УДК 623.454.82

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ОБЪЕКТАХ МИРНЫХ ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВОВ

А. В. КАСАТКИН,
начальник управления по научной и инвестиционной деятельности

В. А. ИЛЬИЧЕВ,
ведущий научный сотрудник, канд. хим. наук

В. В. КАСАТКИН,
начальник научно-исследовательской лаборатории, канд. техн. наук, kasatkin.v.v@vnipipt.ru

А. И. ЛАРИНА,
ведущий инженер

АО «ВНИПИпромтехнологии», Москва, Россия

Рассмотрены практические вопросы обеспечения радиационной безопасности на территории существующих объектов мирных ядерных взрывов (МЯВ) и возможности безопасного использования в качестве топлива в городских котельных углеводородного газа нефтяных месторождений, где были проведены МЯВ. Впервые приведена полученная в разные годы специалистами лаборатории радиационной безопасности АО «ВНИПИпромтехнологии» информация о выходе трития на устья скважин для четырех объектов мирных ядерных взрывов.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, тритий, мирные ядерные взрывы, скважины, пункты консервации, пункты захоронения, санитарная зона, горный отвод.*

Введение

С самого начала развития ядерной взрывной технологии от разработчиков и ученых требовалось создание ядерных зарядов с минимальным выходом не только осколочных радионуклидов, но и трития. Например, при использовании ядерных взрывов в коллекторах углеводородных месторождений наиболее приемлемыми были признаны заряды с суммарным выходом 10 мг трития, что отвечало бы нормативам допустимого содержания элемента при использовании газа в быту [1]. И такие заряды были созданы. Однако при взрыве в результате активации породы дополнительно образуется значительное количество трития.

Выход трития на земную поверхность на объектах МЯВ

Практически все объекты МЯВ при первичной регистрации радиоактивных отходов (РАО), проведенной в 2013–2015 гг. в соответствии с постановлением Правительства РФ [2], признаны бесхозными, и поэтому не внесены ни в кадастр пунктов хранения РАО, ни в реестр РАО. Основное внимание при оценке радиационной безопасности объектов МЯВ было уделено части «бесхозных» объектов, расположенных вне месторождений и не используемых для технологических целей.

В Федеральном законе от 11.07.2011 г. № 190-ФЗ (ст. 3, п. 1. пп. 15) введено понятие «*пункт размещения особых радиоактивных отходов* (ПРОРАО) – *природный объект или объект техногенного происхождения, содержащий особые радиоактивные отходы, не изолированные от окружающей среды…*». Этим же законом (ст. 26) к особым радиоактивным отходам (ОРАО) отнесены РАО, образовавшиеся «*в результате использования ядерных зарядов в мирных целях*» [3].

Федеральные нормы и правила НП-103-17 предусматривают обязательный перевод ПРОРАО категории «Объекты МЯВ» в пункт консервации ОРАО (ПКОРАО) и/или в пункт захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) с реализацией необходимых мероприятий

КЛИШИН ВЯЧЕСЛАВ ИВАНОВИЧ

Родился в 1925 г. в с. Напольное Рязанской области. Учился в железнодорожном училище. В феврале 1943 г. призван в ряды Красной Армии и отправлен в минометное училище, а затем на Курскую дугу. После тяжелого ранения был демобилизован.

После окончания в 1955 г. Московского горного института был направлен в институт «ВНИПИпромтехнологии», где он работал в должности инженера, затем старшего инженера, старшего инженера-конструктора. В 1968 г. был назначен заместителем главного инженера проекта по нефтяной и газовой тематике. С 1974 г. работал в Бюро комплексного проектирования главным инженером проектов.

Принимал участие в проектировании и проведении мирных ядерных взрывов, работе Государственных комиссий по проведению ядерных испытаний на полигонах, осуществлял авторский надзор объектов.

При непосредственном участии Вячеслава Ивановича разработаны и внедрены проекты по сейсмическому зондированию земной коры, а также большое число проектов, не имеющих аналогов в мировой практике.

Вячеслав Иванович Клишин награжден орденом Трудового Красного Знамени, рядом юбилейных медалей, удостоен почетного звания «Ветеран труда».

по изоляции РАО. Однако эти нормы и правила не дают определения введенных терминов [4].

По мнению авторов, ***ПРОРАО категории «Объект МЯВ»*** – это центральная зона ядерного взрыва, в которой в результате терморадиационных и механических процессов при взрыве образовались расплав и порода, загрязненные техногенными радионуклидами до удельных активностей, соответствующих категории РАО. В размеры ПРОРАО категории «объект МЯВ» включают первоначально образованную полость, а также зону дробления, а при взрывах в скальных породах – столб обрушения.

Таблица 1. Объекты МЯВ с выходом трития на устья скважин

Параметр	Объект ядерной взрывной технологии			
	«Кимберлит-3»	«Метеорит-3»	«Шпат-2»	«Метеорит-5»
Дата проведения взрыва	06.09.1979 г.	21.08.1977 г.	22.10.1981 г.	11.08.1977 г.
Глубина заложения ядерного устройства, м	599	592	583	498
Энерговыделение (мощность), кт тэ	8,5	8,5	8,5	8,5
Обсадная колонна, м	0–614	0–594	0–608	0–211
Цементная забивка, м	0–395	0–415	0–565	0–350
Время начала безнапорного истечения ИРГ* по кабелю подрыва после взрыва, ч	Выход отсутствовал	12	16	Выход отсутствовал
Продолжительность истечения ИРГ, ч	0	~70	<1	0
Максимальное значение МЭД на устье скважины, мЗв/ч	Естественный фон	20	$\sim 3 \cdot 10^{-4}$	Естественный фон

* Инертные радиоактивные газы.

На рассматриваемых в данной работе участках каждый объект МЯВ, кроме ПРОРАО, содержит технологическую (зарядную) скважину, в которой размещали ядерное устройство и проводили ядерный взрыв. В других случаях в состав объекта МЯВ могут входить поверхностное хранилища отходов с повышенным содержанием радионуклидов или категории РАО, скважины, пробуренные в зоны взрыва, и поверхностные сооружения технологического назначения.

ОРАО и соответственно ПРОРАО категории «Объект МЯВ» в соответствие с п. 1 ст. 9 Федерального закона от 11.07.2011 г. № 190-ФЗ являются федеральной собственностью. Скважины, в том числе технологические, при проведении взрывов, дальнейшей консервации и освоении объектов находились на балансе буровых организаций или заказчиков ядерной взрывной технологии.

Основные требования по переводу ПРОРАО категории «Объект МЯВ» в пункты консервации ОРАО (ПКОРАО) или в ПЗРО следующие:

- радиационная обстановка на территории расположения объекта должна соответствовать нормативным требованиям землепользования;
- все скважины в зоне взрыва должны быть ликвидированы и сохранять герметичность на весь период потенциальной опасности ОРАО;
- следует определить размеры специального горного отвода (охранного целика в недрах), за пределы которого исключается миграция техногенных радионуклидов выше допустимого норматива объемной активности флюида при заданных геолого-гидрогеологических условиях.

На всех объектах МЯВ при проведении скважинного камуфлетного ядерного взрыва, кроме одного аварийного, радиационная обстановка на момент проведения первичной регистрации РАО соответствовала естественному фону в регионе с максимальным отклонением не более 50 %.

Герметизацию технологической скважины, также как ликвидацию других скважин, осуществляли цементированием заколонного пространства обсадных колонн и установкой цементных мостов (забивка) в стволе скважин. Со временем герметичность цементного камня может быть нарушена вследствие процессов кристаллизации цемента и вымывания щелочных и щелочноземельных элементов подземными водами. Особенностью поведения цементной забивки технологических скважин является реакция на сейсмическое воздействие в момент взрыва, приводящее в отдельных случаях к подъему колонн над первоначальной поверхностью на величину до ~10 см и более.

Оценку герметичности обсадных и спускных колонн осуществляли путем отбора проб и анализа на радиоактивность воды в открытых устьях стволов скважин. В **табл. 1** впервые приведена полученная в разные годы специалистами лаборатории радиационной безопасности АО «ВНИПИпромтехнологии» информация о выходе трития на устья скважин для четырех объектов мирных ядерных взрывов.

При подземном ядерном взрыве в скальных породах образуется столб обрушения, объем пустот в котором примерно равен объему первоначально образованной полости.

После взрыва эти пустоты заполняются пластовой водой. Время заводнения столба обрушения зависит от гидрогеологических условий пласта, в котором проведен взрыв, и может составлять от месяцев до нескольких лет.

Краткие сведения о геолого-гидрогеологических условиях проведения указанных взрывов приведены в **табл. 2**.

Ниже по результатам выполненных исследований проанализированы изменения состояния технологических скважин.

Все взрывы были камуфлетными, т. е. есть без разрушения земной поверхности. На двух объектах наблюдалось просачивание инертных радиоактивных газов по кабелям подрыва на устье скважин, не приведшее к загрязнению территории радионуклидами.

При обустройстве технологической скважины ствол после спуска ядерного устройства на насосно-компрессорной трубе цементируют, а на устье скважины после взрыва устанавливают цементный «воротник» (бетонная тумба). Однако на ряде объектов МЯВ, в том числе перечисленных в табл. 1, устья технологических скважин остались открытыми, что позволило исследовать содержание техногенных радионуклидов в воде, отобранной в стволах этих скважин. Во всех случаях цементный камень в скважинах присутствовал на глубине от нескольких сантиметров до 3 м от оголовка скважины. При первичном отборе проб воды их источником считались атмосферные осадки с фоновым (ЕРФ-естественный радиоактивный фон) содержанием трития.

Таблица 2. Природные условия в местах проведения взрывов

Объект	Природные условия
«Кимберлит-3», «Метеорит-3»	Усть-Ганальчиковская брахисинклиналь Ямбукано-Кочечумской депрессии. Левый берег р. Нижняя Тунгуска в 190 м. Взрывы проведены в аллювиальной свите триаса, сложенной средне- и крупнообломочными туфами с обломками базальта и каменного угля. Ввиду отсутствия вблизи участка взрывов тектонических нарушений туфогенная зона безводная. При бурении скважин водопроявления отсутствовали
«Шпат-2»	Гагаринское поднятие центральной части Тунгусской синеклизы. Правый берег р. Нижняя Тунгуска в 450 м. Взрыв проведен в верхней части девонских отложений, в массиве, сложенном ороговикованными алевролитами и маломощными послойными интрузиями долеритов. Отложения девона являются региональным водоупором
«Метеорит-5»	В район входят: западное окончание Яблонового хребта, отроги Малханского хребта и Арейская впадина. Взрыв осуществлен в Бичурском интрузивном комплексе триаса в Арейской впадине, сложенной массивом бичурских гранитов. Интенсивно проявлена блоковая тектоника. Правый берег р. Арей в 50 м. При бурении скважин водопроявления и водопоглощения отсутствовали

Объекты «Метеорит-3» и «Кимберлит-3». Устья скважин этих объектов расположены на расстоянии 364±1 м друг от друга. Центральные зоны ядерных взрывов, по-видимому, представляют единую гидродинамическую систему, так как, согласно расчетам, радиусы зон трещинообразования ~190 м.

Для отбора проб воды было доступно межтрубное пространство между спускной и обсадной колоннами. Вода из межтрубного пространства прозрачная, без цвета и запаха. По химическому составу воды ультрапресные, хлоридно-карбонатные, магниево-кальциевые, мягкие, щелочные до сильнощелочной в скважине КМ-3. Содержание железа составляет соответственно 1 и 1,69 мг/л, что указывает на протекание коррозионных процессов в стволе скважин.

Объект «Метеорит-5». Устье скважины открыто, видно зеркало воды в спускной и обсадной колоннах. Полевые исследования показали, что в ствол и на устье технологической скважины поступает подземная вода, свидетельствующая о нарушении герметичности цементной забивки и, возможно, обсадной колонны. При отборе воды из ствола спускной колонны до цементного камня уровень воды восстанавливается за 3 ч. Вода слабощелочная (pH ≈ 8), что свидетельствует о растворении (выщелачивании) компонентов цемента.

Объект «Шпат-2». Устье скважины открыто, видно зеркало воды в спускной и обсадной колоннах. Вода из межтрубного пространства мутноватая, буроватая, без запаха. По химическому составу вода ультрапресная, сульфатно-гидрокарбонатная, магниево-кальциевая, мягкая, нейтральная. Микрокомпонентный состав воды характеризуется повышенным содержание железа (35 мг/л). Повышенные значения концентрации железа указывают на наличие коррозионных процессов в стволе скважины.

В **табл. 3** приведены данные о содержании трития в воде, отобранной на устье технологических скважин.

Результаты исследований содержания техногенных радионуклидов в воде указали на наличие трития во всех технологических скважинах. Значения суммарной α- и β-активности воды из технологических скважин М-3 и Км-3 ниже нормативных значений для пресных вод.

Объемная активность трития в воде значительно ниже уровня вмешательства ($7{,}6 \cdot 10^3$ Бк/дм^3), но превышает современное фоновое значение для поверхностных вод (2–4 Бк/дм^3).

Наличие трития в воде указывает на нарушение герметичности цементных забоек технологических скважин и поступление воды из центральной зоны взрыва в ствол скважины.

Согласно расчетам, объемная активность трития в воде на устье скважин не превышает сотых долей процента от значения для воды в ПРОРАО. На устье скважины имеем смесь пластовой воды с водой интенсивных атмосферных осадков, характерных для данных объектов МЯВ. Отсутствие в воде осколочных радионуклидов (^{90}Sr и ^{137}Cs) и ее повышенную минерализацию можно объяснить влиянием атмосферных осадков и сорбционными процессами.

Для анализируемых объектов можно было исключить в прогнозах выход техногенных радионуклидов с подземной водой на устья скважин по колонне ввиду отсутствия не только напорной воды, но и водопроявлений в рабочих пластах, а также наличия в трех случаях обсаженных колонн до забоя скважин.

При сохранении после взрыва приведенных характеристик породы (см. табл. 2) напорное поступление пластовой воды на земную поверхность маловероятно. Наличие трития в воде из технологических скважин может свидетельствовать о возможном уплотнении породы в столбе обрушения с уменьшением пористости, следствием чего является выдавливание воды в ствол технологической скважины или образование искусственных трещин с водоносными горизонтами.

Наличие в воде железа подтверждает наличие процесса коррозии в обсадной колонне и вероятность выхода техногенных радионуклидов в пластовые воды выше центральной зоны взрыва на всех объектах ядерной взрывной технологии.

Проведенные исследования показывают, что герметичность забивки технологических скважин после воздействия взрыва не является надежной.

Для перевода пунктов размещения ОРАО в пункты консервации и ПЗРО потребуется реализация мероприятий по контролю и восстановлению герметичности заколонного цементного камня технологических скважин и их забивки, установленной при взрыве [5].

На всех объектах при отсутствии организованного в местах проведения взрыва радиоэкологического мониторинга МЯВ целесообразно выполнять плановый регулярный контроль за состоянием технологических скважин [6].

Таблица 3. Содержание трития в воде технологических скважин

Место отбора пробы	Объемная активность трития, Бк/л			
	«Кимберлит-3»	«Метеорит-3»	«Метеорит-5»	«Шпат-2»
Спускная колонна	Вода отсутствует	Вода отсутствует	17±2,1	6,3±1,4
Межколонное пространство	62±4,5	548±31	23±3,1	7,5±1,5

Таблица 4. Состав газа в полости, % (об.)

Объект МЯВ	Время после взрыва	H_2	CH_4	C_2H_6	CO	CO_2	N_2	Природная среда в месте взрыва
«Глобус-4»	1 сут	31,2	53,4	0,43	13,5	0	1,33	Аргиллиты с прослоями каменного угля
	4 сут	50,9	19,8	0,23	24,8	2,51	1,80	
«Глобус-2»	2,5 года	22,4	2,05	0,32	0,28	63,8	3,64	Карбонаты водоносные
«Тахта-Кугульта»	1 ч	30,0	54,8	0,51	13,5	0	1,21	Песчаники глинистые газонасыщенные
	2 ч	30,2	54,9	0,42	13,2	0	1,36	
	3 ч	31,2	53,6	0,43	13,5	0	1,33	
	5 ч	50,1	19,8	0,23	24,7	2,51	1,80	

Таблица 5. Радиоактивность нефтяного газа

Объект	Объемная активность, Бк/м^3		
	Максимальная в скважинах		В газе с промысла
	После проведения взрыва	В настоящее время	
А	$1{,}6\cdot10^7$	$3\cdot10^4$	$(4{,}3\div5{,}9)\cdot10^3$
Б	$4{,}5\cdot10^7$	$4{,}6\cdot10^3$ – эксплуатационная скважина $4{,}5\cdot10^5$ – технологическая скважина	$(0{,}02\div16)\cdot10^3$

Оценка возможности использования углеводородного газа в городских котельных

На территории Российской Федерации 20 мирных ядерных взрывов проведены на пяти нефтяных и газовых месторождениях, что обусловило загрязнение углеводородной продукции газообразными радионуклидами [5–8].

При подземном взрыве в горной породе за доли секунды в ядерном заряде развивается давление в миллионы атмосфер при температуре в миллионы градусов. Образуется огненная сфера. Плотность первоначально выделившейся энергии настолько высокая, что перенос ее в окружающую заряд плотную среду происходит преимущественно за счет лучистой теплопроводности, т. е. благодаря механизму, действующему в самых горячих областях звезд. При такой высокой температуре вещество заряда превращается в ионизованный газ, а по окружающей породе распространяется тепловая волна. Поэтому ядерное устройство и окружающий грунт испаряются [1].

По мере того, как охватываются все новые слои породы, плотность энергии падает, и при снижении температуры примерно до 300 тыс. градусов тепловая волна превращается в ударную. Под воздействием мощной ударной волны новые слои породы испаряются, плавятся, а на более далеких расстояниях от центра взрыва порода дробится и растрескивается.

При камуфлетном взрыве газовый «пузырь», образованный продуктами испарения, расширяется, пока его давление не станет меньше литостатического давления на данной глубине. Полость, возникшая в результате взрыва, имеет в это время форму, близкую к сферической. На ее границе находится слой расплавленной породы толщиной 10–15 см, который удерживает образовавшиеся газы, в том числе радиоактивные.

По мере охлаждения газов в полости наиболее тугоплавкие компоненты конденсируются в капли и оседают на дно полости, образуя линзу первичного расплава. Сверху последнюю покрывает толстый слой расплавленной породы, стекающей со стенок полости и содержащей меньше осколков деления.

При падении давления в полости ниже литостатического в большинстве случаев происходит ее обрушение.

Химический состав газовой фазы в сформировавшейся полости зависит как от состава среды, в которой взрывают заряд, так и времени после взрыва (**табл. 4**).

Тритий, как и другие изотопы водорода, первоначально образует молекулярные формы водорода HT и оксида водорода HTO. Со временем практически весь тритий (>90 %) переходит в форму оксида, а при взрывах в коллекторах природных углеводородов наряду с оксидом образуются различные углеводородные соединения от газообразного метана CH_3T до тяжелых нефтяных фракций.

Ниже приводятся результаты исследований по двум действующим нефтяным объектам, на которых мирные ядерные взрывы были проведены непосредственно в нефтяном коллекторе. Извлекаемый попутный нефтяной газ содержит тритий. В **табл. 5** указаны экспериментальные значения объемной активности трития при н.у. (~20 °С, ~750 мм Hg). Данные, полученные при проведении взрывов, пересчитаны на 2019 г. (период полураспада 12,35 лет).

Нормами радиационной безопасности установлены предельно допустимые концентрации трития для питьевой воды и атмосферного воздуха [9]. Нормативы допустимого содержания трития в природном углеводородном газе отсутствуют. Существовавший при реализации программы МЯВ норматив допустимого содержания трития в природном газе ($1{,}6\cdot10^{-8}$ Ки/л = $5{,}92\cdot10^5$ Бк/м^3 согласно нормативу Минздрава СССР № 120/3-72) был отменен (письмо Минздрава России от 09.12.2003 г. № 1100/3295-03-112).

Таким образом, оценка возможности использования природного газа, содержащего тритий, может быть выполнена только по критерию ожидаемой индивидуальной годовой эффективной дозы облучения, которая при планируемом виде использования газа не должна превышать 10 мкЗв согласно п. 3.11.1 ОСПОРБ-99/2010 [10].

Годовую эффективную дозу облучения населения (Зв/год) за счет поступления трития ингаляционно, перорально и через кожные покровы при выбросе из *i*-го источника рассчитывали по уравнениям, изложенным в РБ-106-15 [11].

Исследования выполнены для условий использования нефтяного газа в качестве топлива котельных городов и сжигания газа в факеле.

Исходные данные по источникам выброса трития в форме аэрозоля HTO для прогнозирования приведены в **табл. 6**. При этом использованы метеоданные регионов расположения объектов МЯВ. Принятое для расчетов количество сжигаемого газа на факеле объекта А (объект МЯВ) превышает реальное на порядки, что позволило оценить радиационные последствия при возникновении неуправляемого факела при аварийной разгерметизации газопровода, скважины или промыслового оборудования.

Таблица 6. Характеристика источников выброса аэрозолей трития (паров НТО)

Показатель	Объекты (источники) выброса трития (аэрозоль НТО)		
	А		Б
	Вентиляционная труба ТЭЦ	Труба на факел компрессорной скважины	23 вентиляционные трубы 7 котельных
Технология образования выброса	Сжигание газа в топке	Сжигание избытка газа малого давления в факеле	Сжигание газа в топках
Высота трубы, м	180	35	19,3 (12÷21)
Диаметр устья трубы, м	6	0,3	0,348 (0,313÷0,414)
Годовое потребление газа, м^3	$1{,}44 \cdot 10^7$	$3{,}42 \cdot 10^7$	$1{,}26 \cdot 10^7$
Объемная активность трития в газе, Бк/м^3	$5 \cdot 10^3$	$6{,}9 \cdot 10^3$	$200 \cdot 10^3$
Среднегодовая температура, °С	4		0,7
Среднегодовая скорость ветра, м/с	2,7		3,2
Среднегодовое количество осадков, мм	464,5		773

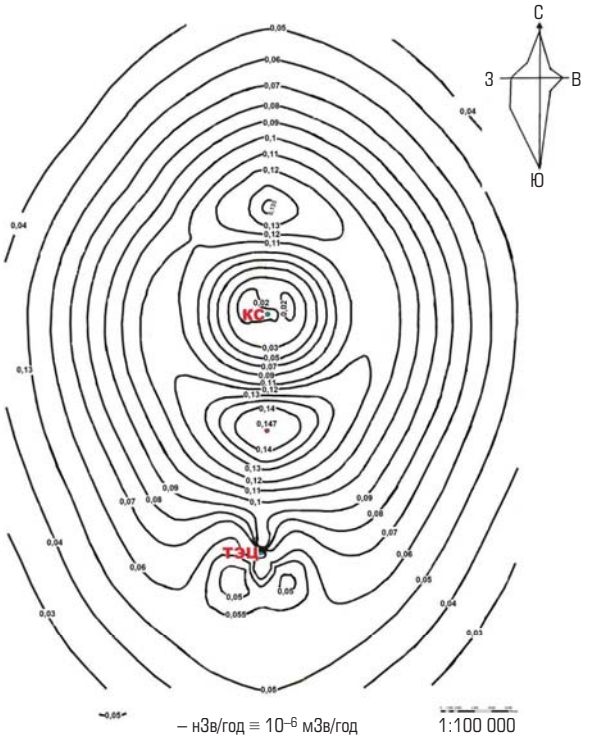

Рис. 1. Изодозы годового облучения населения тритием на объекте А, нЗв

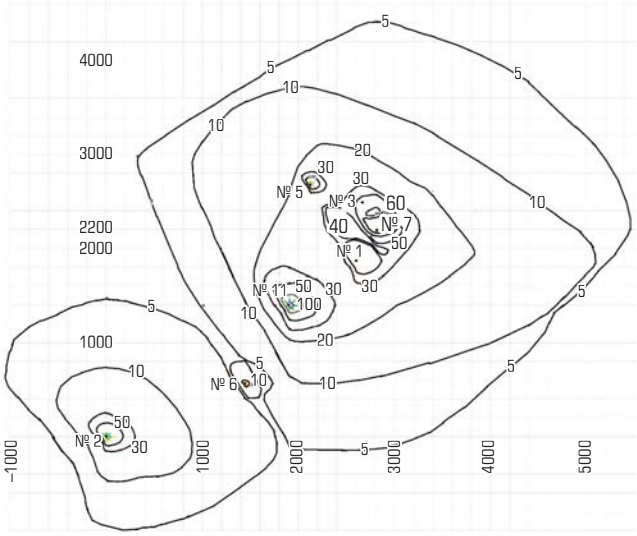

Рис. 2. Суммарные индивидуальные изодозы в городе от выбросов трития котельными города, нЗв

Объект А находится в сельскохозяйственном районе, поэтому в годовых дозах учитывают суммарные атмосферное облучение и потребление местных продуктов.

Результаты расчетов возможных доз облучения населения на объекте А представлены на **рис. 1**. Уровень ожидаемых доз облучения населения, обусловленных выбросами трития в атмосферу как в непосредственной близости от источников выброса, так и по мере удаления от них, оценивают десятыми и сотыми долями нЗв (1 нЗв = 10^{-3} мкЗв). Максимальное значение годовой индивидуальной дозы облучения населения составляет 0,147 нЗв, что меньше допустимого норматива (10 мкЗв) более чем на 4 порядка.

Конфигурация изодозного поля характеризуется относительной вытянутостью в меридиональном направлении, что обусловлено формой среднегодовой розы ветров со значительным преобладанием ветров южного и северного румбов.

Структура поля характеризуется наличием локальных участков относительно повышенных и относительно пониженных значений доз, пространственно тяготеющих к источникам выброса (расстояние между источниками выброса 28,8 км), и общим снижением уровня доз по мере удаления от локальных участков относительно повышенных значений.

На компрессорной станции наличие низкой трубы привело к ограниченному распространению трития. Максимальное значение дозы (0,135 нЗв) подтверждает безопасные условия эксплуатации месторождения, в том числе при аварийном выбросе газа на промысле.

Результаты расчетов возможных доз облучения населения на объекте Б (объект МЯВ) представлены на **рис. 2**.

Оценка риска использования газа, содержащего повышенную концентрацию трития ($2 \cdot 10^5$ Бк/м^3), свидетельствует:

- максимальные значения индивидуальных доз годового непрерывного воздушного облучения наблюдаются на границах

СЗЗ котельных; наибольшая составляет 0,405 мкЗв, что в ~25 раз ниже допустимого норматива;

- максимальные значения индивидуальных доз годового непрерывного воздушного облучения за пределами котельных не превышают 0,25 мкЗв, что в ~40 раз ниже допустимого норматива;
- годовая коллективная доза облучения населения города тритием не превысит ~3,8 чел.·мЗв;
- за предполагаемые 30 лет использования газа с месторождения в существующих котельных города радиационные последствия у населения маловероятны (3755,5 чел.×мкЗв× 30 лет×0,05 Зв$^{-1}$ = 0,57 чел.).

Согласно выполненным расчетам, использование нефтяного газа с условно принятой объемной активностью трития $2\cdot10^5$ Бк/м^3 обусловливает максимальную индивидуальную дозу облучения (0,405 мкЗв), в 25 раз меньшую допустимого норматива (10 мкЗв). Радиационные последствия маловероятны. Предельное значение дозы достигается при объемной активности трития в газе $2\cdot10^5\cdot25 = 5\cdot10^6$ Бк/м^3.

Принимая значение коэффициента безопасности с учетом возможных климатических изменений и увеличения числа или реконструкции котельных равным 10, получаем допустимую объемную активность трития в газе для использования в котельных города $5\cdot10^5$ Бк/м^3, значение контрольного уровня составит $2\cdot10^5$ Бк/м^3.

Нормами радиационной безопасности [9] установлены предельные концентрации трития в питьевой воде и атмосферном воздухе:

- допустимое содержание в питьевой воде (уровень вмешательства) $7{,}6\cdot10^3$ Бк/кг;
- допустимая среднегодовая объемная активность в форме паров воды в воздухе для персонала $4{,}4\cdot10^5$ Бк/м^3;
- допустимая среднегодовая объемная активность в газообразной форме в воздухе для персонала $4{,}4\cdot10^9$ Бк/м^3;
- допустимая среднегодовая объемная активность в воздухе для населения $1{,}9\cdot10^3$ Бк/м^3.

Последняя величина ($1{,}9\cdot10^3$ Бк/м^3) одновременно является критерием отнесения газообразных отходов к радиоактивным [10], и добываемый на промыслах нефтяной газ соответствует категории газообразных РАО. С другой стороны, активность газа на месторождениях на порядок меньше допустимого норматива объемной активности трития в газообразной форме в воздухе для персонала группы А.

Для планирования безопасной эксплуатации месторождений, где были проведены МЯВ [12], целесообразно пересмотреть критерии РАО для газообразных отходов.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что герметичность забойки технологических скважин после воздействия взрыва не является надежной. Целесообразно установить плановый регулярный контроль за состоянием технологических скважин на всех объектах МЯВ при отсутствии организованного в местах проведения взрывов радиоэкологического мониторинга.

Степень и интенсивность «притока» трития будут определять первоочередность и объем изоляционно-ликвидационных работ в скважинах.

Использование попутного нефтяного газа с нефтяных месторождений, на которых были проведены ядерные взрывы, в котельных с объемной активностью до $2\cdot10^5$ Бк/м^3 допустимо, так как индивидуальные годовые дозы для населения от выбросов трития котельными города значительно ниже допустимого норматива в 10 мкЗв. Допустимое содержание трития в газе сопоставимо с отмененным нормативом 1972 г.

Критерий отнесения газообразных отходов, содержащих тритий, к РАО не коррелирует с данными санитарных нормативов допустимого содержания трития в воздухе для населения, так как равен допустимой концентрации трития в воздухе населенных пунктов и на порядок ниже допустимой концентрации трития в воздухе для персонала.

Библиографический список

1. *Васильев А. П., Дубасов Ю. В., Ильичев В. А., Касаткин В. В., Мясников К. В.* и др. Ядерные взрывные технологии: эксперименты и промышленные применения. – Снежинск : РФЯЦ-ВНИИТФ, 2017. – 507 с.
2. О проведении первичной регистрации радиоактивных отходов : Постановление Правительства РФ от 25.07.2012 г. № 767. URL: http://docs.cntd.ru/document/902360272 (дата обращения: 15.02.2020).
3. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон от 06.07.2011 г. № 190-ФЗ (с изм. на 08.12.2020). URL: http://docs.cntd.ru/document/902288595 (дата обращения: 15.02.2020).
4. НП-103-17. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Требования к обеспечению безопасности пунктов размещения особых радиоактивных отходов и пунктов консервации особых радиоактивных отходов» : утв. приказом Ростехнадзора от 10.10.2017 № 418. URL: http://docs.cntd.ru/document/542609759 (дата обращения: 15.02.2020).
5. *Камнев Е. Н., Касаткин В. В., Мамонов Б. П., Ильичев В. А.* Основные положения радиационной безопасности при выводе из эксплуатации объектов проведенных ядерных взрывов в мирных целях // Безопасность ядерных технологий. Обращение с радиоактивными отходами : сб. VII Междунар. конф. – СПб. : Pro Атом, 2004. С. 256–258.
6. *Камнев Е. Н., Ильичев В. А., Латышев В. Е.* Подземные ядерные взрывы – проблема окончательного захоронения радиоактивных продуктов // IV Междунар. ядерный форум. – СПб. : Атомпроф, 2009. С. 147–149.
7. *Касаткин В. В., Камнев Е. Н., Ильичев В. А.* Радиоэкологические условия длительной эксплуатации нефтяного месторождения после проведенных ядерных взрывов // Топливно-энергетический комплекс России: региональные проблемы : сб. тр. 5-го Междунар. форума. – СПб., 2005. С. 149–154.
8. *Касаткин В. В., Камнев Е. Н., Ильичев В. А.* и др. Особые условия и требования при эксплуатации объектов топливно-энергетического комплекса, на которых были проведены подземные ядерные взрывы // Проблемы обеспечения радиационной безопасности в ТЭК : сб. матер. 4-го Междунар. форума. – СПб., 2004. С. 256–263.
9. СанПиН 2.6.1.2523–09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). – М. : Изд-во стандартов, 2009. – 55 с.
10. Санитарные правила 2.6.1.2612–10. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) (с изм. от 16.09.2013 г.). – Минздрав России, 2010. – 79 с.
11. РБ-106-15. Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух : руководства по безопасности в области использования атомной энергии. – М. : ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2015. – 75 с.
12. *Касаткин В. В., Ильичев В. А., Мясников К. В., Клишин В. И.* Состояние обеспечения радиационной безопасности объектов промышленных ядерных взрывов, проведенных на предприятиях ТЭК в Российской Федерации // Проблемы обеспечения радиационной безопасности в ТЭК : матер. конф. – СПб., 2003. С. 231–237. ГЖ