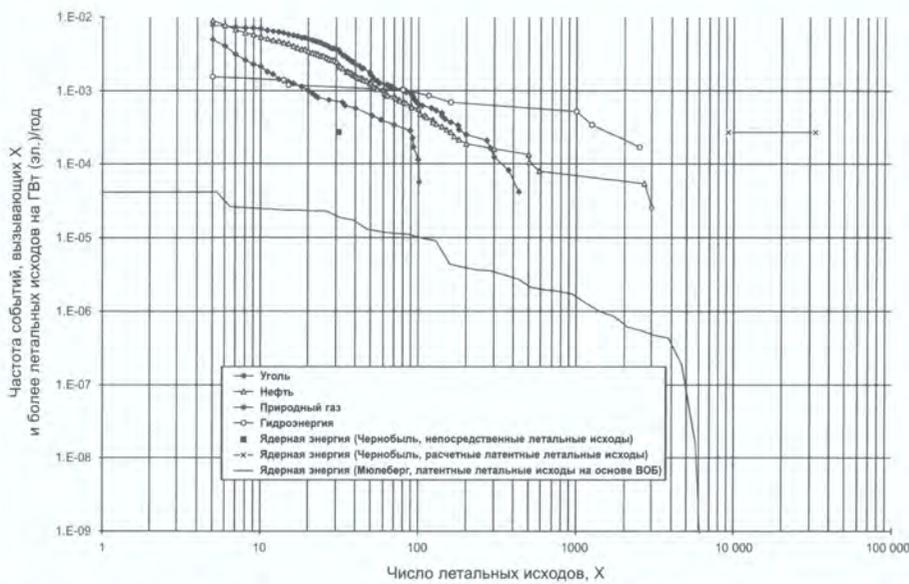
шенствования, реализация и внедрение на рынке которых могут потребовать много времени.

Отвечающее этим требованиям исследование было предпринято Институтом Пауля Шеррера (ИПШ) в Швейцарии. Это исследование продолжалось свыше пяти лет с использованием самой крупной базы данных, когда-либо собранных по авариям во всех отраслях электроэнергетической промышленности; результаты исследования были опубликованы в конце 1998 г. В отличие от многих предпринимавшихся ранее попыток в области оценки аварийных рисков в исследовании ИПШ “Тяжелые аварии в энергетическом секторе”, изданном в ноябре 1998 г., оценке подверглись разнообразные факторы.

В данном исследовании были учтены аварийные риски в течение полного срока службы каждой энергетической системы. Далее, оно содержало отдельные данные по развитым и менее развитым странам; в нем рассматривалась локализация аварийных рисков в свете их распределения по разным странам на протяжении срока службы энергетических систем. Оценки рисков проводились на основе реалистических технологических данных по каждой энергетической системе. В данной статье даются ссылки на результаты исследования ИПШ, поскольку они, по нашему мнению, представляют собой попыт-

Г-н Хиршберг — сотрудник Института Пауля Шеррера в Швейцарии; г-н Струпчевски — сотрудник Отдела безопасности ядерных установок МАГАТЭ.

ЧАСТОТА ВЫЗЫВАЮЩИХ ЛЕТАЛЬНЫЕ ИСХОДЫ СОБЫТИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЦЕПОЧКАХ



Кривые для цепочек угля, нефти, природного газа и гидроэнергии построены на основе исторических данных по авариям в мире с 1969 по 1996 г. и показывают число непосредственных летальных исходов. Для ядерной энергии число непосредственных летальных исходов представлено одной точкой (Чернобыль), а данные по отложенным летальным исходам, обусловленным этой аварией, — рядом значений. Результаты по атомной электростанции Мюлеберг в Швейцарии получены на основе проведенной конкретно для этой станции ВОБ и отражают латентные летальные исходы.

ку наиболее всеобъемлющего углубленного сравнительного анализа аварийных рисков, связанных с энергетическими системами.

Получен большой объем данных по аварийным рискам в ядерной промышленности. Они были взяты из программ обследования отдельных электростанций, осуществляемых в ядерной промышленности Соединенных Штатов, и вероятностных оценок безопасности (ВОБ), проводимых во многих странах при поддержке Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) и МАГАТЭ.

Эти данные вместе с данными по повседневному «нормальным» аварийным рискам в различных энергетических системах, опубликованными в 1995 г. в проекте ExternE Европейской комиссии, позволяют проводить сравнительные анализы различных общественно значимых аварийных рисков в области производства электричества.

ТРЕБОВАНИЯ К ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Первые требования к безопасности были сформулированы на начальной стадии строительства атомных электростанций. Их цель заключалась в минимизации рисков в области производства ядерной энергии. За истекшие четыре десятилетия был сформулирован и отработан ряд важных принципов ядерной безопасности.

МАГАТЭ поддерживает усилия по внедрению всех принципов ядерной безопасности на новых и действующих атомных электростанциях, включая и те из них, оригинальные конструкции которых не отвечают современным требованиям безопасности. Модификация элементов реакторной безопасности осуществляется во многих странах в соответствии с критериями безопасности, установленными Международной консультативной группой по ядерной безопасно-

сти (ИНСАГ) — консультативным органом при Генеральном директоре МАГАТЭ*.

В ряде стран разработаны подходы и определены критерии рисков для гипотетических аварий на АЭС с повреждением активной зоны реактора.

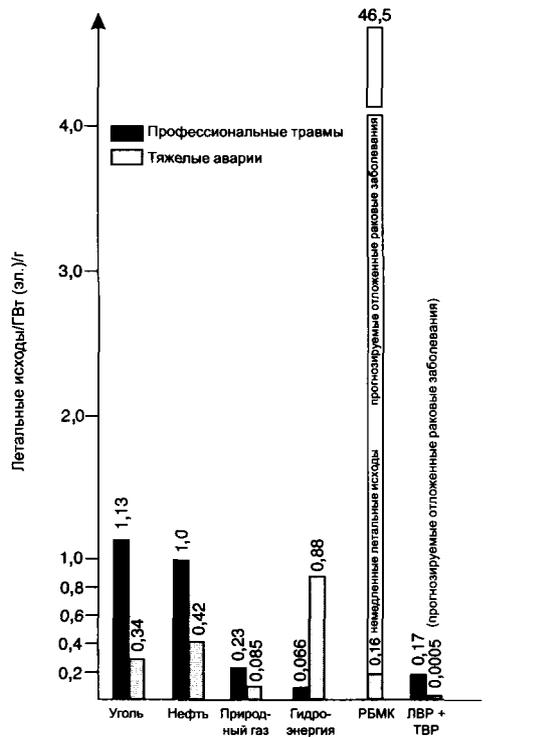
Подход к аварийным рискам в США был сформулирован в 1983 г. в заявлении о политике Комиссии по ядерному регулированию. В соответствии с ним число обусловленных ядерной энергией рисков с преждевременным летальным исходом для отдельного человека из состава критической группы населения в непосредственной близости от атомной электростанции (одна миля) должно быть ограничено 0,1% общей суммы рисков быстрого летального исхода, обусловленных другими авариями, а риск заболевания раком для отдельного человека из состава населения, проживающего вблизи атомной электростанции (десять миль), должен быть сведен до 0,1% общей суммы рисков раковых заболеваний по всем другим причинам.

Подходы к определению критериев рисков отличаются друг от друга в разных странах. В Соединенном Королевстве, например, в основу такого определения положена доза, которая получена человеком, остающимся после аварии на границе площадки.

* В 1988 г. ИНСАГ установила в качестве критерия безопасности сокращение частоты повреждения активной зоны реактора (CDF) до значений ниже 10^{-4} за реакторо-год. Она заявила также, что реализация всех принципов безопасности на будущих электростанциях должна привести к CDF менее 10^{-6} за реакторо-год, а вероятность крупных выбросов вне площадки должна быть ниже по меньшей мере в десять раз. Эти рекомендации были приобщены в качестве приложения к Основам безопасности МАГАТЭ и находят отражение в регулирующих правилах государств — членов МАГАТЭ.

СРАВНЕНИЕ АВАРИЙНЫХ РИСКОВ, СВЯЗАННЫХ С РАЗЛИЧНЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЦЕПОЧКАМИ

Источники: European Commission ExternE Project, Исследование ИГШ, Швейцария; МАГАТЭ.



Примечания: Схема отражает исторический опыт. Данные по профессиональным травмам — по Европейскому союзу. Данные по тяжелым авариям — усредненные применительно ко всему миру.

Для такого человека риск, выраженный отношением 1:100 000 в год, определен в качестве только допустимого, а риск с отношением один на миллион в год — в качестве в общем приемлемого.

В настоящее время в регулирующих правилах различных стран просматривается очевидная тенденция к сокращению частоты аварий с повреждением активной зоны реактора и крупными допустимыми выбросами. Приемлемая частота крупных радиологических выбросов для новых атомных электростанций намного ниже по сравнению с действующими станциями и составляет обычно менее одного на миллион.

Например, в Финляндии в соответствии с регулирующими правилами, вступившими в силу в 1997 г., анализ ВОБ, подготовленный для лицензирования атомной электростанции, должен

показать частоту крупных выбросов менее одного на два миллиона в один реакторо-год.

НЕЯДЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Аварийные риски в электропроизводящих системах, использующих неядерные источники энергии, проявляются на различных этапах. Эти этапы включают, например, добычу угля, перевозку угля или нефти, хранение газа или эксплуатации плотин. В большинстве стран применяется детерминированный подход к предотвращению аварий, предполагающий, что при соблюдении регулирующих правил электростанция "безопасна".

Лишь немногие страны квантифицировали риски и установили численное выражение целей безопасности. В Европейском союзе регулирование основных промышленных рисков на стационарных установках

является предметом директив Севесо 1982 и 1996 гг. Директива 1996 г. охватывает многие элементы, давно считающиеся стандартными в области ядерной безопасности, такие как уведомление регулирующих органов по вопросам ядерной безопасности о существовании установок, создающих потенциальные опасности, подготовка отчетов по безопасности и аварийных планов, модификация установок, планирование землепользования, представление информации после тяжелой аварии.

В большинстве стран ОЭСР регулирующие правила все еще носят детерминистский, а не вероятностный характер. Заявка на строительство новой установки должна сопровождаться техническим обоснованием безопасности с указанием рисков, перечнем мер по снижению вероятности и последствий аварии, а также сообщением информации, необходимой государственным органам для подготовки аварийных планов.

В Германии заявка на лицензию должна сопровождаться анализом безопасности, который должен подтвердить адекватность мер безопасности для предотвращения цепи событий, могущих привести к опасному инциденту. При оценке последствий требуется рассматривать лишь то, что достоверно известно, не беря в расчет наихудший сценарий, если принятые организационные и технические меры считаются достаточными для предотвращения реализации таких сценариев. Концепция приемлемого риска формально не признается, хотя экспертные органы, проводящие оценки анализов безопасности, имеют свои собственные руководящие принципы, включая возможную шкалу повреждений и их вероятность.

В Соединенном Королевстве и Нидерландах цели безопасности выражаются в форме количественных показателей, и оценки рисков должны продемонстрировать их соблюдение. Оценка анализов безопасности в Соединенном Королевстве осуще-

ствляется Управлением по здравоохранению и безопасности, использующим концепцию допустимого риска. Максимальный допустимый риск от действующей крупномасштабной промышленной установки для любого лица из состава населения равняется 10^{-5} в год. При планировании землепользования вблизи основных опасных установок риск в 10^{-6} в год рассматривается в качестве нижнего предела, ниже которого они считаются пренебрежимо малыми; риски выше 10^{-5} в год считаются недопустимыми. В области рисков между двумя указанными значениями следует руководствоваться проведенными оценками, а риски должны быть сведены до разумно достижимого на практике низкого уровня (принцип ALARP).

В соответствии с принятым в Соединенном Королевстве подходом самый низкий предел в общем приемлемом диапазоне установлен в точке, в которой риск становится действительно пренебрежимо малым по сравнению с другими рисками, которым подвергается отдельный человек. По мере развития технологии становятся разумно осуществимыми новые меры, и заложенные в принципе ALARP требования снижают пределы допустимых рисков с целью приведения их в соответствие с современными знаниями и технологией. То, что считается приемлемым для действующих в настоящее время электростанций, может оказаться неприемлемым для новых станций.

В Нидерландах оператор каждой отдельной опасной промышленной установки должен готовить отчеты по безопасности, касающиеся потенциальных рисков на площадке и вне ее пределов. Максимально допустимый риск для отдельного лица вне площадки для существующих в настоящее время условий составляет 10^{-5} в год, а для новых ситуаций — 10^{-6} в год. Риск для общества считается приемлемым, если частота аварий, влекущих 10,

100 и 1000 летальных исходов, не превышает 10^{-5} , 10^{-7} и 10^{-9} в год, соответственно. Однако возможны и встречаются на практике исключения из данного правила, когда этого требует ситуация, например в районе вокруг гавани в Роттердаме или в аэропорту Схифол, где приемлемые риски превышают предельные величины, содержащиеся в регулирующих правилах.

ОЦЕНКА АВАРИЙНЫХ РИСКОВ

В основе сравнительного анализа тяжелых аварий могут лежать исторические свидетельства, ВОБ или сочетание того и другого.

Результатом большой работы, проделанной ИПШ в Швейцарии, стало создание базы данных по тяжелым авариям, связанным с энергетикой (ENSAD). Она включает данные не только по летальным исходам, но также и по травмированным, эвакуированным, по выбросам загрязнителей, загрязненным районам и экономическим потерям, обусловленным тяжелыми авариями в энергетических системах. В соответствии с определением, принятым в ENSAD, тяжелая авария представляет собой событие, влекущее одно или более из приведенных ниже последствий: по меньшей мере пять летальных исходов, по меньшей мере 10 травмированных, по меньшей мере 200 эвакуированных, 10 тыс. т углеродных выбросов, более 25 км² вынужденной очистки почвы или воды и более 5 млн. долл. США экономических потерь.

Обзор аварийных рисков в различных регионах мира и учет технологических достижений привели к образованию функций этих факторов из аварийных показателей. Особенно поразительными оказались результаты в отношении гидроэлектростанций. Показатели по различным типам плотин свидетельствуют о том, что самая низкая частота аварий на Западе в период 1930—1996 гг. от-

мечалась на гравитационных плотинах ($1,3 \times 10^{-5}$ плотино-год), а самая высокая — на каменно-набросных плотинах ($3,0 \times 10^{-4}$ плотино-год). 1930 г. был выбран в качестве граничной даты по ряду причин. В то время после аварий на нескольких плотинах в США и Соединенном Королевстве в ряде стран были приняты законы по контролю за безопасностью плотин и одновременно была изменена технология строительства с заменой каменной кладки структурно более прочным бетоном в качестве основного строительного материала. Это привело к существенному снижению частоты аварий на плотинах, построенных после 1930 г.

Кроме конструктивных особенностей на результаты оказывают влияние различия в области обеспечения качества, мониторинга, культуры безопасности и эффективности регулирующих органов по вопросам ядерной безопасности в различных странах. Например, индекс смертности для плотин в мире за период 1969—1996 гг. показывает довольно высокий уровень риска в 0,9 летальных исходов на гигаватт электрический в год [ГВт (эл.)/год]. Однако при раздельном рассмотрении положений в странах — членах и нечленах ОЭСР было установлено, что число летальных исходов из расчета на гигаватт электрический в год в странах — членах ОЭСР составило за этот период 2,2, в то время как в странах — членах ОЭСР оно равнялось всего лишь 0,004. Это говорит о том, что было бы ошибочным пользоваться усредненными данными для всех "плотин" в мире в целом для оценки безопасности новой гравитационной плотины, намеченной к строительству, например, в Норвегии. Вместо этого было бы желательным применение количественной оценки рисков для отражения реальных условий.

В отношении ядерной энергии решающее влияние на уровень безопасности электростанций

оказывают различия в их конструкции. Данные исторического опыта свидетельствуют о том, что аварии на атомных электростанциях с легководными (ЛВР) и тяжеловодными (ТВР) реакторами не приводили к каким-либо преждевременным летальным исходам.

Единственная авария на таких реакторах, сопровождавшаяся радиоактивными выбросами за пределы площадки, имела место в 1979 г. на атомной электростанции Три-Майл-Айленд (ТМА) в Харрисберге, США, при этом население окружающей станцию территории получило исключительно малые дозы. По оценкам из различных источников, коллективная доза в данном случае колебалась от 0,5 до 50 чел.-Зв. Наиболее вероятная интегральная доза для населения составила, по оценке президентской Комиссии по расследованию причин аварии на ТМА, 5 чел.-Зв. Таким образом, наиболее вероятное число летальных исходов на ТМА является нулевым, хотя по максимальной оценке оно равняется двум.

Авария 1986 г. в Чернобыле произошла на реакторе РБМК, конструкция которого относилась к другому типу. Она не может считаться представительной для рассмотрения аварийных рисков на атомных электростанциях, проектируемых, строящихся и эксплуатируемых в соответствии с международно принятыми принципами ядерной безопасности. Однако именно эта авария в наибольшей степени определила отношение населения к ядерной энергетике.

Конструкция РБМК была разработана на базе применявшихся в военных целях реакторов с графитовым замедлителем для производства плутония. Данный реактор кардинально отличался от легководных реакторов, эксплуатируемых в других странах; он обладал некоторыми особенностями, которые сделали аварию возможной и практически предопределили ее трагический ход. Наиболее важной из этих

особенностей была тенденция к спонтанному повышению мощности реактора при повышении температуры в его активной зоне.

Такая "положительная обратная связь" проявлялась лишь при определенных условиях, и именно такие условия сложились к моменту аварии. Мощность реактора возрастала, пока не превысила 1млн. МВт, и топливо испарилось.

Подобный сценарий невозможен в легководных реакторах, поскольку благодаря особенностям конструкции повышение температуры в них ведет к снижению реактивности и мощности реактора. Другие особенности конструкции РБМК, которые способствовали аварии, также были присущи только реакторам этого типа.

Кроме того, на Чернобыльской АЭС не были реализованы основные принципы ядерной безопасности.

Вопросы безопасности не получили всей полноты внимания, которой они заслуживали, а были подчинены конъюнктурным политическим и производственным целям. Ответственные за ядерную безопасность органы играли второстепенную роль. Операторы не были подготовлены к работе в аварийных условиях и не были осведомлены об опасностях, связанных с работой, которую они проводили во время аварии. Не был учтен, как следовало бы, международный опыт в области реакторной безопасности, а также отсутствовало международное сотрудничество по вопросам безопасности реакторов РБМК. Фактически эти реакторы рассматривались в качестве уникальных и не подлежащих лицензированию вне пределов страны их происхождения.

В 1989 г. органы Соединенного Королевства, ответственные за охрану здоровья и обеспечение безопасности населения, пришли к выводу, что фундаментальные различия в характеристиках безопасности между конструкци-

ей РБМК и конструкцией реакторов с водой под давлением настолько велики, что опыт, приобретенный в эксплуатации первых, не может быть использован при рассмотрении аспектов безопасности вторых.

Приведенные здесь показатели тяжелых аварий отвечают данному подходу. Они характеризуют последствия чернобыльской аварии как свойственные только реакторам РБМК. Применительно ко всем другим типам реакторов используются показатели, в основе которых лежит авария на Три-Майл-Айленд.

В целом в мире зарегистрировано много тяжелых аварий на неядерных энергетических системах, на основе которых можно построить кривую ожидаемой частоты и тяжести аварий. Однако отсутствие данных по ядерным авариям — они просто не имели каких-либо радиологических последствий, за исключением событий на Три-Майл-Айленд и в Чернобыле, — вынуждает на практике пользоваться данными, полученными в исследованиях на основе вероятностных оценок безопасности (ВОБ).

Эти исследования используются главным образом для оценки устойчивости конструкции конкретной атомной электростанции и надежности процедур, а также для определения слабых мест в такой конструкции в целях осуществления наиболее эффективных мер по ее совершенствованию. Они используются также в некоторых странах для подтверждения соответствия атомных электростанций регулирующим правилам по безопасности. Исследования ВОБ превратились, таким образом, в полезный инструмент в области оценок безопасности.

Аналогичный подход с использованием качественной оценки рисков применяется в неядерной промышленности, например для оценки рисков, связанных с хранением жидкого топлива на острове Канвей. Полученные результаты убедительно свидетельствуют о том, что риски, свя-

ПОКАЗАТЕЛИ УЩЕРБА ОТ ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ

Рассчитано число преждевременных летальных исходов, имевших место в прошлом после тяжелых аварий в неядерных энергетических системах. В области ядерной энергии рассчитаны как преждевременные летальные исходы (только в результате чернобыльской аварии), так и латентные раковые заболевания с летальным исходом. Ввиду отсутствия данных наблюдения за негативными последствиями для здоровья больших групп населения, подвергавшихся облучению дозами, аналогичными дозам во время чернобыльской аварии, соответствующее число латентных летальных исходов на территории бывшего Советского Союза рассчитывалась на основе консервативных допущений. Ожидалось, что число зарегистрированных летальных исходов должно быть существенно более низким.

Показатель ущерба [на ГВт (эл.)/год]	Уголь ОЭСР	Нефть ОЭСР	Природный газ ОЭСР	Сжиженный нефтяной газ ОЭСР	Гидроэнергия ОЭСР/ не ОЭСР	Ядерная энергия ЛВР/РБМК
Число непосредственных летальных исходов	0,13	0,39	0,066	1,8	0,004/2,19	0,0/0,16
Число латентных летальных исходов	?	?	?	?	?	0,0005/46,5
Число травмированных	0,019	0,44	0,22	7,34	0,23/0,143	0/2,15
Число эвакуированных	0	7,41	4,83	481	10,1/70	33/726
Денежный ущерб (млн. долл. США, 1996 г.)	0,035	0,94	0,11	1,92	0,7/0,5	1,3/1760

Примечания: Число латентных летальных исходов для неядерных аварий обычно не определяется, хотя оно может быть значительным. В случае с атомными электростанциями данные по РБМК и ЛВР соответствуют ожидаемому максимальному числу летальных исходов в происходивших в прошлом авариях, деленному на энергию, произведенную на реакторах этого типа.

Источник: Данные по неядерным энергетическим системам в европейских странах ОЭСР и странах — нечленах ОЭСР за период 1969—1996 гг. получены от ИПШ, Швейцария, а данные по ядерной энергии за период 1960—1998 гг. — от МАГАТЭ.

занные с неядерными установками, намного превышают риски, присущие ядерным реакторам с водой под давлением.

СРАВНЕНИЕ АВАРИЙНЫХ ДАННЫХ

Результаты, полученные на основе исторического опыта, демонстрируют существенные различия между агрегированными, нормализованными показателями ущерба, оцененными для различных энергетических систем. Наивысшие коэффициенты непосредственных летальных исходов, связанных с тяжелыми авариями в странах — участницах ОЭСР, относятся к сжиженному нефтяному газу, за которым следуют нефть, уголь, природный газ, гидро- и ядерная энергия. Исследование ИПШ показало, что указанные уровни для всех рассмотренных энергетических систем значительно выше в странах — нечленах ОЭСР по сравнению со странами — участницами этой организации.

С учетом сильных и слабых сторон исторического и предсказуемого методов при сравнительной оценке аварийных рисков полезен комплексный подход. При таком подходе данные по неядерным системам, которые располагают почти всеобъемлющей статистической базой по тяжелым авариям, основываются на историческом опыте, а данные по ядерной энергии базируются на результатах исследований ВОБ с использованием исторического опыта в качестве дополнительного справочного материала. Риски для населения от реакторов западного типа находятся обычно в диапазоне от 0,01 до 0,1 отложенных летальных исходов на ГВт (эл.)/год. Представительные оценки рисков для отдельного лица от действующих реакторов западного типа составляют примерно 10^{-9} на ГВт (эл.)/год и даже меньше для новых конструкций атомных электростанций эволюционного типа.

Поскольку причиной летальных исходов являются не только аварии, но также мелкие и более частые повседневные происшествия, данные по производственным травмам, содержащиеся в исследовании ExternE (репрезентативные для стран ОЭСР), представляются полезными для ознакомления с ними. Эти данные показывают, что самые высокие уровни производственных травм связаны с углем и нефтью и что ядерные риски в несколько раз меньше.

Несмотря на хорошие показатели в области безопасности атомных электростанций, строящихся и эксплуатируемых в соответствии с международно признанными принципами ядерной безопасности, необходима дальнейшая работа в этой области. Серьезность чернобыльской аварии служит напоминанием о необходимости поддержания на высоком уровне норм безопасности на всех атомных электростанциях. □