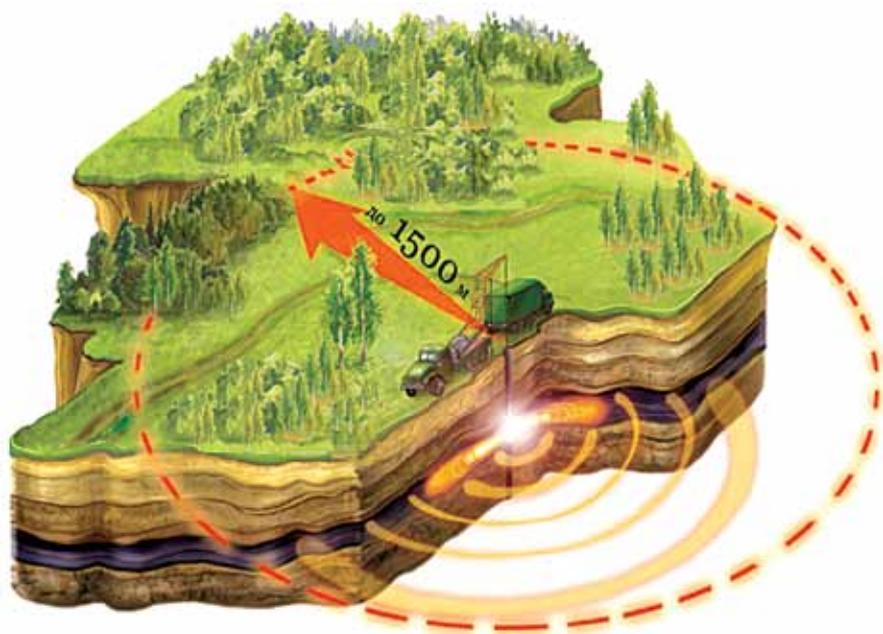


# ПРИВЛЕКАТЕЛЬНЫЙ + ПРИБЫЛЬНЫЙ = ПРОЕКТ

**РОССИЙСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПЛАЗМЕННО-ИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
ДЛЯ ЗАБЛАГОВРЕМЕННОЙ ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ – ИННОВАЦИОННОЕ НАПРАВЛЕНИЕ  
В МИРОВОЙ ПРАКТИКЕ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
БЕЗОПАСНОСТИ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ**



14 апреля 2016 года ООО «Распадская угольная компания» на торжественной церемонии награждения «Рейтинг угольных компаний Кузбасса» выделена среди лучших за «Успешную разработку и применение современных технологий управления угольным производством» и «Новые технологии добычи угля, безопасные для окружающей среды».

Было подчеркнуто, что на шахте «Ерунаковская-VIII» впервые в России введена в опытно-промышленную эксплуатацию инновационная технология заблаговременной дегазации угольных пластов с помощью плазменного-импульсного воздействия

(ПИВ). Технология позволяет извлекать метан из угольных пластов за несколько лет до начала горных работ.

Следует отметить, что первый этап внедрения ПИВ в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), который начался в 2015 году, признан успешным. Технология подтвердила свою работоспособность и доказала возможность создания до начала ведения горных работ в угольных пластах вторичной проницаемости. В результате увеличения проницаемости в угольном пласте значительный объем десорбируемого метана переводится из сорбированного и раство-

ренного состояния в свободное. Откачка жидкости из скважин понижает давление в обработанных угольных пластах, и свободный метан фильтруется по созданной системе микротрещин к скважинам. Скважины бурятся с поверхности в будущих куполах обрушения. Для откачки жидкости в скважины спускаются погружные электровинтовые насосы (УЭВН). Из скважин выходит чистый метан за счет энергии пласта.

В настоящее время опытно-промышленное внедрение технологии ПИВ продолжается на более глубоких угольных пластах с высокой газоносностью, разработка которых начнется в 2021 году.

Предполагается, что к этому времени произойдет значительный съем объема метана из обработанных угольных пластов, и природная газоносность на дегазированном участке будет доведена до безопасного уровня. Достижение цели, как предполагается, позволит провести быструю подготовку лавы, увеличить скорость проходки при ведении горных работ и обеспечить безопасную работу шахтеров.

Необходимо отметить, что такие работы по заблаговременной дегазации угольных пластов, проводимые Распадской угольной компанией, не имеют аналогов в мире и в перспективе могут быть рекомендованы к применению предприятиям, добывающим полезные ископаемые подземным способом.

## Научная обоснованность

Технология ПИВ, разработанная группой российских компаний «Новас»-«Георезонанс», являющихся резидентами государственного фонда «Сколково», научно обоснована и подтверждена многочисленными лабора-

торными, геофизическими, гидродинамическими, микросейсмическими исследованиями, стендовыми испытаниями и результатами промышленных работ по добыче традиционных и нетрадиционных углеводородов в РФ, США, Канаде, Китае, на Ближнем Востоке, в Чехии и других странах.

**В разработке технологии принимали участие:**

■ Санкт-Петербургский горный университет — профессор, д.т.н. А.А. Молчанов.

■ Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры (НИИЭФА имени Д.В. Ефремова) — профессор, д.т.н. О.П. Печерский.

■ Математическая модель о возможностях технологии ПИВ разработана Институтом прикладной математики (РАН) им. М.В. Келдыша.

■ Микросейсмические исследования при применении ПИВ на угольных пластах проведены НИИ прикладной информатики и математической геофизики БФУ имени И. Канта (РАН).

■ Стендовые испытания и томографические исследования проведены совместно с Центром нелинейной волновой механики и волновых технологий (РАН), а также МГУ имени Ломоносова.

■ Геологические и гидродинамические 3D-модели вторичной проницаемости после ПИВ в угольных пластах также неоднократно строились специалистами МГУ.

■ При разработке методики воздействия на продуктивные пласты углеводородов использовались теоретические исследования Томского института физики прочности и материаловедения СО РАН, а также Новосибирского института теплофизики СО РАН.

### **Специфика**

Технология ПИВ основана на принципах нелинейных физических процессов, которые неизменно присутствуют в любой продуктивной залежи. Иными словами, устанавливается нелинейная зависимость между изобретенным идеальным нелинейным широкополосным источником направленных управляемых периодических колебаний и любой продуктив-

ной залежью, при этом искусственно увеличивается нелинейность среды, что позволяет улучшить ее фильтрационные свойства для увеличения притока углеводородов из традиционных и нетрадиционных коллекторов к скважинам, пробуренным с дневной поверхности.

Для получения положительных результатов технология ПИВ органично встраивается в общие физические и геомеханические процессы природной продуктивной залежи.

### **Природный пусковой механизм**

Обращает на себя внимание следующий факт. Газодинамические явления (ГДЯ), несмотря на существенные различия физико-механических свойств угля, калийных солей, бокситов, порфиритов и даже при строительстве метро, по своей природе и механизму выбросов практически одинаковые.

Это означает, что природный пусковой механизм, приводящий к газодинамическим явлениям, один и тот же для всех залежей, которые относятся к природной нелинейной, диссипативной, динамической системе и находятся в напряженном состоянии — несмотря на их разнообразие. При этом движущей силой во всех случаях является энергия свободного газа и энергия упругого деформирования, которые принимают участие в неожиданных выбросах в рабочее пространство шахт.

Исследование свойств любого геологического разреза с характерной для каждого пласта массой, плотностью, упругостью, химическими, физическими и физико-химическими, геомеханическими свойствами свидетельствуют, что во всем массиве природной нелинейной динамической системы постоянно идет процесс неупорядоченных колебаний (частотный хаос), вызванный энергией, поступающей извне, включая природные явления, такие как: приливы—отливы, удаленные землетрясения, а также процессы само модуляции и т.д. При этом всегда в частотном хаосе присутствуют доминантные (резонансные) частоты свободных колебаний, присутствующие той или иной единице массы (фракталам) геологической структу-

## **НА ВЫЕЗДНОМ ЗАСЕДАНИИ ПРАВИТЕЛЬСТВА РФ В МАРТЕ 2016 ГОДА В НОВОКУЗНЕЦКЕ БЫЛО ПРЕДЛОЖЕНО ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ ШАХТЕРОВ СТАВИТЬ ВЫШЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ**

ры, где, при определенных условиях, возможно возникновение локальных резонансов.

### **Закон наращивания масштабов локализации деформационных процессов**

За процесс локализации в такой системе отвечает сформировавшаяся в них фрактальная пространственная сетка устойчивых резонансных возмущений или устойчивая структура резонансов, путем отбора системой соответствующих частот из непрерывного в общем случае спектра внешних воздействий. Однако поскольку в природной динамической системе в разных областях имеются свои собственные частоты, отнесенные к единице массы, то при возмущениях, частоты будут разными для разных точек пространства, следовательно, в одних точках динамической системы резонансы будут, а в других нет. Иными словами, описываемые явления

## ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД ПИВ ДЛЯ ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ НЕ ТОЛЬКО НЕ НАНОСИТ УЩЕРБА ЭКОНОМИКЕ ШАХТЫ, НО, С УЧЕТОМ ВЫШЕИЗЛОЖЕННЫХ ОТЛИЧИТЕЛЬНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ, ЯВЛЯЕТСЯ ПРИБЫЛЬНЫМ И ИНВЕСТИЦИОННО ПРИВЛЕКАТЕЛЬНЫМ МЕРОПРИЯТИЕМ

будут иметь локальный характер, не затрагивая систему в целом, а внезапные выбросы могут происходить из любой точки пространства.

Это объясняется тем, что возникает пространственное самоподобие — закон наращивания масштабов локализации деформационных процессов, включая и масштаб разрушения, который определяется структурой резонансов. При активном нагружении среды в ней постоянно воспроизводится и поддерживается фрактальная пространственная сетка устойчивых резонансных возмущений, в окрестностях которых и активизируются деформационные процессы, формируя диссипативные деформационные структуры.

Установлено, что любая динамическая система, вне зависимости, имеет ли она искусственное или естественное происхождение, характеризуется стационарной круговой резонансной частотой свободных колебаний, которые зависят от начальных условий силы возмущения, и в

этом случае появляется восстанавливающая сила, отнесенная к единице массы, равная силе возмущения.

В динамической системе природный пусковой механизм локальных дислокаций фрактальной пространственной сетки устойчивых резонансных возмущений, в соответствии с законом наращивания масштабов локализации деформационных процессов, может инициировать само модуляцию динамической системы при определенных геологических условиях и физико-механических свойствах взрывоопасных полезных ископаемых, а также вмещающих пород.

### Условия возникновения само модуляции

Из физики известно, что подобие течения вязкой жидкости (пластовый флюид) определяется как переход от ламинарного течения к турбулентному. Процесс следует рассматривать как отношение сил инерции, действующим в потоке, к силам вязкости. Турбулентность (само модуляция) может возникнуть произвольно или под действием нескольких внешних сил. Этого реально достичь следующим путем:

- уменьшить вязкость за счет увеличения давления и нагрева среды, что приведет в пограничном слое природного композита к трению скольжения;

- задать сложный вид внешней силы (удар, кратковременный широкополосный импульс), предоставив среде (фрактальной пространственной сетке устойчивых резонансных возмущений локальной дислокации) самой выбрать когерентную частоту;

- облучить среду звуком высокой эффективности, который возникнет при любой возбуждающей силе и вызывает механические колебания в породе, воде, газе;

- создать пузыри в среде и тем самым увеличить в два раза давление жидкости за пузырем, а также вызвать кавитационные процессы, которые сами будут инициировать ударные волны.

Во всех этих случаях в динамической среде происходит образование нелинейных волн, что приводит к ее турбулизации (само модуляции).

### Идеальный нелинейный источник направленных управляемых периодических широкополосных колебаний

Мы пришли к выводу, что, если в таких природных нелинейных динамических средах (угольные пласты, пласты спутники и взрывоопасные породы):

- 1) заблаговременно, до начала разработки лавы, через скважины, пробуренные с дневной поверхности, искусственно инициировать условия для возбуждения многочастотных резонансов (предоставив самой динамической системе возможность выбирать когерентные частоты из широкополосного сигнала в различных точках пространства, отнесенных к единице массы по всей мощности рабочего угольного пласта, пласта-спутника и взрывоопасной вмещающей породе);

- 2) создать растягивающее и сжимающее напряжение по периодическому принципу — появится возможность перестроить динамическую систему, а значительный объем сорбированного и растворенного в угле газа перейдет в свободное состояние. При этом понятно, что во взрывоопасной породе основной объем газа находится в свободном состоянии.

Разработанное устройство — плазменно-импульсный источник широкополосных направленных управляемых периодических колебаний — представляет собой металлическую трубу диаметром 102 мм, длиной 2 700 мм с излучателем с высоковольтными электродами, силовой батареей импульсных накопительных конденсаторов и устройством для подачи металлического калиброванного проводника в межэлектродное пространство.

На калиброванный проводник по команде оператора подается электрический импульс большой мощности, в результате чего проводник испаряется, превращаясь в квазинейтральную плазму. В результате возникновения плазмы в жидкости возникает пузырь нейтрального газа высокого давления. Создается скачок уплотнения, который иници-

ируется расчетным количеством раз в разных точках обрабатываемого пространства по периодическому принципу.

Расширяющийся пузырь в виде ударной волны, распространяясь радиально, сжимает среду до тех пор, пока давление в ударной волне не сравняется с пластовым давлением. Затем начинается процесс расширения среды к источнику колебаний. Сжимающее и растягивающее напряжение позволяет развить вторичную проницаемость в пласте, соединить природные трещины с вновь образованными микротрещинами в единую фильтрационную сеть. Это позволяет перевести сорбированный и растворенный в угле газ в свободное состояние.

Кроме того, образовавшиеся пузыри газа в угольном пласте, после потери кинетической энергии флюида, сокращаются за 1 микросекунду, вызывают гидродинамические удары с соответствующим акустическим сопровождением, что значительно увеличивает микротрещиноватость по вертикали и горизонтали в угольном пласте.

Для применения источника колебаний на угольный пласт используется обычная каротажная машина с лебедкой и геофизическим кабелем.

Идеальность источника определяется тем, что он может возмущать любую среду, не испытывая никакого обратного влияния. Нелинейность соответствует условию — малым расходом энергии в короткий промежуток времени получить непропорционально большой результат. Источник потребляет всего 500 ватт при напряжении 110/220 вольт. Высвобождение накопленной в батареях энергии происходит за 55 микросекунд.

Ударная волна сопровождается начальным акустическим сигналом от долей герц до 400 герц, а по пласту распространяются низкочастотные, сдвиговые колебания от 9 до 4 герц.

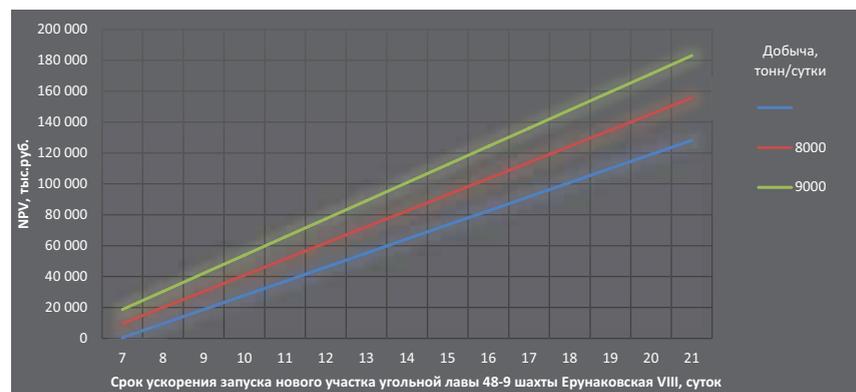
### Опытно-промышленное внедрение ПИВ

Микросейсмические исследования в процессе проведения ПИВ в угольных пластах на территории шахты «Ерунаковская-VIII» зарегистрировали возникновение событий от ПИВ на расстоянии 1 500 метров от скважины, однако максимальная

**Таблица 1. Прогнозные ключевые показатели эффективности проекта (при стоимости концентрата — 4 565 руб./тонна).**

NPV (Чистая приведенная стоимость проекта)	тыс. руб.	100 839
DPP (Срок окупаемости)	лет	4,59
IRR (Внутренняя норма доходности)	%	43%
PI (Индекс рентабельности)	доли ед.	2,59
Уд. инвестиции на 1 тонну добычи	руб./тонна	102,7
Добыча угля на дегазируемом участке	тыс. тонн	669
Уд. инвестиции на тонну дегазируемого угля	руб./тонна	56,8
Масса дегазируемого угля двух пластов	тыс. тонн	1 210

**График 1. Значение NPV (чистая приведенная стоимость) проекта «Заблаговременная дегазация угольной лавы по технологии ПИВ», тыс.руб.**



энергия была сконцентрирована в радиусе 250-500 метров.

Постепенный выход на максимальный отбор метана через вертикальные скважины в запланированных куполах обрушения продолжался до начала горных работ 980 м³/сутки (с октября 2015 по февраль 2016 года) с максимальным дебитом 1 280 м³/сутки (с ноября 2015 по февраль 2016 года) с последующим постепенным снижением дебитов скважин по мере продвижения вентиляционных и конвейерных штреков к вертикальным скважинам. Одна из трех скважин продолжает работать по настоящее время почти 2 года со стабильным дебитом до 400-600 м³/сутки.

В мае 2017 года в опытно-промышленную эксплуатацию запущены 4 скважины на угольных пластах глубокого залегания, которые к июлю 2017 года выйдут на максимальный режим работы, который ожидается не менее 1 200-1 300 м³/сутки при эксплуатации до 2021 года.

Следующие 4 дегазационные скважины будут запущены в эксплуатацию в июле 2017 года с выходом на максимальный режим в конце сентября 2017 года.

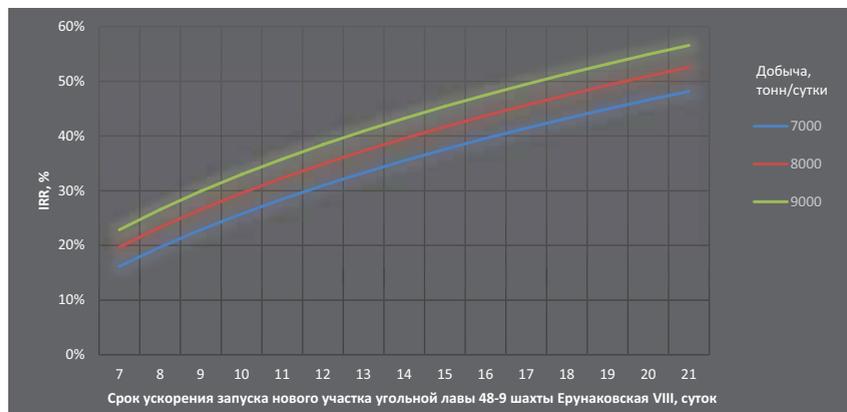
Суммарные ожидаемые результаты работы 8 дегазационных скважин за 2017-2021 годы:

- дегазируемый объем метана — 14,5 миллиона м³;
- снижение природной газоносности угольных пластов — с 24,0 до 12,0 м³/тонна;
- дегазированная масса угля — 1 210 000 тонн.

Экономический эффект от заблаговременной дегазации достигается благодаря доходам за счет ускорения ведения горных работ в области влияния скважин на обработанных угольных пластах с высокой природной газоносностью.

Так, при ставке дисконтирования — 16%, стоимости концентрата — 4 565 руб./тонна, выходе концентрата — 60%, добы-

**График 2. Значение IRR (внутренняя норма доходности) проекта «Заблаговременная дегазация угольной лавы по технологии ПИВ», %**



**Таблица 2. Прогнозные ключевые показатели эффективности проекта (при стоимости концентрата — 5 900 руб./тонну).**

NPV (чистая приведенная стоимость проекта)	тыс. руб.	148 891
DPP (срок окупаемости)	лет	4,51
IRR (внутренняя норма доходности)	%	52%
PI (индекс рентабельности)	доли ед.	3,35

**Таблица 3. Прогнозные ключевые показатели эффективности проекта (с учетом генерации э/энергии и стоимости концентрата — 5 900 руб./тонна).**

NPV (Чистая приведенная стоимость проекта)	тыс. руб.	213 060
DPP (срок окупаемости)	лет	4,25
IRR (внутренняя норма доходности)	%	68%
PI (индекс рентабельности)	доли ед.	3,58

че — 9 000 тонн/сутки, сокращение сроков оконтуривания и запуск угольной лавы в эксплуатацию всего на 14 дней позволяет добиться следующих ключевых показателей эффективности проекта (прогнозная оценка. Таблица 1):

На графиках 1 и 2 проиллюстрировано изменение основных показателей эффективности проекта заблаговременной дегазации: NPV (чистая приведенная стоимость) и IRR (внутренняя норма доходности) в зависимости от изменения:

- сроков ускорения запуска предварительно дегазированного участка угольной лавы, суток;

- добыча коксующегося угля, тонн/сутки.

Стоимость угольного концентрата указана на октябрь 2016 года — начало реализации проекта заблаговременной дегазации.

Повышение стоимости угольного концентрата в период реализации проекта дополнительно увеличивает экономические показатели эффективности.

Так, при тех же условиях, но стоимости угольного концентрата — 5 900 руб./тонну сокращение сроков оконтуривания и запуск угольной лавы в эксплуатацию на 14 дней позволяет добиться следующих ключевых показателей эффективности проекта (прогнозная оценка. Таблица 2). При этом существуют дополнительные пути повышения инвестиционной привлекательности заблаговременной дегазации за счет использования чистого извлеченного метана для генерации электрической энергии и применения ее добывающими компаниями для собственных нужд. При этом метан может использоваться сразу из скважины без какой-либо подготовки.

Так, при дополнительных инвестициях на приобретение 1 газопоршневой электростанции (макс. мощность 200 кВт, расход газа — 52 м<sup>3</sup>/ч) в размере 1,86 миллиона рублей генерация электрической энергии на метане из дегазационной скважины при нагрузке 70% составит 1 226 400 кВт-час/год, что позволяет получить экономию по оплате электрической энергии — 3,9 миллиона руб./год.

Прогнозируемая суммарная генерация электрической энергии с 8 дегазационных скважин при нагрузке 70% составит — 9 811 200 кВт-час/год, что позволяет получить дополнительный доход — 31,7 миллиона руб./год (в ценах э/э I кв. 2017 года)

Поэтому при дополнительных инвестициях на производство электроэнергии для собственных нужд из извлекаемого в результате дегазации чистого метана, экономические показатели проекта значительно повышаются за счет увеличения NPV, IRR, PI проекта и снижения срока окупаемости.

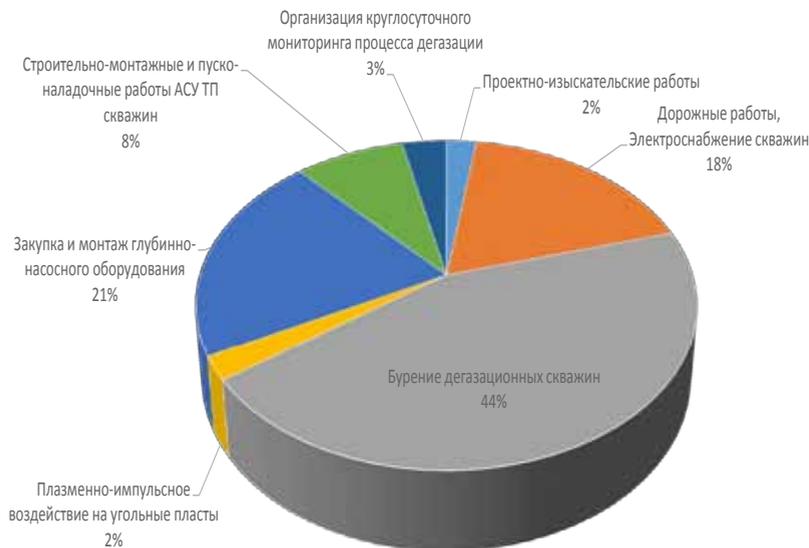
Так, учитывая все необходимые расходы на содержание и ремонт 8 газопоршневых электростанций, генерация электроэнергии для собственных нужд в период срока службы скважин, плюс ускорение запуска угольной лавы в эксплуатацию на 14 дней (при стоимости угольного концентрата — 5 900 руб./тонна), позволяет добиться следующих ключевых показателей эффективности проекта (прогнозная оценка. Таблица 3).

В целом себестоимость проекта заблаговременной дегазации методом плазменно-импульсного воздействия из расчета на тонну дегазированного угля сопоставима, а в ряде случаев (в зависимости от конкретных условий проведения работ) ниже себестоимости традиционных способов дегазации.

Примерная структура затрат проекта по заблаговременной дегазации угольной лавы указана на диаграмме 1.

Как видно, в структуре затрат расходы на бурение дегазационных скважин составляют почти половину всех затрат на дегазацию и в то же время при расчете экономической эффективности проекта являются нерелевантными. То есть возникающими у добывающих компаний,

**Диаграмма 1. Примерная структура затрат проекта по заблаговременной дегазации угольной лавы**



независимо от проведения заблаговременной дегазации методом плазменно-импульсного воздействия, так как являются необходимой составляющей традиционной — купольной — дегазации, выполнение мероприятий по которой является обязательным.

Аналогично, в ряде случаев, нерелевантными затратами при рассмотрении проекта заблаговременной дегазации методом плазменно-импульсного воздействия могут являться: прокладка подъездных путей и линий электроснабжения, так как данные затраты также сопутствуют проведению мероприятий традиционной купольной дегазации.

Поэтому себестоимость релевантных затрат, напрямую связанных с заблаговременной дегазацией методом плазменно-импульсного воздействия, суммарно не превышает 5 миллионов рублей за функционирующую дегазационную скважину.

Таким образом, заблаговременная дегазация угольных пластов методом плазменно-импульсного воздействия с экономической и инвестиционной точки зрения является абсолютно привлекательным и прибыльным проектом при условии обеспечения бесперебойного квалифицированного функционирования дегазационных скважин в течение всего периода срока эксплуатации, необходимого для снижения газоносности до безопасного уровня.

### Безупречная технология

Технология заблаговременной дегазации в запланированные купола обрушения с помощью ПИВ не имеет аналогов в мире и может быть применена при разработке любых марок углей, на любой глубине залегания. Отличительной особенностью является экономическая, экологическая и технологическая эффективность.

**1.** Так как все расходы на заблаговременную дегазацию углепородного массива являются расходами, связанными с обеспечением безопасных условий и охраны труда при добыче угля, то они принимаются к вычету из суммы налога на добычу полезных ископаемых на всю сумму понесенных затрат в соответствии с Постановлением Правительства РФ №455 от 10.06.2011.

**2.** Скважины, пробуренные в купола обрушения, после завершения работ по заблаговременной дегазации, при начале горных работ используются по назначению (для купольной дегазации).

**3.** Экологическая безупречность. При применении ПИВ не используются реагенты или другие химические материалы, в том числе не используется никакой материал для закрепления микротрещин.

**4.** Извлеченный чистый метан подлежит утилизации в контейнерных электрогазогенераторах без предварительной подготовки.

**КРОМЕ ДЕГАЗАЦИИ  
УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ,  
ИЗВЛЕКАЕМЫЙ  
ЧИСТЫЙ МЕТАН  
ЗА СЧЕТ УТИЛИЗАЦИИ  
В КОНТЕЙНЕРНЫХ  
ЭЛЕКТРО-  
ГАЗОГЕНЕРАТОРАХ,  
ПРИОБРЕТЕНИЕ И МОНТАЖ  
КОТОРЫХ ОКУПИТСЯ  
В ТЕЧЕНИЕ ГОДА,  
ПОЗВОЛИТ СОКРАТИТЬ  
РАСХОДЫ ШАХТЫ  
НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ,  
А ПРЕДПРИЯТИЕ БУДЕТ  
ИМЕТЬ ПОСТОЯННЫЙ  
РЕЗЕРВНЫЙ ЕЕ ИСТОЧНИК**

**5.** Сокращаются сроки подготовки лавы.

**6.** Увеличивается скорость проходки угольного комбайна при добыче угля.

**7.** Снижаются временные, эксплуатационные и финансовые расходы на традиционную предварительную дегазацию.

**8.** Повышается уровень безопасности подземных работ.

#### **КОМПАНИЯ «ГЕОРЕЗОНАНС»:**

**Петр Агеев**, директор по науке компании, чл.-корр. МАНЭБ,  
**Андрей Десяткин** — к. г.-м. н., инженер проектов,  
**Альберт Галичанин**, главный экономист.

#### **ООО «РАСПАДСКАЯ УГОЛЬНАЯ КОМПАНИЯ»:**

**Андрей Черепов**, технический директор,  
**Сергей Ширяев**, первый заместитель технического директора,  
**Игорь Лебедев**, начальник управления дегазации и вентиляции.