

УДК 623.454.82

## ДОСТИЖЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ВЗРЫВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ В МИРНЫХ ЦЕЛЯХ



**В. А. ИЛЬЧЕВ,**  
ведущий научный сотрудник,  
канд. хим. наук



**В. В. КАСАТКИН,**  
начальник лаборатории,  
канд. техн. наук,  
Kasatkin.V.V@vnipt.ru



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



**А. И. ЛАРИНА,**  
ведущий инженер

Приведено упоминание о первом ядерном взрыве в промышленных целях, который был осуществлен на Грачевском нефтяном месторождении с целью интенсификации добычи нефти 55 лет назад. Изложены оригинальные данные о развитии и современном состоянии радиационной обстановки на объекте ядерной взрывной технологии и радиоактивном загрязнении добываемой продукции (нефти, газа и попутной воды) при проведении взрыва непосредственно в теле нефтяного коллектора. Подтверждена высокая эффективность использования ядерной взрывной технологии на данном объекте. Доказано, что с использованием такой технологии могут быть достигнуты не только интенсификация текущей добычи нефти, но и существенное увеличение коэффициента нефтеотдачи на месторождениях подобного типа. В процессе многолетних мониторинговых исследований показано, что радиационная безопасность эксплуатации объекта «Бутан» обеспечена в полном объеме.

**Ключевые слова:** подземный ядерный взрыв, добыча нефти, интенсификация, радионуклиды, тритий, радиационная безопасность.

АО «ВНИПИпромтехнологии», Москва, Россия

### Введение

В 2020 г. исполнилось 55 лет с момента осуществления первых ядерных взрывов в промышленных целях, выполненных вне ядерных полигонов. Это были взрывы двух ядерных зарядов (30 марта и 10 июня 1965 г.) на действующем Грачевском нефтяном месторождении с целью интенсификации добычи нефти. С этой же целью там же 16 и 25 июня 1980 г. (40 лет назад) были проведены еще два взрыва [1]. Автором технологии

применения подземных ядерных взрывов для нефтедобычи и научным руководителем работ был профессор Московского института нефтехимической и газовой промышленности им. академика И. М. Губкина (МИНХиГП) А. А. Бакиров [2]. Взрывы осуществляли по проекту, выполненному специалистами института ПромНИИпроект (ныне АО «ВНИПИпромтехнологии»). Эффективность проведенных взрывов оценивали сотрудники МИНХиГП, АО «ВНИПИпромтехнологии», научные и производственные организации Республики Башкортостан. Радиационные последствия в 1965 г. исследовали специалисты Радиевого института им. В. Г. Хлопина и Института прикладной геофизики. В последующие годы радиационные исследования осуществляли специалисты АО «ВНИПИпромтехнологии».

### ОГАНЕЗОВ ЭДУАРД ТИГРАНОВИЧ



Родился в г. Лагодеки Грузинской ССР в 1919 г.

В 1941 г. окончил Тбилисский институт инженеров железнодорожного транспорта по специальности «Постройка железных дорог и путевое хозяйство».

В начале войны окончил курсы лейтенантов при Военно-инженерной академии им. В. В. Куйбышева и воевал на Калининском, Северо-Западном и Первом Украинском фронтах. Участвовал в обороне Москвы.

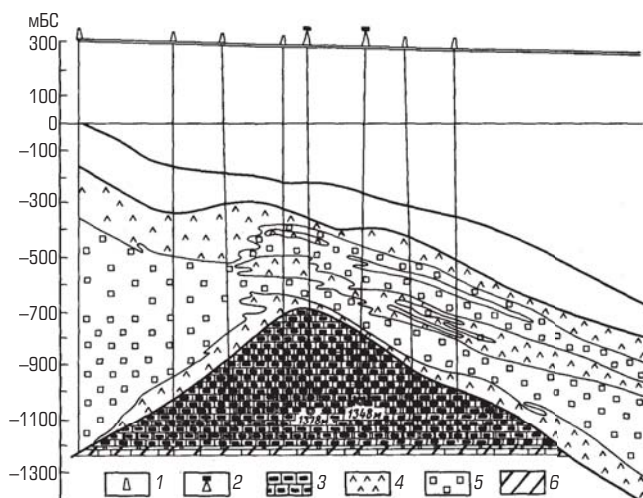
После войны, в 1946 г., поступил на работу в институт «ВНИПИпромтехнологии» на должность инженера в отдел Генплана и транспорта, став затем главным инженером проекта БГИ института.

Эдуард Тигранович принимал непосредственное участие в проектировании строительства крупнейшего Навоийского горно-металлургического комбината в Узбекистане, занимаясь решением технически сложных вопросов: определение состава, дислокации и рентабельности предприятий комбината в условиях безводных пустынных районов; энерго- и водоснабжение, транспорт, городское строительство.

При участии Эдуарда Тиграновича были разработаны основные технические направления внедрения нового высокопроизводительного оборудования для открытых работ, новых высокоэффективных технологических схем переработки сырья и др. Много сил и энергии Эдуард Тигранович вложил в проектирование и ведение авторского надзора при строительстве золотодобывающего и золотоизвлекательного предприятия Мурунтау.

За военные и трудовые заслуги Эдуард Тигранович Оганезов награжден орденами Красной Звезды, Трудового Красного Знамени, медалью «За победу над Германией». В 1968 г. ему присвоено почетное звание «Заслуженный строитель Узбекской ССР», а в 1980 г. — звание лауреата Ленинской премии СССР за создание крупномасштабного производства аффинированного золота с применением сорбционной технологии на базе бедных руд месторождения Мурунтау в Узбекистане.

Занесен в Книгу Почета института.



**Рис. 1. Геологический профиль Грачевского месторождения:**  
 1 – эксплуатационные скважины; 2 – технологические скважины;  
 3 – нефтяной коллектор; 4 – ангидриты; 5 – соли; 6 – зона окисленной нефти

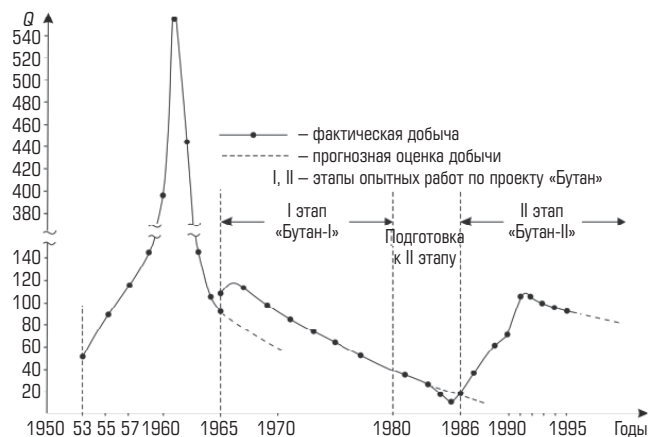
### Характеристика месторождения

Разработка Грачевского месторождения была начата в марте 1958 г. и до 1982 г. ее осуществляли в условиях естественного режима растворенного газа с проявлением гравитационных сил, т. е. без поддержания пластового давления. К началу первой серии взрывов месторождение было полностью разбурено по сетке 200×200 м, и в эксплуатации находилось 40 скважин. По этой технологии на 01.01.1982 г. было добыто 2,356 млн т нефти, что составляло 22,5 % от утвержденных балансовых и 84,2 % от извлекаемых запасов. Попутно с нефтью было добыто 503,7 млн м<sup>3</sup> газа.

Месторождение расположено в Мелеузовском районе Республики Башкортостан в 15 км от г. Мелеуза, в 45 км от г. Ишимбай. В тектоническом отношении месторождение приурочено к нижнепермскому погребенному рифовому массиву, который находится в пределах западного борта предуральского предгорного прогиба. Месторождение морфологически представляет собой одиночный конусообразный массив округлой изометрической формы (рис. 1). Длина массива по изогибсе 1200 м составляет 1,9 км, ширина 1,4 км. Крутизна склонов массива 25–55°.

Рифообразующие породы представлены известняками, содержащими 49,2–65 % кальцита, 21,5–43 % доломита и 0,2–0,3 % пирита. Нерастворимый остаток в пределах 0,3–2 %. Основная часть массива (~75 %) сложена плотными непроницаемыми породами. Поровые и порово-кавернозные различия пород залегают в виде гидродинамически связанных между собой линз. Микротрещиноватость пород развита на локальных участках.

Залежь нефти в рифовых отложениях является массивной, отделенной от подошвенной воды зоной окисленной нефти. Глубина залегания кровли продуктивных отложений изменяется по площади от 1020 до 1700 м. За нижнюю границу продуктивной нефтеносности принимают кровлю зоны окисленной нефти, которая является надежным гидродинамическим экраном между водоносной и нефтеносной частями разреза.



**Рис. 2. Среднегодовая добыча нефти Q (тыс. т) на Грачевском месторождении**

В результате реализованного режима эксплуатации месторождения непрерывно снижалось пластовое давление. Начальное пластовое давление, приведенное к отметке водонефтяного контакта (ВНК), составляло 14,1 МПа (144 кгс/см<sup>2</sup>), среднее по залежи давление насыщения 10,8 МПа (110 кгс/см<sup>2</sup>). К 1965 г. пластовое давление снизилось до 4,3 МПа (44 кгс/см<sup>2</sup>), в 1980 г. оно составляло 0,3–2,5 МПа (3–25 кгс/см<sup>2</sup>).

### Оценка эффективности проведенных взрывов

Все взрывы осуществляли в нефтяном коллекторе.

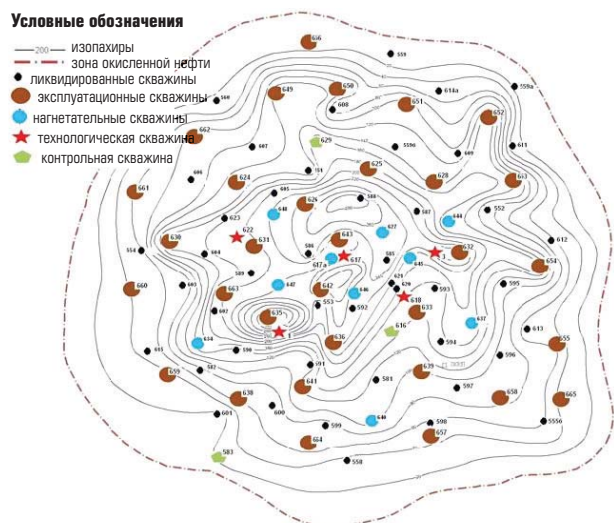
После первой серии взрывов (1965 г.) в результате возникновения новой системы трещин в рифовом массиве, по-видимому, были созданы благоприятные условия для гравитационного разделения нефти и газа, перетока свободного газа вверх по структуре и образования вторичной газовой шапки.

Положительное воздействие взрывов отмечали на расстоянии до 400 м и более, увеличение дебита было зафиксировано по 20 скважинам.

Существенно замедлился темп падения пластового давления в залежи за счет подключения к разработке изолированных линз, низкопроницаемых пропластков. Среднемесячный коэффициент естественного падения добычи нефти за одинаковые интервалы времени после осуществления взрывов составил менее 0,75 % против 2,5 % до воздействия взрывов (рис. 2). Была отмечена асимметричность воздействия взрыва. На участках, характеризующихся более высокой плотностью горных пород, наблюдалось большее увеличение дебитов скважин [3].

Уже к 1980 г., до начала работ по II этапу, дополнительная добыча нефти на месторождении за счет воздействия взрыва составила около 300 тыс. т [1, 4].

Целью II этапа работ (взрывы в 1980 г.) было увеличение площади охвата залежи, которая после первых взрывов достигла свыше 40 %, и подготовка к переходу на другой, более эффективный режим эксплуатации – так называемый режим газовой шапки с последующей закачкой в верхнюю часть залежи газа высокого давления. Тем более что взрывами были созданы благоприятные условия для реализации этого режима, а именно: образована сеть горизонтальных и вертикальных трещин, способствующих



**Рис. 3. Существующая система разработки**

относительному выравниванию проницаемости коллектора и гравитационному разделению жидкой и газообразной фаз.

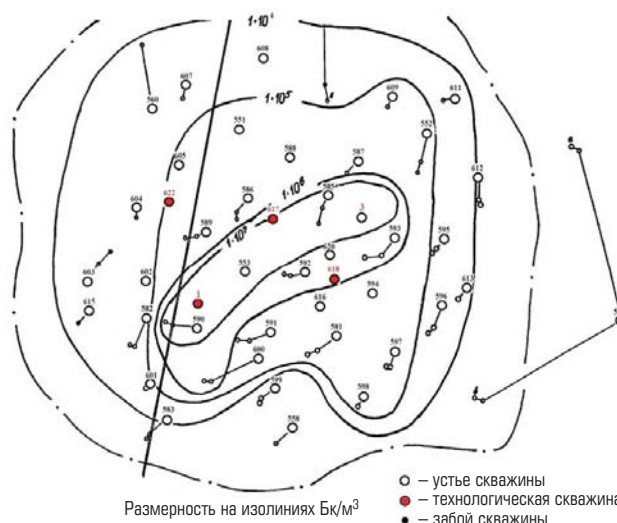
В процессе подготовки месторождения в 1981–1985 гг. к его доразработке методом «вытеснения нефти газом высокого давления» были ликвидированы все старые скважины и пробурены новые (рис. 3).

Технологическая схема создания рабочего пластового давления предусматривала вначале закачивание оторочки смешивающего материала – сжиженных углеводородных газов и стабильного газового конденсата. В период с 1983 по 1986 г. в пласт в качестве оторочки на границе газонефтяного контакта (ГНК) была закачана широкая фракция легких углеводородов (ШФЛУ) в количестве 371,4 тыс. т. Затем в пласт подавали сухой газ, с помощью которого проталкивали по пласту оторочку смешивающегося материала. Оторочку и сухой газ нагнетали в свободную часть рифа через систему нагнетательных скважин. После прекращения подачи сухого газа реализована технологическая схема сепарации попутного газа на Грачевской сепарационной установке нефти (СУН) и возврата его в пласт после компрессорной станции, в том числе с использованием попутного газа со Старо-Казанковского нефтяного месторождения. Нефть отбирают эксплуатационными скважинами.

В 1986 г. после переустройства промысла была начата закачка газа, в результате чего месячная добыча нефти в целом по залежи увеличилась в 5–6 раз. По прогнозным оценкам ожидается, что в результате выполненных работ коэффициент нефтеотдачи увеличится до 36–38 % [1], а дополнительная добыча нефти составит 0,82–1,03 млн т.

В настоящее время силами специалистов ОАО «Башнефть-Добыча» успешно продолжается безопасная и эффективная эксплуатация Грачевского месторождения по добыче нефти, полностью отвечающая нормативным требованиям радиационной чистоты.

Имевшее место снижение добычи нефти в первые годы после взрывов второй очереди объясняется тем, что в этот период выполняли подготовительные работы и переоборудование скважин для закачки газа.



**Рис. 4. Распределение трития по месторождению в 1982 г.**

Из графика, приведенного на рис. 2, видно, что если бы разработка месторождения продолжалась без воздействия взрывов, на режиме растворенного газа, то его эксплуатация завершилась бы уже в 1980 г.

Продолжающаяся эксплуатация Грачевского нефтяного месторождения, которое после закачки газа высокого давления перешло в статус газонефтяного, равносильна вводу в эксплуатацию нового объекта, но без неизбежных затрат на бурение скважин, создание соответствующей инфраструктуры и т. д.

### Радиационная обстановка при взрывах

Ядерные взрывы, осуществленные на Грачевском месторождении, были камуфлетными. Выход радиоактивных газов в атмосферу наблюдался в основном в период вскрытия скважин и планового выпуска нефтяного газа в процессе исследований.

Радиационная обстановка после взрывов 1965 и 1980 гг. была отличной от фоновой, но почти одинаковой. Наиболее характерно поведение радионуклидов после проведения взрывов в 1980 г., в период негерметичности ряда эксплуатационных скважин.

Радиоэкологическая обстановка в зависимости от состояния скважин может быть подразделена условно на три основных этапа [5–11].

**Первый этап**, послевзрывной, с одной стороны, характеризовался негерметичностью скважин промысла, с другой – высокой объемной активностью инертных радиоактивных газов (ИРГ) и оксида углерода CO в нефтяном газе. В этот период наблюдали повышенные значения мощности дозы гамма-излучения на фонтанной арматуре скважин промысла, незначительное (ниже допустимых нормативов) наличие в воздухе приустьевых площадок ИРГ и повышенные концентрации CO.

В течение трех лет после взрыва ИРГ, тритий и CO распространялись по всей территории месторождения в пределах границы ГНК (рис. 4).

На первом этапе с нефтяным газом из недр была извлечена значительная доля первоначально образовавшихся ИРГ. Кроме того, исходная объемная активность газообразных радионуклидов,

за счет разбавления природным газом вследствие распространения по «газовой шапке» и естественного распада, уменьшилась на несколько порядков до величин, значительно ниже принятых на тот период допустимых нормативов для углеводородной продукции и атмосферного воздуха в населенных пунктах.

Одновременно происходило снижение объемной активности трития в нефтяном газе вследствие его перераспределения на границе ГНК. Объемная активность трития так же, как и ИРГ, снизилась на несколько порядков (рис. 5). Однако извлечение его из недр составило лишь несколько процентов от оставшегося в зоне взрыва. Тритий остался в недрах в основном в растворенной форме в нефти, на границе ГНК.

**Второй этап** развития радиационной обстановки обусловлен ликвидацией старых скважин, бурением и освоением новых, в том числе некоторых с забоем в подошвенной воде ниже зоны окисленной нефти.

Этот этап характеризовался частичным поступлением воды в зоны ядерных взрывов, где происходило ее загрязнение осколочными радионуклидами.

Закачиваемая вода, в том числе содержащая техногенные радионуклиды, реликтовая вода из зон взрыва и вода из подошвенного водоносного горизонта скапливалась на подошве месторождения.

При последующем освоении новых скважин добываемая продукция содержала воду со следами радионуклидов, что привело к загрязнению внутренних поверхностей устьевого оборудования ряда эксплуатационных скважин и повышенным значениям мощности дозы гамма-излучения на устье скважин, отличным от естественного радиационного фона данного региона в 2–3 раза. На отдельных скважинах мощность дозы гамма-излучения временно достигала 0,6 мкЗв/ч.

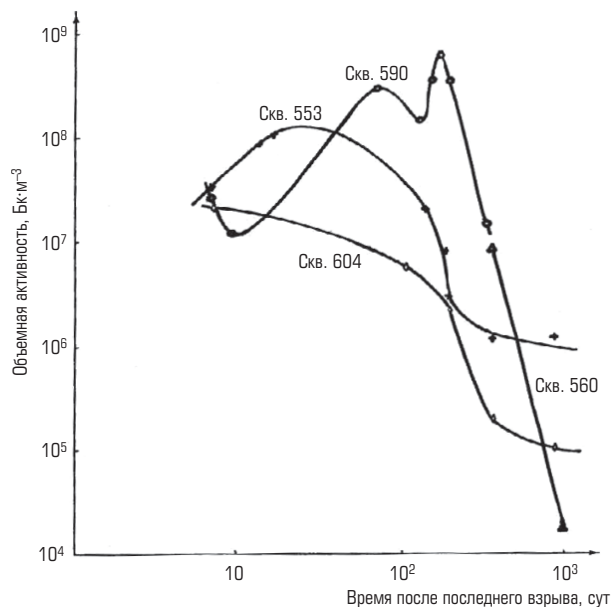
**Третий этап** отслеживается после прекращения добычи обводненной продукции и продолжается до настоящего времени. Радиационная обстановка соответствует естественному фону (мощность дозы гамма-излучения на промысле, в том числе по данным 2020 г., составляет 0,1–0,2 мкЗв/ч).

### Загрязнение воды техногенными радионуклидами

Строение массива месторождения, свойства перекрывающих пород и расположение водоносных горизонтов исключают выход радиоактивных продуктов взрыва за пределы продуктивного горизонта при условии герметичности действующих и ликвидированных скважин.

Основным способом добычи воды из продуктивного горизонта для ее исследований явился отбор проб воды с забоев скважин желонкой. В период освоения вновь пробуренных скважин отбор воды частично осуществляли сепарацией из добываемой нефти. Минерализация воды при этом в разных пробах отличалась в десятки раз.

Все отобранные в период 1980–1982 гг. пробы воды из разных скважин месторождения содержали тритий. Закономерность загрязнения тритием в зависимости от расположения скважины не наблюдается. Объемная активность воды по тритию колебалась от  $1,7 \cdot 10^7$  до  $6,5 \cdot 10^3$  Бк/л.



**Рис. 5. Изменение содержания трития в газе отдельных скважин после 1980 г.**

В период 1985–1988 гг. нефть, извлекаемая из отдельных скважин, содержала воду. Пробы этой воды, а также вода, эпизодически извлекаемая в последующем с забоев скважин, содержала  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^3\text{H}$  с максимальными значениями объемной активности соответственно  $1,5 \cdot 10^3$ ,  $2,3 \cdot 10^3$  и  $1,2 \cdot 10^5$  Бк/л. Вынос этих радионуклидов не повлиял на радиационную обстановку на промысле и загрязнение оборудования ввиду незначительных объемов выхода воды.

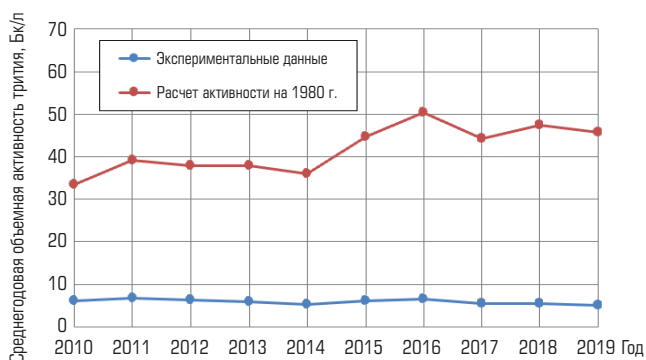
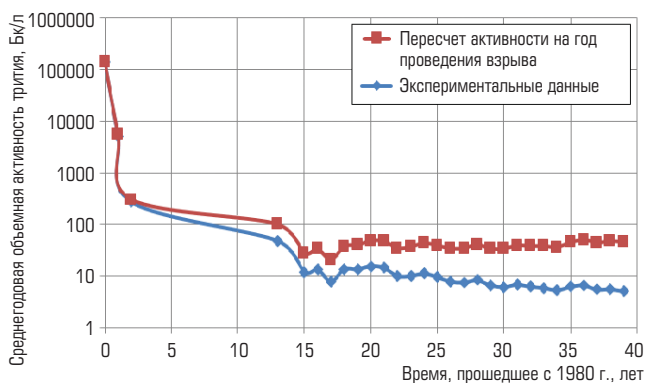
Таким образом, подтверждается, что основным источником загрязнения попутной воды является техногенная вода, поступающая в столбы обрушения при кислотной и термической обработке скважин и при бурении новых скважин.

### Загрязнение нефти техногенными радионуклидами

Загрязнение нефти техногенными осколочными радионуклидами обусловлено наличием в нефти водной фазы и взвеси твердых компонентов. После обезвоживания и обессоливания в «сухой» нефти, т. е. освобожденной от водной фазы, содержание радионуклидов щелочных и щелочноземельных элементов в жидких углеводородах, извлеченных из центральной зоны взрыва (полости или столба обрушения), не превышает  $10^3$  Бк/л. За пределами центральной зоны взрыва эти величины, как правило, на порядок меньше. Значения коэффициентов распределения изотопов цезия и стронция между нефтью и водной фазой для разных типов нефти и водных сред, а также между нефтью и породой находятся в пределах  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  мл/мл (мл/г).

До 1979 г. систематический контроль нефти на содержание трития не проводили.

Впервые выполненные в 1979 г. исследования показали, что в большинстве скважин месторождения пробы нефти содержат тритий ( $\leq 4 \cdot 10^3$ – $1,9 \cdot 10^5$  Бк/л). В первые дни после проведения ядерных взрывов 1980 г. содержание трития в нефти существенно увеличилось. В дальнейшем наблюдалось эпизодическое



**Рис. 6. Изменение среднегодовой объемной активности трития во времени**

появление трития в пробах нефти как по площади расположения эксплуатационных скважин, так и во времени при исследовании нефти какой-либо одной скважины. Максимальные значения объемной активности трития в нефти составляли  $5,6 \cdot 10^5$  Бк/л. После закачки газоконденсата и природного газа активность нефти существенно снизилась.

**Библиографический список**

1. Ядерные испытания СССР / под ред. В. Н. Михайлова. – Саров : РФЯЦ–ВНИИЭФ, 2000. Т. 4. Использование ядерных взрывов для решения народнохозяйственных задач и научных исследований. – 200 с.
2. Применение подземных ядерных взрывов в нефтедобывающей промышленности / под ред. А. А. Бакирова, Э. А. Бакирова. – М.: Недра, 1981. – 198 с.
3. Приходько Н. К., Алешина О. Н. Исследование особенностей действия взрыва на карбонатный коллектор нефтяного месторождения // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Горное дело. – М.: ЦНИИАтоминформ, 1978. Вып. 2(27).
4. Адамский В., Клишин В., Смирнов Ю. Советская программа подземных ядерных взрывов в мирных целях: надежды и результаты // Бюллетень по атомной энергии. 2005. № 1. С. 40–45.
5. Кедровский О. Л. Применение камуфлетных ядерных взрывов для интенсификации добычи нефти // Peaceful Nuclear Explosions II : Proceedings of a Panel on the Practical Applications of the Peaceful Uses of Nuclear Explosions Organised by the International Atomic Energy Agency and Held in Vienna. – Vienna, 1971. P. 105–114.
6. Израэль Ю. А., Прессман А. Я., Батаев К. Г., Стукин Е. Д. Распространение радиоактивных продуктов в зоне разрушенной горной породы при камуфлетном ядерном взрыве и расчет возможного загрязнения нефти при интенсификации ее добычи // Peaceful Nuclear Explosions II : Proceedings of a Panel on the Practical Applications of the Peaceful Uses of Nuclear Explosions Organised by the International Atomic Energy Agency and Held in Vienna. – Vienna, 1971. P. 283–293.
7. 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.

**Активность трития в газе**

Основной проблемой при эксплуатации месторождения является содержание трития в извлекаемом газе. Из данных, представленных на рис. 6, следует, что за первые 3 года после взрывов 1980 г. объемная активность трития в газе уменьшилась на несколько порядков за счет распространения по всему объему «газовой шапки» и, по-видимому, растворения в нефти на границе ГНК. После существенного разбавления трития при закачке сухого газа последующее снижение его концентрации в попутном газе в основном обусловлено естественным распадом.

В последние 10 лет (2010–2019 гг.) объемная активность трития в извлекаемом газе при н.у. составила  $(6 \pm 0,58)$  Бк/л. При этом объемная активность трития, извлекаемого из отдельных скважин, изменяется в более широких пределах от 2 до 36 Бк/л при н.у.

**Заключение**

Результаты почти 55-летней эксплуатации Грачевского нефтяного месторождения после проведения первых в мире ядерных взрывов на действующем месторождении (объект «Бутан») подтверждают высокую эффективность использования ядерной взрывной технологии на данном объекте. Доказано, что при реализации такой технологии могут быть достигнуты не только интенсификация текущей добычи нефти, но и существенное увеличение коэффициента нефтеотдачи на месторождениях подобного типа.

Установлено, что в условиях безводного месторождения основным радиационным фактором является наличие трития в попутном газе.

Как показали многолетние мониторинговые исследования, радиационная безопасность эксплуатации объекта «Бутан» была обеспечена в полном объеме, что было отмечено также и в актах первичной регистрации радиоактивных отходов, проведенной АО «ВНИИПромтехнологии» по поручению ГК «Росатом» в 2013–2015 гг. [12–14].

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. Касаткин В. В., Камнев Е. Н., Ильичев В. А. Стратегия радиационной безопасности объектов подземных ядерных взрывов в топливно-энергетическом комплексе России // Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий : тр. междунар. конф. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2006. Т. 3. С. 415–420.
10. Ильичев В. А., Касаткин В. В., Семикин Н. П., Лядова Н. А. Особенности загрязнения радионуклидами углеводородной продукции после проведения подземных ядерных взрывов в рифогенном массиве // Радиоактивность после ядерных взрывов и аварий : тр. Междунар. конф. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2006. С. 421–427.
11. 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.
12. Касаткин В. В., Ильичев В. А., Касаткин А. В., Латышев В. Е. Инвентаризация объектов использования ядерных зарядов в мирных целях с оформлением документов первичной регистрации РАО (ОРАО–МЯВ) // Ядерная и радиационная безопасность : тематический сб. ст. – М.: Росатом, 2015. С. 35–40.
13. Касаткин А. В., Касаткин В. В., Седов Н. С., Василенко Е. М., Самородова Т. С. Концепция обращения с особыми РАО–МЯВ // Философия обращения с радиоактивными отходами: плюсы и минусы существующих технологий : матер. междунар. конф. – М.: ОО «Винпресс», 2016. С. 46–50.
14. Васильев А. П., Горин Н. В., Дубасов Ю. В., Ильичев В. А., Касаткин В. В. Интегральная база данных о мирных ядерных взрывах на территории бывшего СССР // Вестник НЯЦ РК. 2018. Вып. 2(74). С. 58–63. [ГЖ](#)