

Сравнительный анализ радиоактивного загрязнения, создаваемого АЭС и ТЭС, работающими на угле

В. А. Гордиенко^{1,a}, С. Н. Брыкин^{1,b}, Р. Е. Кузин¹, И. С. Серебряков²,
М. В. Старкова³, Т. Н. Таиров⁴

¹ Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра акустики. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

² ФГУП «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами "РосРАО"». Россия, 119017, Москва, ул. Б. Ордынка, д. 24/26.

³ ОАО «Ведущий научно-исследовательский институт химической технологии» (ВНИИХТ). Россия, 115409, Москва, Каширское ш., д. 33.

⁴ Санкт-Петербургский филиал Негосударственного образовательного учреждения дополнительного образования «Центральный институт повышения квалификации» (НОУ ДПО «ЦИПК»). Россия, 197348, Санкт-Петербург, ул. Аэродромная, д. 4А.

E-mail: ^avgord@list.ru, ^bbrykin@rosrao.ru

Статья поступила: 26.09.2011, подписана в печать 04.10.2011

На основании публичной статистики данных последних лет о выбросах и сбросах предприятий атомной энергетики и тепловых электрических станций Российской Федерации и опираясь на опубликованные результаты исследований отечественных и зарубежных специалистов по данному вопросу, проведен сравнительный анализ радиационного загрязнения окружающей среды за счет выбросов АЭС и работающих на угле ТЭС. Показано, что общее содержание радионуклидов в выбросах ТЭС существенно превышает их содержание для АЭС даже для современных ТЭС, работающих на угле с содержанием золы не более 10% и оборудованных фильтрующей системой, позволяющей задерживать не менее 97.5% золы. Особенно сложная обстановка для ТЭС сложилась в отношении долгоживущих радиоактивных изотопов, которые практически неконтролируемо и на несколько порядков в больших количествах, чем для АЭС, сбрасываются со шлаками и выбрасываются в атмосферу с золой органических топлив (особенно, горючих сланцев и угля).

Ключевые слова: атомная энергетика, тепловые электростанции, экологическое загрязнение, экологическая безопасность, промышленные выбросы в атмосферу, радиоактивные отходы, радиационная безопасность, качество воздуха и загрязнение воздуха.

УДК: 622.349.5. PACS: 87.52.Px, 89.30.Gg, 89.60.Ec, 92.60.Sz.

Введение

В настоящее время сложился устойчивый стереотип, согласно которому основными источниками поступления естественных радионуклидов (ЕРН) на поверхность Земли считаются урановые рудники и атомный энергетический комплекс с его ядерными реакторами. Одной из важнейших составляющих атомной энергетики являются атомные электростанции (АЭС). По состоянию на 2009 г. в мире действовало 437 энергетических ядерных реактора, генерирующих почти 16% мировой электроэнергии [1, 2]. Нынешнее положение дел в области выработки электроэнергии на АЭС в разных странах мира крайне неодинаково. В 30 странах, имеющих действующие АЭС, процентная доля электроэнергии, обеспечиваемой ядерными реакторами, варьируется в диапазоне от 78% во Франции, 58% в Бельгии, 44% в Швеции, 31% в Германии, до всего лишь 2% в Китае. Однако уже сейчас в Китае ведется строительство шести реакторов и планируется почти пятикратное увеличение мощностей к 2020 г. [2].

Доля атомной энергетики в общем энергобалансе России — около 16%. Высокое значение атомная энергетика имеет в европейской части России, и особенно на северо-западе, где выработка энергии на АЭС достигает 42%. В разработках проекта Энергетической стратегии

России на период до 2030 г. предусмотрено увеличение производства электроэнергии на атомных электростанциях в 4 раза.

Тем не менее радиационный фактор является барьером в общественном сознании для атомной энергетики при выборе вида энергоисточника, поскольку сформировалось неадекватное восприятие техногенных рисков различной природы. Негативное общественное восприятие этой отрасли во многом укрепилось в связи с ситуацией на японских АЭС после землетрясения и цунами 11 марта 2011 г., поэтому помимо призывов (возможно, в определенных случаях и справедливых) к необходимости ужесточения и изменения регулятивных требований и мер безопасности в процессе сертификации и выдачи разрешений на продление работы существующих и строительство новых АЭС в печати появились множественные сообщения о необходимости вернуться к эксплуатации тепловых электростанций (ТЭС), работающих во многих случаях на ископаемых горючих сланцах и угле. При этом из-за сокращения поставок газа рассматривается возможный переход ряда уже действующих электростанций Европы с газа на уголь и мазут.

Однако более детальное знакомство с проблемой свидетельствует о том, что атомная энергетика в современном мире дает всего лишь не более 0.1% от

всей дозы облучения людей на Земле [3]. На порядок больше дают вклад в радиоактивное облучение выбросы ТЭС и ТЭЦ, работающих на органическом топливе — угле, сланце, нефти, которые наряду с другими энергетическими предприятиями, работающими на этом же топливе, являются самым мощным источником поступления радионуклидов (РН), и в частности радона, в атмосферу. Так, по данным [4], выбросы газообразных радиоактивных изотопов ^{220}Rn и ^{222}Rn , не улавливаемых действующими системами очистки ТЭС, составляют около $6 \cdot 10^{10}$ Бк/ГВт(эл)-год. К этому следует добавить, что, согласно проведенной оценке, количество извлекаемых при добыче угля ЕРН в Российской Федерации превышает количество извлекаемых ЕРН при эксплуатации урановых месторождений [5]. При сжигании угля даже для современных ТЭС, работающих на угле с содержанием золы не более 10% и оборуданных фильтрующей системой, позволяющей задерживать 97.5% золы, они практически полностью попадают во внешнюю среду. В результате удельная активность выбросов ТЭС в 5–10 раз выше, чем для АЭС [6].

1. Естественная радиоактивность угля

Известно, что естественная радиоактивность угля формируется за счет природных радионуклидов. Уголь всегда содержит природные радиоактивные вещества уранового и актиноуранового рядов (^{238}U и продукты его распада ^{234}U , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{210}Pb , ^{210}Po и т. д.; ^{235}U и продукты его распада ^{219}Rn и т. д.), ториевого ряда (^{232}Th и продукты его распада ^{220}Rn , ^{216}Po), а также долгоживущий радиоактивный изотоп ^{40}K . Уран в окислительных условиях земной поверхности, как правило, присутствует в виде хорошо растворимых соединений и поэтому значительно более широко рассеян, чем торий, хотя среднее содержание урана в земной коре почти на порядок ниже, чем тория.

В углях в результате инфильтрации уран концентрируется в низкомолекулярном органическом веществе торфов, лигнитов, бурых углей. Большая часть урана находится в виде мелкодисперсных оксидов [7].

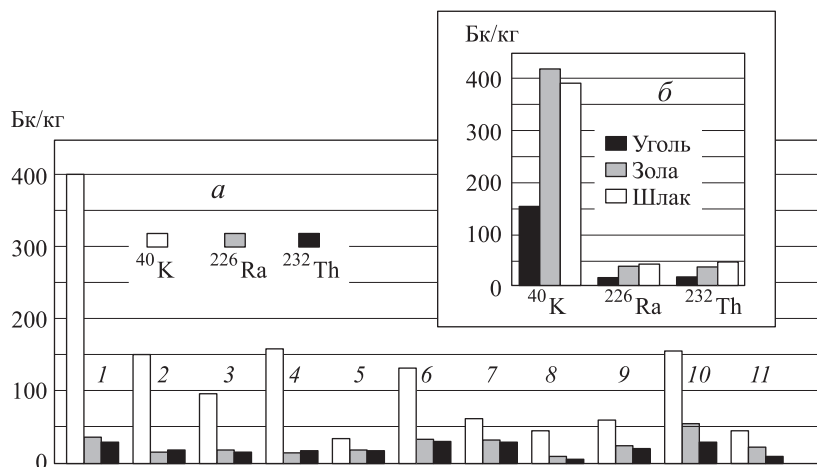
В антрацитах и каменных углях количество урана незначительно.

Концентрация радионуклидов в разных угольных пластах различается в сотни раз. В среднем содержание радионуклидов в угле примерно соответствует гранитным кларкам. За счет привнесенного урана содержание радионуклидов может увеличиваться. Так, в подмосковном угле содержание урана в среднем составляет 9.15 г/т, а тория 11.65 г/т. Радиоактивность золы и выбрасываемых в атмосферу твердых частиц, образующихся при его сжигании, превышает 370 Бк/кг (достигая временами 520 Бк/кг). В то время как при сжигании кузбасских углей радиоактивность составляет 20–40 Бк/кг. По мере выработки месторождения концентрация радионуклидов в угле может меняться.

Согласно [8], среднемировые концентрации радионуклидов в углях составляют: ^{40}K — 140–850 Бк/кг, ^{226}Ra — 17–60 Бк/кг, ^{232}Th — 11–64 Бк/кг. На рисунке (а) в качестве иллюстрации приведены с учетом данных работы [9] характерные удельные активности этих изотопов для десяти российских месторождений. В табл. 1 приведены аналогичные данные для Интинского и основных дальневосточных месторождений угля с учетом изменения концентрации радионуклидов в золе и шлаке.

Миграция ЕРН в процессе освоения сырья при определенных условиях может приводить также к образованию техногенных соединений. Техногенные и природные процессы не одинаковы по своим термодинамическим и физико-химическим характеристикам, поэтому в процессе переработки сырья формы ЕРН будут меняться, особенно под воздействием высоких температур.

ЕРН уранового ряда при формировании техногенных соединений образуют в большинстве своем соединения, практически не отличающиеся от известных природных минералов. ЕРН ториевого ряда изучены не так подробно, но есть основания предполагать, что сформированные техногенные соединения тория будут отличаться от природных. Отметим, что торий и калий обычно связываются с неорганической фракцией, в то время



Средние значения удельной активности радионуклидов ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th по данным [4, 9]: а — в углях различных месторождений (1 — среднемировые концентрации, 2 — Интинское, 3 — Воркутинское, 4 — Кузнецкое, 5 — Хакасское, 6 — Райчихинское, 7 — Нерюнгринское; 8 — Ургальское, 9 — Харанорское, 10 — Чегдомынское, 11 — Лучегорское); б — в угле Интинского месторождения и продуктах его сжигания

Таблица 1

Удельные активности естественных радионуклидов в углях некоторых российских месторождений

Месторождения углей	Содержание радионуклидов, Бк/кг								
	⁴⁰ K			²²⁶ Ra			²³² Th		
	уголь	зола	шлак	уголь	зола	шлак	уголь	зола	Шлак
Интинское	152	420	393	15	39	43	18	37	46
Райчихинское	137	399	н. д.	38	89	н. д.	34	90	н. д.
Нерюнгринское	67	180	н. д.	38	142	н. д.	35	160	н. д.
Ургальское	46	186	282	12	78	87	8	56	65
Харанорское	61	404	373	24	83	89	19	67	69
Чегдомынское	153	н. д.	472	51	н. д.	151	33	н. д.	117
Лучегорское (Бикинское)	47	334	299	21	89	90	10	70	54

как уран имеет тенденцию к связи с органикой [10], выбрасываемой в атмосферу с паргазовой фракцией, и концентрируется в аэрозолях.

При определенных условиях мобилизация ЕРН возможна даже на объектах с содержанием ниже кларка, поэтому в процессе добычи, переработки, использования и транспортировки радиоактивные элементы, содержащиеся в субкларковых количествах, могут накапливаться в окружающей среде и в дальнейшем представлять опасность для персонала и населения прилегающих территорий. При этом достаточно большие объемы добычи минерального сырья предопределяют значимое накопление суммарного количества ЕРН [11].

2. Характеристика основных выбросов АЭС

Одна из причин умеренно отрицательного отношения к эксплуатации АЭС заключается, по-видимому, в том, что АЭС представляют серьезную *потенциальную* радиационную опасность. Радиоактивное загрязнение окружающей среды при авариях на АЭС — это основной фактор, оказывающий влияние на состояние здоровья и условия жизнедеятельности людей на территориях, подвергшихся загрязнению. Тем не менее ради объективности следует отметить, что с начала эксплуатации АЭС зарегистрировано только четыре реальных серьезных аварии. При этом первые три были обусловлены не столько самой атомной энергетикой, сколько человеческим фактором.

Первая в мире серьезная авария произошла на АЭС «Чолк-ривер» (провинция Онтарио, Канада) в 1952 г. из-за технической ошибки персонала, которая привела к перегреву и частичному расплавлению активной зоны реактора. Во внешнюю среду попало более тысячи Кюри продуктов деления, а около 3800 м³ радиоактивно загрязненной воды было сброшено прямо на землю, в мелкие траншеи неподалеку от реки Оттавы.

Вторая авария произошла на АЭС «Тримайл-Айленд» (штат Пенсильвания, США) в 1979 г., когда из-за серии сбоев в работе оборудования и грубых ошибок операторов расплавилось 53% активной зоны одного из реакторов. Произошел выброс в атмосферу инертных радиоактивных газов ксенона и йода. Кроме

того, в реку Сукуахана было сброшено 185 м³ слаборадиоактивной воды.

Третья, крупнейшая ядерная авария в мире, с разрушением активной зоны реактора и выходом осколков деления за пределы зоны, произошла в 1986 г. на четвертом блоке Чернобыльской АЭС (Украина). В атмосферу было выброшено 190 т радиоактивных веществ. Восемь из 140 т радиоактивного топлива реактора оказались в воздухе. Другие опасные вещества попали в атмосферу в результате пожара, длившегося почти две недели.

Четвертая серьезная авария — это уже упоминавшаяся выше авария на японских АЭС после землетрясения и цунами 11 марта 2011 г.

При нормальной эксплуатации АЭС количество радиоактивных веществ, поступающих во внешнюю среду за счет газоаэрозольных выбросов и жидких сбросов, невелико. Доза внешнего и внутреннего облучения организма человека на границе санитарно-защитной зоны вокруг АЭС и за ее пределами намного ниже установленных норм, так как защитные барьеры ослабляют количество поступающих во внешнюю среду радионуклидов во много раз. В качестве иллюстрации в табл. 2 приведены данные за 2010 г. по выбросам действующих российских АЭС.

Выбросы АЭС на 99.9% состоят из инертных радиоактивных газов (ИРГ). В процессе деления образуется около 20 радионуклидов криптона и ксенона, из которых основной вклад в ИРГ вносят изотопы криптона ⁸⁸Kr (период полураспада 2.8 ч) и ксенона ¹³³Xe (5.3 сут), ¹³⁵Xe (9.2 ч), дающие различный вклад в зависимости от типа реактора. На долю всех оставшихся радионуклидов (в основном это ¹³¹I, ⁶⁰Co, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs и тритий ³H) приходится менее одного процента. Еще в меньшем количестве наблюдаются выбросы небольшого количества продуктов коррозии реактора и первого контура и осколков деления ядер урана, ⁵¹Cr, ⁵⁴Mg, ⁹⁵Nb, ¹⁰⁶Ru, ¹⁴⁴Ce. Для российских АЭС в среднем в численном выражении это составляет на 1 ГВт·ч выработанной электроэнергии 5 · 10¹² Бк для ИРГ и 4 · 10⁷ Бк для суммы всех остальных радионуклидов.

Таблица 2

**Выработка электроэнергии и выбросы ИРГ и остальных радионуклидов
основными действующими российскими АЭС за 2010 г.**

АЭС	Выработано за год, ГВт·ч	ИРГ, Бк/год	Остальные РН, Бк/год	ИРГ на 1 ГВт·ч	Остальные РН на 1 ГВт·ч
Балаковская	31.72	0	$8.6 \cdot 10^6$	0	$2.7 \cdot 10^5$
Калининская	22.40	$2.0 \cdot 10^{13}$	$1.7 \cdot 10^9$	$8.9 \cdot 10^{11}$	$7.6 \cdot 10^7$
Кольская	10.68	0	$1.7 \cdot 10^7$	0	$1.6 \cdot 10^6$
Курская	28.68	$5.2 \cdot 10^{14}$	$3.4 \cdot 10^9$	$1.8 \cdot 10^{13}$	$1.2 \cdot 10^8$
Ленинградская	27.55	$2.3 \cdot 10^{14}$	$3.1 \cdot 10^8$	$8.3 \cdot 10^{12}$	$1.1 \cdot 10^7$
Нововоронежская	11.77	$4.2 \cdot 10^{13}$	$6.4 \cdot 10^8$	$3.6 \cdot 10^{12}$	$5.4 \cdot 10^7$
Ростовская	12.41	$1.8 \cdot 10^{13}$	$2.2 \cdot 10^6$	$1.4 \cdot 10^{12}$	$1.8 \cdot 10^5$
Смоленская	20.83	$5.6 \cdot 10^{13}$	$1.0 \cdot 10^9$	$2.7 \cdot 10^{12}$	$4.9 \cdot 10^7$
ВСЕГО	166.04	$8.8 \cdot 10^{14}$	$7.1 \cdot 10^9$		
Среднее на 1 ГВт·ч				$5.3 \cdot 10^{12}$	$4.3 \cdot 10^7$

Таблица 3

**Сравнительные усредненные характеристики выбросов российских АЭС
за последние 25 лет для двух типов основных используемых реакторов**

Тип реактора	АЭС	Выбросы ИРГ по годам, Бк/год		
		1985–1990 гг.	1991–1996 гг.	2010 г.
ВВЭР	Балаковская	$1.0 \cdot 10^{14}$	$3.1 \cdot 10^{13}$	0
	Калининская	$1.6 \cdot 10^{14}$	$2.8 \cdot 10^{13}$	$2.0 \cdot 10^{13}$
	Кольская	$5.4 \cdot 10^{14}$	$1.7 \cdot 10^{14}$	0
РБМК	Курская	$6.6 \cdot 10^{15}$	$3.9 \cdot 10^{15}$	$5.18 \cdot 10^{14}$
	Ленинградская	$4.2 \cdot 10^{15}$	$1.4 \cdot 10^{15}$	$2.29 \cdot 10^{14}$
	Смоленская	$3.8 \cdot 10^{15}$	$2.2 \cdot 10^{15}$	$5.64 \cdot 10^{13}$

Таблица 4

**Сопоставление выбросов в окружающую среду основных изотопов
на примере трех АЭС (данные за 2010 г.)**

Радионуклид	Нововоронежская		Белоярская		Ленинградская	
	всего	на 1 ГВт·ч	всего	на 1 ГВт·ч	всего	на 1 ГВт·ч
Сумма ИРГ	$4.2 \cdot 10^{13}$	$3.57 \cdot 10^{12}$	$5.47 \cdot 10^{12}$	$1.39 \cdot 10^{12}$	$2.29 \cdot 10^{14}$	$8.31 \cdot 10^{12}$
^{131}I	$2.2 \cdot 10^8$	$1.87 \cdot 10^7$	0	0	0	0
^{60}Co	$2.0 \cdot 10^8$	$1.70 \cdot 10^7$	$3.20 \cdot 10^5$	$8.14 \cdot 10^4$	$2.50 \cdot 10^8$	$9.07 \cdot 10^6$
^{134}Cs	$8.6 \cdot 10^7$	$7.31 \cdot 10^6$	0	0	$1.79 \cdot 10^7$	$6.50 \cdot 10^5$
^{137}Cs	$1.3 \cdot 10^8$	$1.10 \cdot 10^7$	$1.4 \cdot 10^7$	$3.56 \cdot 10^6$	$4.40 \cdot 10^7$	$1.60 \cdot 10^6$

Большинство радионуклидов газоаэрозольных выбросов, включая ИРГ, имеют довольно небольшой период полураспада и без ущерба для окружающей среды распадаются, не успевая поступить в атмосферу. Тем не менее для обеспечения безопасности по отношению к этим радионуклидам на АЭС, как правило, предусмотрена специальная система задержки газообразных выбросов в атмосферу.

Характер и количество газообразных радиоактивных выбросов зависит от типа реактора и системы обращения с этими отходами. Сравнительные усредненные характеристики выбросов российских АЭС за последние

25 лет для двух типов основных используемых реакторов приведены в табл. 3. Данные за 1985–1996 гг. приведены согласно [3]. В табл. 4 на примере трех АЭС разных поколений сопоставлены выбросы в окружающую среду основных изотопов (данные за 2010 г.).

Криптон как химический элемент не вовлекается в биологические процессы. Однако он поглощается тканями тела при дыхании и хорошо растворяется в жировых тканях человека и животного, поэтому может повышать частоту возникновения рака кожи.

Наиболее опасным в выбросах современных АЭС считается тритий (^3H). Он может замещать водород во

всех соединений с кислородом, серой, азотом. А эти соединения составляют значительную часть массы животных организмов. Доказано, что он легко связывается протоплазмой живых клеток и накапливается в пищевых цепях. Распадаясь, тритий превращается в гелий и испускает бета-частицы. Такая трансмутация должна быть очень опасна для живых организмов, так как при этом поражается генетический аппарат клеток. В организм человека ^3H поступает в виде газа и тритиевой воды $^1\text{H}^3\text{HO}$ через легкие, кожу и желудочно-кишечный тракт. Газообразный $^3\text{H}_2$ в 500 раз менее токсичен, чем сверхтяжелая вода $^3\text{H}_2\text{O}$. Это объясняется тем, что молекулярный тритий, попадая с воздухом в легкие, быстро (примерно за 3 мин) выделяется из организма, тогда как тритий в составе воды задерживается в нем на 10 суток и успевает за это время передать организму значительную дозу радиации. Половина тритиевой воды выходит из организма каждые 10 дней [12]. Обычное среднее содержание трития в выбросах АЭС не превышает $1 \cdot 10^9$ Бк для реакторов типа РБМК и $6 \cdot 10^9$ Бк для реакторов ВВЭР на 1 ГВт·час произведенной электроэнергии.

3. Характеристика основных выбросов угольных ТЭС

Во время сжигания угля большая часть урана, тория и продуктов их распада выделяются из исходной матрицы угля и распределяются между газовой и твердой фракциями. Практически 100% присутствующего радона переходит в газовую фазу и выходит с дымовыми газами [13].

Кроме дымовых газов, к основным источникам поступления радионуклидов в окружающую среду при сжигании угля на электростанции относят вынос частиц угля с открытых площадок углехранилищ (углеунос) и золоотвал [14]. При сгорании большая часть минеральной фракции угля плавится и образует стекловидный зольный остаток, значительная доля которого остается в виде шлака. Тяжелые частицы при этом попадают в золу, однако наиболее легкая часть золы, так называемая «летучая зола», вместе с потоком газов уносится в трубу электростанции. Удельная эффективность золы-уноса повышается с увеличением ее дисперсности. Высокодисперсная зола практически не улавливается оборудованием по очистке газов ТЭС [9], поэтому дымовые газы являются основным источником загрязнения от действия электростанций.

Например, в выбросах от Назаровской ТЭС содержится в среднем 90% U, 76% Th и 60–88% Ra от их исходного содержания [15]. Прибалтийская ТЭС, работающая на сланцах, выбрасывает в атмосферу с дымовыми выбросами до 90% урана, 28–60% радия и до 78% тория. В результате деятельности ТЭС вокруг нее образовалась зона повышенных концентраций ЕРН с радиусом примерно 40 высот труб станции, в которой произошло увеличение концентраций ЕРН для верхнего слоя почвы (3 см) на порядок. Концентрация ЕРН в факеле составляет: радия — до 50 мкБк/м³, тория — до 10 мкБк/м³ и урана — до 100 мкБк/м³ при фоне 1 мкБк в 1 м³ воздуха [16].

Суммарный выброс радионуклидов на угольных электростанциях в среднем составляет около

Таблица 5
Среднегодовые выбросы радионуклидов тепловой станции, Бк/ГВт·ч

Радионуклид	Бк/ГВт·ч	Период полураспада
^{220}Rn	$4.07 \cdot 10^9$	55.6 с
^{222}Rn	$8.14 \cdot 10^9$	3.8 сут
^{238}U	$5.55 \cdot 10^7$	4.5 млрд лет
^{234}U	$5.55 \cdot 10^7$	245 тыс. лет
^{226}Ra	$4.44 \cdot 10^7$	1600 лет
^{218}Po	$1.41 \cdot 10^8$	3 мин
^{214}Pb	$1.41 \cdot 10^8$	27 мин
^{214}Po	$1.41 \cdot 10^8$	0.00016 с
^{210}Pb	$1.41 \cdot 10^8$	22 года
^{210}Po	$1.41 \cdot 10^8$	138 сут
^{216}Po	$8.88 \cdot 10^7$	0.15 с
^{212}Pb	$8.88 \cdot 10^7$	11 ч
^{40}K	$1.96 \cdot 10^8$	1.3 млрд лет

$1.33 \cdot 10^{10}$ Бк на 1 ГВт·ч. В табл. 5 приведены среднегодовые выбросы радионуклидов ТЭС США по данным [17] в расчете на 1 ГВт·ч.

Видно, что основную долю вносят изотопы радона, которые в сумме дают $1.2 \cdot 10^{10}$ Бк на каждый ГВт·ч электроэнергии.

Необходимо отметить, что в продуктах сгорания происходит концентрирование микроэлементов, в том числе и радионуклидов. Степень концентрирования зависит от многих факторов, в число которых входит первоначальная концентрация радионуклидов в угле, зольность, способ сжигания и условия работы электростанции [18]. Коэффициенты обогащения могут существенно различаться. Особенно интенсивно за счет термохимических процессов накапливается в золе изотоп ^{210}Pb , так что его концентрация увеличивается в 5–10 раз [15]. Известно, что свинец и его соединения токсичны. В частности, попадая в организм, свинец накапливается в костях, вызывая их разрушение. В табл. 6 представлены типичные соотношения концентраций основных радионуклидов в угле, шлаке и летучей золе по данным [19].

Таблица 6
Концентрация основных радионуклидов в углях, шлаках и золе, Бк/кг

Изотоп	Уголь	Шлак	Летучая зола
^{238}U	9–31	56–185	70–370
^{226}Ra	7–25	20–166	85–281
^{232}Th	9–19	59	81–174
^{40}K	2–130	230–962	233–740

Летучая зола, выбрасываемая в воздух, представляет большую опасность из-за своей способности распространяться на значительные расстояния и прони-

кость в легкие человека. Тонкие фракции летучей золы обогащены различными вредными веществами. Помимо радионуклидов, они содержат тяжелые металлы и микроэлементы Co, V, Cu, Zn, Cr, Ni, Cd, As, Be [20]. Например, в почвах, находящихся в зоне влияния ТЭС, наблюдались концентрации ванадия до 110 мг/кг, бериллия — до 15–50 мг/кг сухой почвы [3].

Рассеивание загрязнений с дымовыми газами происходит на большие площади, поскольку выбросы ТЭС в атмосферу осуществляются на высоте 100–300 м. В качестве иллюстрации можно привести следующий факт. В большинстве случаев зона влияния промышленных предприятий не превышает 0.5–1.5 км. Вблизи дорог такая зона составляет до 50 м, а нарушение или даже полная деградация растительного покрова вблизи ТЭС, особенно работающих на низкокачественных углях, наблюдается в радиусе 4–15 км [15]. В снежном покрове в зоне влияния ТЭС, являющемся индикатором техногенного загрязнения, содержание радионуклидов может достигать значений для ^{40}K — 22.2–45.3 Бк/л, для ^{226}Ra — 4–9 Бк/л, для ^{232}Th — 3.4–7.8 Бк/л [21]. Средние выбросы основных радионуклидов, плотность загрязнения территории и их содержание в атмосфере в районе расположения номинальной среднестатистической ТЭС по данным [15] представлены в табл. 7.

В работе [9] были проанализированы пробы угля Интинского месторождения Печорского угольного бассейна, а также продукты его сгорания зола и шлак. Концентрация урана в этом угле существенно меньше средних мировых значений, не превышает кларкового содержания и составляет 0.5–0.7 г/т, тория — порядка 2.9 г/т. Соотношения концентраций радионуклидов в угле, шлаке и летучей золе в выбросах ТЭС-1 Северодвинска, которая работает на этом угле, представлены на рисунке. В табл. 8 представлена оценка

количества радионуклидов поступающих в атмосферу при сжигании такого угля на ТЭС-1.

Производимые в больших объемах твердые отходы загрязняют, помимо всего прочего, подземные воды. Вокруг таких мест образуется зона расплывания загрязнителей, поскольку такая вода является растворителем многих токсичных веществ [3].

4. Некоторые сравнительные характеристики выбросов ТЭС и АЭС

В отличие от электростанций, работающих на угле, организация эксплуатации ядерного топлива на АЭС обеспечивает в настоящее время достаточно высокий уровень безопасности, начиная с отправки ядерного топлива и заканчивая хранением. Сжигание ядерного топлива происходит без участия окислителей, поэтому не вызывает нарушений биогеохимических циклов кислорода, углекислого газа, серы и азота.

При нормальной эксплуатации влияние АЭС на радиоактивное загрязнение воздуха является весьма малым по сравнению с естественной радиоактивностью атмосферы и не наносит заметного ущерба прилегающим территориям и наземным экосистемам, так как используемые на АЭС технические меры позволяют обеспечить весьма высокие коэффициенты удержания радионуклидов в реакторе. Существует ряд защитных барьеров, препятствующих выходу радионуклидов, в частности, упоминавшаяся выше задержка газов перед выбросом в трубу, в течение которой происходит распад короткоживущих радионуклидов.

Сравнение данных табл. 2 и 8 показывает, что в среднем для функционирующих в настоящее время ТЭС и АЭС разница в уровнях радиоактивного загрязнения долгоживущими радионуклидами составляет несколько порядков. Следует также иметь в виду, что продукты сгорания угля в виде золы и шлаков обра-

Таблица 7

Средние выбросы основных радионуклидов, плотность загрязнения территории и концентрация РН в воздухе в расчете на 1 ГВт·ч в районе расположения номинальной ТЭС

Показатели	Радионуклиды					
	^{226}Ra	^{228}Ra	^{210}Pb	^{210}Po	^{232}Th	^{40}K
Годовой выброс, 10^{10} Бк	1.96	1.11	8.14	7.40	1.96	19.61
Плотность загрязнения территории, 10^7 Бк/км ²	38.85	9.25	114.70	70.30	—	388.5
Концентрация в воздухе, 10^{-8} Бк/л	6.29	4.07	14.80	14.43	6.29	—

Таблица 8

Поступление радионуклидов в окружающую среду при работе ТЭС-1 Северодвинска на углях Печорского угольного бассейна Интинского месторождения

Изотоп	Количество РН, поступающих в среду, Бк на 1 ГВт·ч			Всего
	углеунос	золоотвал	дым	
^{40}K	$1.22 \cdot 10^7$	$2.46 \cdot 10^{12}$	$3.15 \cdot 10^5$	$2.46 \cdot 10^{12}$
^{226}Ra	$1.19 \cdot 10^6$	$2.48 \cdot 10^{11}$	$3.45 \cdot 10^4$	$2.48 \cdot 10^{11}$
^{232}Th	$1.41 \cdot 10^6$	$2.51 \cdot 10^{11}$	$4.28 \cdot 10^4$	$2.51 \cdot 10^{11}$
Всего	$1.48 \cdot 10^7$	$2.96 \cdot 10^{12}$	$3.92 \cdot 10^5$	$2.96 \cdot 10^{12}$

зуют значительное количество трудно утилизируемых отходов, поэтому, как правило, не утилизируются и являются дополнительными источниками радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Несмотря на то что дымовые газы ТЭС, как правило, очищаются в золоуловителях с коэффициентом полезного действия 94–99% [9], ядерная энергетика оказывается пока существенно чище традиционной теплоэнергетики и по химическим показателям. Помимо долгоживущих радионуклидов опасными компонентами дымовых газов ТЭС являются твердые частицы, диоксид серы, окислы азота и углекислый газ. Кроме того, в дымовых газах содержатся ароматические углеводороды канцерогенного воздействия, пары соляной и плавиковой кислот, токсичные металлы. Сравнительные данные по концентрации некоторых химических выбросов от ТЭС и АЭС на 1 ГВт·ч выработанной энергии приведены в табл. 9.

Таблица 9
Сравнительная таблица химических выбросов от ТЭС и АЭС на 1 ГВт·ч выработанной энергии [20]

Химический загрязнитель	Концентрация выбросов, отн. ед.	
	ТЭС	АЭС
SO ₂	$1.18 \cdot 10^{-3}$	$1.68 \cdot 10^{-7}$
Твердые частицы	$3.33 \cdot 10^{-4}$	$2.08 \cdot 10^{-8}$
NO _x	$1.28 \cdot 10^{-4}$	$1.92 \cdot 10^{-8}$
CO ₂	$1.09 \cdot 10^{-5}$	$1.82 \cdot 10^{-8}$

Как показали проводившиеся по заказу Еврокомиссии исследования, мелкодисперсная угольная пыль ежегодно приводит к смерти около 300 тыс. европейцев. В России дополнительная смертность от проживания вблизи угольных ТЭС оценивается в 8–10 тыс. человек в год. В то же время имеющиеся в разных странах данные свидетельствуют, что по реальному воздействию на человека атомная промышленность находится во втором десятке вредных факторов. На первом месте по показателям профзаболеваний находится угольная промышленность (20–50 заболеваний против 0.4–0.7 в атомной промышленности на 10 000 работающих) [22].

К этому следует добавить и проблему количества необходимого топлива. Так, для обеспечения работы в течение года ТЭС на угле мощностью 2 ГВт за год требуется 6 млн т угля (примерно 150 000 вагонов), потребление кислорода составляет около 10^{10} м³/год, накапливается около 1.4 млн т (800 тыс. м³) твердых отходов за год. Для АЭС аналогичной мощности требуется топлива примерно два вагона в год, кислород не потребляется, отработанное ядерное топливо (ОЯТ) составляет 40–50 т (около 5 м³) в год.

Громадное количество твердых отходов ТЭС не имеет никакой энергетической ценности, а изготовленное новое топливо из 50 т ОЯТ позволяет заместить 2 млн т угля, или 1.6 млрд м³ газа, или 1.2 млн т нефти.

Мировая статистика показывает, что добыча этих 6 млн т угля обойдется в 24 человеческие жизни и 90 травм шахтеров.

Заключение

Выше уже были упомянуты некоторые преимущества развития атомной энергетике. В качестве одного из ее преимуществ указывалось на значительную чистоту воздушного бассейна вокруг АЭС в сравнении с обстановкой вокруг ТЭС.

Исследования показывают, что годовая доза дополнительного облучения для живущих вблизи АЭС почти в 20 раз меньше среднего естественного фона на поверхности Земли (1 мЗв/год). Риск от проживания вблизи АЭС оценивается в $7 \cdot 10^{-7}$ [12].

Ядерная энергетика положительно решает многие экологические проблемы, не потребляет ценного природного сырья и атмосферного кислорода, не выбрасывает в атмосферу парниковых газов и ядовитых веществ и стабильно обеспечивает получение самой дешевой энергии. Замещая тепловую энергетику, атомная энергетика может сыграть существенную роль в сокращении выбросов углекислого газа, разрешении других экологических проблем.

Однако следует отметить, что только при нормальной эксплуатации АЭС в экологическом отношении чище тепловых электростанций на угле. При авариях АЭС могут оказывать существенное радиационное воздействие на людей и экосистемы. Даже при значительных авариях на электростанциях, таких, например, как авария на Саяно-Шушенской ГЭС, их экологические последствия носят преимущественно локальный характер. Этого нельзя сказать об авариях на АЭС. И Чернобыльская катастрофа, и авария на японских АЭС в 2011 г. приобрели характер мировых катастроф, поэтому право на существование атомная энергетика имеет только в случае обеспечения предельно высокого уровня безопасности ее предприятий, недопущения какого-либо выноса радиоактивных продуктов из технологического оборудования за пределы, ограниченные технологическими помещениями (барьеры безопасности) при любых обстоятельствах.

Безусловно, затронуты не все проблемы полных циклов атомной и тепловой энергетике от добычи топлива до вывода объектов из эксплуатации и захоронения отходов, комплексной оценки рисков, полной стоимости жизненного цикла и т. д. Рассмотрение этих вопросов представляется важным направлением дальнейших исследований.

Список литературы

1. The United Nations Today. N. Y., 2008.
2. *Макдональд А.* Ядерная энергетика: положение дел в мире. Взгляд на производство электроэнергии на АЭС во всем мире и его будущие перспективы // Бюл. МАГАТЭ. 49-2. 2008. Март. С. 45.
3. *Крышев И.И., Рязанцев Е.П.* Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М., 2010.
4. *Акимов А.М., Ковалев Н.И.* // Збірник наукових праць СНУЧЕтаП «Екологічна безпека». 2009. С. 70.
5. Uranium. Resources, production and demand. P., 1997.

6. Тихонов М.Н., Муратов О.Э. // Экология промышленного производства. 2009. № 4. С. 40.
7. Юдович Я.Э. Геохимия ископаемых углей (неорганические компоненты). Л., 1978.
8. UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. N. Y., 2000. P. 40
9. Мауричева Т.С. Количественная оценка поступления радионуклидов в окружающую среду при работе угольных ТЭЦ (на примере ТЭЦ-1 г. Северодвинска): Автореф. дисс. ... канд. геол.-минер. наук. М., 2007.
10. Kimri M.N., Vakac M. // Turkish J. Nucl. Phys. Sci. 1995. N 22(2). P. 95.
11. Алексеев В.В. Физика и экология. М., 1978.
12. Василенко И.Я. Токсикология продуктов ядерного деления. М., 1999.
13. Radioactive Elements in Coal and Fly Ash. United States Geological Survey. <http://pubs.usgs.gov/fs/1997/fs163-97/FS-163-97.html>
14. Мауричева Т.С., Киселев Г.П. // Вестн. Поморского ун-та. 2006. № 1(9). С. 110.
15. Пучков Л.А., Воробьев А.Е. Человек и биосфера: вхождение в техносферу. М., 2000.
16. Экологический портал ESOFAQ.ru
17. Study of hazardous air pollutant emissions from electric utility steam generating units: Final report to congress. EPA-453/R-98-004.
18. Титаева Н.А. // Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека: Мат-лы Междунар. конф., посвящ. 100-летию открытия радиоактивности. Томск, 1996. С. 500.
19. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. М., 1999.
20. Коваленко Г.Д., Пивень А.В. // Ядерная радиация и безопасность. 2010. № 4(48). С. 50.
21. Матвеевко Т.И., Крупская Л.Т., Дербенцева А.М., Ламаш Б.Е. Техногенное загрязнение почв и растительности в зоне влияния теплоэлектростанции. Владивосток, 2008.
22. Тихонов М.Н., Муратов О.Э., Петров Э.Л. // Экол. экспертиза: Обзор информ. ВИНТИ РАН. М., 2006. № 6. С. 38.
23. Годовой отчет за 2010 год ОАО «Концерн Росэнергоатом». <http://www.rosenergoatom.ru>.

Comparative analysis of radioactive pollution generated by nuclear power plants and the coal-power thermal stations

V. A. Gordienko^{1,a}, S. N. Brykin^{1,b}, R. E. Kuzin¹, I. S. Serebryakov², M. M. Starkova³, T. N. Tairov⁴

¹ Department of Acoustics, Faculty of Physics, M. V. Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia.

² FSUE RosRAO, Bolshaya Ordynka str. 24/26, Moscow 119017, Russia.

³ ОАО «Leading Scientific Research Institute of Chemical Technology» (VNIKhT), Kashirskoye road 33, Moscow 115409, Russia.

⁴ Central Institute for Continuing Education and Training, Aerodromnaya str. 4A, St. Petersburg 197348, Russia. E-mail: ^avgord@list.ru, ^bbrykin@rosrao.ru.

On the basis of accessible statistics data of the last years of emissions and nuclear energy and thermal power stations of the Russian Federation, and, based on published research of domestic and foreign experts on the subject, a comparative analysis of radioactive contamination of the environment through releases from the power and working on coal power station. It is shown that the total content of radionuclide's released by thermal power plants significantly more than their contents for nuclear power plants, even for modern thermal power plants, work-melting at an angle with an ash content of no more than 10%, and equipped with filtration system, which allows holding not less than 97.5% ash. Particularly difficult for substitution for thermal-formed with respect to long-lived radioactive isotopes that are almost out of control and is several orders in large quantities. Than for nuclear power plant, with slag and discharged into the atmosphere with ash of fossil fuels (especially coal and oil shale).

Keywords: nuclear power, thermal power plants, environmental pollution, environmental safety, industrial emissions, radioactive waste, radiation safety, air quality and air pollution.

PACS: 87.52.Px, 89.30.Gg, 89.60.Ec, 92.60.Sz.

Received 26 September 2011.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 1(2012).

Сведения об авторах

1. Гордиенко Валерий Александрович — докт. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-29-69, e-mail: glery@bk.ru.
2. Брыкин Сергей Николаевич — канд. техн. наук; e-mail: brykin@rosrao.ru.
3. Кузин Рудольф Евгеньевич — докт. техн. наук; e-mail: rkuzin256@mail.ru.
4. Серебряков Игорь Серафимович — канд. техн. наук; e-mail: serebryakov.i@rosrao.org.
5. Старкова Марина Валерьевна — канд. физ.-мат. наук, гл. специалист; e-mail: starkova.m@rosrao.org.
6. Таиров Таир Надырович — канд. техн. наук; e-mail: ttair@mail.ru.