

ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА

УДК 622.235

СТАНОВЛЕНИЕ И РАЗВИТИЕ В УКРАИНЕ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ПРИКЛАДНОЙ ГЕОДИНАМИКЕ ВЗРЫВА

А. А. Вовк, докт. техн. наук (ИГМ НАН Украины)

Викладено основні результати теоретичних і експериментальних досліджень учених Київської наукової школи по прикладній геодинаміці вибуху для різних галузей гірничодобувної промисловості.

Изложены основные результаты теоретических и экспериментальных исследований ученых Киевской школы по прикладной геодинамике взрыва для различных отраслей горнодобывающей промышленности.

Basic results of theoretical and experimental researches conducted by scientists of the Kiev scientific school in applied geodynamics of explosion for various branches of the mining industry are stated.

Зарождение и развитие направления по прикладной геодинамике взрыва осуществлялись в рамках научно-прикладной школы академиков М. А. Лаврентьева и М. А. Садовского по проблемам промышленного использования взрывных технологий различного назначения. Начало исследований по получению выработок в грунтах было положено в Институте математики АН УССР Н. М. Сытым и Институте горного дела академии АН УССР Н. А. Стариковым, Г. К. Акутиным и А. А. Вовком.

Завершение формирования этого нового направления связано с созданием в 1965 г. лаборатории взрывных деформаций грунтов, где впервые были выдвинуты и выработаны основные положения и методологические подходы. Направление было сформулировано на основе новой концепции, более полно учитывающей реальные процессы, имеющие место при рассмотрении системы заряд–окружающая среда. Теоретической основой решения волновых задач, как и раньше, принимались фундаментальные положения механики сплошных дискретных сред. Однако многообразии реальных условий и технологических требований не могло быть обеспечено имеющимися решениями на базе идеализированных моделей. Отличительной особенностью задач, решаемых по данному направлению, является: импульсный характер приложения нагрузки и волновой характер возмущения, распространяющегося по массиву: нестационарное движение среды; сложность постановки и решения задач по прогнозированию поведения среды в каждом конкретном случае; многообразие требований к конечному результату действия взрыва на массив (уплотнение, рыхление, дробление, перемещение горной массы). Они должны были решаться

с учетом физико-механических свойств массивно-кристаллических ненарушенных либо трещиновато-блочных (частично выветрелых) скальных пород, многофазных грунтов и органно-минеральных разновидностей.

Таким образом, прикладные задачи решались в двух основных направлениях: в области динамики многофазных сред и динамики скальных массивов.

Имеющиеся на то время разработки были недостаточны по объему и разнообразию, а их уровень и степень достоверности не соответствовали возросшим требованиям горнодобывающих, горно-строительных и специальных отраслей промышленности в качестве научной базы инженерных решений. В частности, для мягких грунтов динамические задачи решались в рамках моделирования грунта “пластическим газом”, моделью А. Ю. Ишлинского, рассматривавшего грунт в двух состояниях (по плотности). Позднее С. С. Григорьяном была предложена модель упруго-пластического тела. Затем была разработана модель трехкомпонентной среды Г. М. Ляхова для водонасыщенных грунтов. Эти результаты использовались главным образом для оценки качественной картины развития взрыва в грунтах.

Что касается динамики скальных пород, то исследователи долгое время ограничивались рассмотрением задач в упругой постановке, а для случаев взрыва на выброс достаточно полные теоретические решения были известны только в гидродинамическом приближении.

Реализация указанных моделей в рассмотрении динамических задач, их востребованность практикой послужили стимулом развития экспериментальных направлений, на многие годы определивших приоритетность научной деятельности украинских специалистов в области геодинамики взрыва. Этому способствовали непрерывно возрастающие запросы промышленности, во все больших масштабах реализовавших взрывные технологии в не скальных грунтах (строительство колодцев, шурфов, пусковых шахт, ракетных комплексов, противодиффузионных, сейсмозащитных экранов, открытых выемок водотранспортных каналов и др.) с использованием главным образом линейно-протяженных конструкций зарядов.

Исследования в области динамики связных грунтов. В первоначальный период при формировании исследовательских программ главное внимание было направлено на совершенствование и дальнейшее повышение достоверности решений в упруго-пластической постановке за счет применения более совершенных численных методов моделирования взрывных процессов, оснащения этих методов адекватными уравнениями состояния (УС). Адекватность УС (достоверность, возможность практического использования в вычислительных алгоритмах для решения более высокого класса двумерных задач) достигалась за счет организации многочисленных экспериментов с использованием новейших, часто уникальных методик с получением добротного экспериментального материала для нахождения констант, входящих в соответствующие алгоритмы. В этих разработках ведущая роль принадлежала И. А. Лучко, В. Г. Кравцу, В. А. Плаксию, а в последующем, при

решении задач с учетом вязкости, кроме указанных, Н. С. Ремез и др. [13, 14, 19, 24, 26, 29].

Характерной особенностью исследований было привлечение смежных направлений геомеханики и других наук для выработки комплексных рекомендаций. Разрабатывались специальные методы прогнозирования механического действия взрыва в различных средах для получения сведений о поведении грунта естественного сложения при динамических нагрузках. Для этого создавались устройства для записи деформаций в грунтах, датчики смещения грунта с соответствующими согласованными каналами регистрации (В. И. Плужник, П. А. Паршуков, В. И. Кононенко, В. Н. Кобасов).

В комплексных исследованиях уплотненной зоны необратимых деформаций вокруг взрываемого заряда, проводившихся в плане удовлетворения запросов промышленности, реализующих различные взрывные технологии ведения инженерных работ в мягких грунтах, в числе других были задействованы нетрадиционные методы получения информации об остаточных явлениях последствия взрыва (полях деформаций). Для этого В. Г. Кравцем и Л. И. Демещуком впервые в практике таких исследований использовались радиоактивные и сейсмометрический методы, позволившие получать информацию в области микроструктурных изменений в зоне влияния взрыва (В. Г. Кравец, В. В. Захаров, В. Н. Маркелов, Л. А. Фурман).

При рассмотрении вопросов моделирования взрывных процессов в различных средах и разрабатываемых на их основе инженерных рекомендаций учитывались следующие концептуальные положения.

1. Система заряд–среда обладает инерционностью как в процессе передачи энергии, так и в процессе деформирования (уплотнения, дробления). Кроме того, это система с обратной связью, поэтому необходимо было отказаться от схемы мгновенной передачи энергии среде, заменив ее импульсным механизмом, а при рассмотрении механизма деформации учесть «инкубационный» период накопления упругой энергии в дислокациях скальных пород или вязкий эффект, замедляющий деформирование грунта в процессе образования полости. В последнем случае имеет место различие диаграмм $\sigma(\epsilon)$ статического (при $\epsilon \rightarrow 0$) и динамического (при $\epsilon \rightarrow \infty$) деформирования. При сопоставлении экспериментальных значений параметров волн в грунтах с их значениями, рассчитанными исходя из модели пластической среды, без учета вязкости, показали, что в действительности угасание волн происходит интенсивнее, чем это следует из теории, за счет потерь, связанных с вязкими свойствами грунтов. В этих решениях нашли подтверждение отклонения от принципа геометрического подобия, наблюдаемые в экспериментах.

2. Система заряд–среда или источник импульса–объект приложения обладает свойствами обратной силы, что вносит существенные коррективы в решение проблемы управления параметрами импульса. Это является одним из важнейших разделов геодинамики взрыва.

Основываясь на этих положениях, теоретические разработки в Отделении геодинамики взрыва выполнялись по двум главным направлениям: первое –

решение задач по динамике мягких грунтов и скальных пород, учитывающих конкретные горно-геологические и технологические требования путем применения соответствующих моделей и задания оптимальных начальных и граничных условий; второе – теоретическое обоснование как начальных, через управление детонацией, так и текущих параметров взрывного импульса через формирование оптимального силового поля за счет пространственно-временного рассредоточения источников импульса по массиву.

Их числа прикладных задач наиболее полное развитие и практическую реализацию получили следующие:

разработка взрывных технологий получения подземных (камуфлетных) полостей и открытых выемок (в частности каналов) в мягких породах;

разработка взрывных методов ликвидации просадочных свойств лессовых грунтов за счет более полной упаковки скелета грунта, методов снижения фильтрации с использованием этого же эффекта;

методы подводного взрывания, уплотнения, разрушения и перемещения водонасыщенных грунтов, на основе которых разрабатывались технологии различных дноуглубительных работ, получения осушительных каналов, выторфовывания водонасыщенных масс при посадке насыпей на болотах, подводной штамповки и прессования изделий в машиностроении, металлообработке, как с использованием энергии взрыва, так и электрогидравлического взрыва (А. Г. Смирнов, И. С. Биржишкис, Ю. П. Андреев, И. А. Лучко, В. А. Цурик и др.);

методики и рекомендации по промышленной сейсмике, а в последние годы – по защите поверхностных объектов над выработанным пространством от влияния горных ударов (А. А. Вовк, А. А. Кузьменко, И. И. Денисюк, В. Г. Кравец, В. Д. Воробьев, О. А. Вовк). При этом в области регулирования сейсмического действия взрыва в скальных породах впервые научно обоснована и внедрена в практику универсальная методика определения сейсмобезопасных параметров массовых взрывов на основе учета изменчивости анизотропии массива горных пород в любом азимутальном направлении [25, 31, 32, 41, 42–44]. Особого внимания заслуживает методика расчета степени повреждения объектов ударной воздушной волной от воздействия аварийных взрывов (в том числе и при терактах) по результатам их действия: размеры воронки взрыва; критерии степени повреждения объекта (А. А. Кузьменко, П. З. Луговой [48–49]);

создание взрывчатых материалов и средств взрывания, позволяющих задавать (и при необходимости изменять) детонационные характеристики и управлять механизмом формирования силовых полей на стадии детонации (А. А. Вовк, В. И. Плужник).

Получение полостей в мягких грунтах. Как указывалось ранее, сжимаемость мягких нескальных грунтов при динамических нагрузках и образование в них за счет уплотнения при взрывании заряда устойчивой камуфлетной полости позволяет получить сферические и цилиндрические горные выработки без извлечения и транспортировки породы. Разработаны технологии получения таких полостей при строительстве горных выработок,

шахтных стволов, подземных хранилищ нефти и газа, при устройстве противосейсмических и противооползневых экранов. Технологическим разработкам предшествовали экспериментально-производственные исследования по определению полей деформаций вокруг одиночных или сближенных зарядов. Основными исполнителями были: В. Г. Кравец, А. А. Вовк, А. Г. Смирнов, Г. И. Черный, А. В. Михалюк, Н. М. Сытый, А. А. Кузьменко и др. Результаты внедрены при устройстве пусковых ракетных шахт, подземных убежищ, хранилищ нефтепродуктов, водозаборных колодцев. [5, 7, 12, 19, 21]. Эти технологии позволяют получать в суглинках камуфлетные полости диаметром 4 м и глубиной до 30 м. Для уменьшения размеров воронки в верхней части были рекомендованы вспомогательные заряды, заглубленные в устьевой части скважины и взрывааемые с опережением, чтобы обеспечить взаимостолкновение с детонационной волной основного заряда на определенной глубине, либо заряды переменного сечения, сужающиеся к устью скважины. Кроме того, были предложены схемы устройства подземных комплексов, состоящих из вертикальных и горизонтальных сопряженных элементов, технологии образования подземных хранилищ различного назначения.

Получение открытых протяженных выработок в грунтах с помощью линейных зарядов. В решении динамических задач, описывающих действия линейных зарядов выброса в двухмерной постановке, в отличие от одномерных задач (достаточных при рассмотрении действия взрыва сосредоточенных зарядов выброса), первоначально использовались гидроимпульсные схемы расчета с принятием допущений об идеальности и несжимаемости среды (критерий Фруда). Это позволило использовать метод теории функций, комплексного переменного и выполнить аналитические исследования более сложных схем взрывания (в частности, спаренных удлиненных зарядов), не поддающихся решению в рамках других, уточненных моделей. Точные аналитические решения получали сведением к смешанной краевой задаче теории аналитических функций (И. А. Лучко). При этом процесс образования выемки рассматривался лишь на начальной (момент подачи импульса к заряду) и конечной (до момента прекращения движения грунта и ПД) стадиях, исключив из анализа трудно учитываемые скорости ускорения грунта в процессе его разрушения. Решения выполнялись с привлечением аппарата теории размерностей в предположении, что параметры выемок будут подобными, если энергия заряда пропорциональна четвертой степени масштаба. Однако такие решения с использованием несжимаемой модели приводили к точным математическим результатам, но не совпадали с реальными данными по размерам выемок и не содержали информации о параметрах уплотненной зоны – весьма важного элемента воздействия взрыва, имеющего самостоятельное технологическое значение. Эта зона обладает резко уменьшенным коэффициентом фильтрации, повышенной прочностью, что значительно улучшает эксплуатационные свойства воднотранспортных систем, например канала, вплоть до отказа от отделки его ложа.

Затем эти аналитические решения дополнялись и корректировались исследованиями методом моделирования с использованием теории подобия и

размерностей с получением функциональных зависимостей для основных геометрических параметров выемки, учитывающих в числе прочих характеристик свободную пористость и плотность грунта (И. А. Лучко).

Полученные корреляционные соотношения использовались при прогнозировании действия взрыва в однородных средах при соответствующих диапазонах энергетического потенциала заряда.

Аналогичные исследования выполнены и для случаев взрывания в слоистых средах. На основе этих решений расчетные зависимости параметров зарядов выброса были использованы при проектировании строительства водотранспортных каналов большого сечения траншейными зарядами. Так, например, при взрыве однотраншейного заряда погонной массой 300...340 кг/м с глубиной заложения центра заряда 5,1...6,0 м получали выемку параболического сечения шириной поверху 27...33 м, глубиной 7,0...8,6 м, поперечным сечением 125...140 м².

На участках 4-й очереди строительства Каракумского канала были проведены многочисленные опытно-промышленные взрывы с получением каналов сечением от 90...110 до 160...180 м² с показателем действия взрыва 2,1...3,1. Сроки строительства каналов и водоемов с использованием энергии взрыва сокращаются в 3...10 раз. На других объектах этого канала (в частности на Главном Мургабском коллекторе) были реализованы и другие схемы – однотраншейные со вспомогательным ассиметрично размещаемым зарядом и двухтраншейные. Траншейные технологии использовались в Казахстане и на Дальнем Востоке. Большой объем работ выполнялся в Магаданской области при проходке каналов в мерзлых грунтах. Для этих условий были разработаны технологии взрывания и средства механизации нарезки щелей для укладки зарядов и оконтуривания бортов [7, 8, 12, 15, 19, 21, 24, 25, 29, 30]. При решении задач по динамике водонасыщенных грунтов, в отличие от общепринятого подхода Н. М. Герсеванова о невозможности перемещения воды в грунте при импульсном воздействии, учитывался экспериментально обнаруженный и исследованный факт динамического перемещения воды в высокопористых грунтах (торфяниках, супесях, сапропелях, лессах), особенно при взрывании вблизи свободной поверхности. Такие решения послужили базой для разработки инженерных расчетов параметров взрыва при получении открытых выемок (дренажных каналов), уплотнении лессовых грунтов с предварительным замачиванием, расчистке и углублении русел обмелевших рек, различного рода подводных земляных работ (реконструкция портовых сооружений, разработка подводных залежей полезного ископаемого). В частности, для строительства мелиоративных объектов в Белоруссии, Грузии и в Архангельской области были разработаны и реализованы технологические схемы одно- и двухтраншейного взрывания в водонасыщенных грунтах с механическим или взрывным способами приготовления и укладки взрывчатого вещества (ВВ) в траншее (И. А. Лучко, Ю. П. Андреев, В. А. Цурик, В. В. Тесленко).

Технология взрывного удаления торфяного водонасыщенного грунта из-под земляного полотна при устройстве дороги на болотном участке была

успешно применена в Литовской ССР и отмечена Государственной премией в области науки и техники Литвы (в числе лауреатов премии А. А. Вовк, А. Г. Смирнов). Аналогичные рекомендации были выполнены для работ по руслорегулированию (спрямление русел или их углубление и расчистка) с использованием различных схем устройства пионерной (зарядной) траншеи и укладки основного заряда, одно- или двухъярусного взрывания [11, 20, 23, 26, 30].

Возбуждение ударной волны в воде может быть вызвано не только взрыванием заряда, но и с помощью подводного электроразряда. Однако для получения импульса с достаточными энергетическими параметрами необходимы громоздкие установки, генерирующие мощные искровые разряды (до 100 кДж.). По аналогии со взрывом заряда подводный электрогидровзрыв генерирует ударную волну и формирует газовый пузырь, пульсация которого генерирует вторичные акустические излучения и формирует нестационарные гидротоки, являющиеся одним из рабочих факторов. В зависимости от поставленных технологических задач используется либо энергия движущихся в воде импульсов сжатия, либо энергия гидротоков (от пульсации пузыря), либо оба источника. Однако по мере расширения области применения метода для многих технологий давление на фронте ударной волны и энергия пульсации оказались недостаточными для эффективного разрушения твердых материалов. Поэтому потребовались новые методики регулирования параметров импульса, заключающиеся в размещении в межэлектродном пространстве энергетической быстрогорящей газообразующей добавки. В результате экспериментальных исследований электрохимического и комбинированного (электрогидрохимического) методов инициирования были подобраны составы и характеристики энергообразующих компонентов электроразряда, позволяющие увеличить давление в импульсе (по сравнению с разрядом без добавок) в 1,2 раза, время нарастания давления в импульсе в 1,5 раза, период пульсации пузыря в 1,67...1,76 раза. Благодаря этому акустическая энергия возросла в 3,5 раза, энергия пульсации увеличилась в 3,4...5,5 раза. Это позволило снизить металлоемкость разрядных установок и создать компактные переносные приборы для бескапсюльного инициирования зарядов и оконтуривания отделяемых гранитных блоков с помощью электроразрядов в шпурах (В. И. Плужник, А. А. Вовк, Е. Олек).

Ликвидация просадочных свойств лессовых грунтов энергией взрыва. В ОГВ выполнен большой объем исследований и разработаны разнообразные технологии ликвидации просадочных свойств лессовых грунтов с применением скважинных, траншейных и комбинированных зарядов ВВ для улучшения строительных характеристик [14, 21, 22, 28, 29, 39]. В процессе исследований были задействованы комплексные методики для изучения механизма и природы динамического уплотнения грунтового массива в зависимости от характера нагружения и физико-механических свойств грунта, разработаны методы определения параметров взрывания (конструкции зарядов, способы укладки ВВ в зарядные полости – скважины или траншеи и т.п.). Разработана классификация взрывных методов ликвидации просадочных свойств таких

грунтов (О. А. Вовк) с подразделениями по способам предварительного замачивания, расположения зарядов и их конструкции. Взрывная обработка после увлажнения до степени влажности 0,8 осуществлялась по одной из следующих технологий: сосредоточенными глубинными зарядами камуфлетного действия (с заданным шагом по высоте скважины), цилиндрическими горизонтальными, вертикальными скважинными зарядами. Главными технологическими параметрами рассматриваемых способов является сетка скважин или расстояние между траншейными зарядами. Взрывное уплотнение грунта, увлажненного до степени 0,6, заключается в образовании полостей взрыванием зарядов в скважинах по определенной сетке и уплотненной зоны в межполостном пространстве. Затем полости заполняются малосжимаемым материалом и замачиваются, вызывая осадку упавшего в полость грунта (В. Г. Кравец, Л. И. Демещук). Эти технологии реализованы при строительстве ряда объектов в Молдавии, на Северном Кавказе, в Красноярском крае, Одесской области и в Туркменистане.

Методы взрывных работ в скальных породах. Решение задач по динамике скальных пород осуществлялось на базе новейших подходов к трактовке механизма деформирования твердых тел, концепции оптимизации передачи энергии ВВ окружающему массиву. Одним из реальных практических приложений этого явилось теоретическое обоснование метода отбойки граничных блоков с чередующейся точкой инициирования соседних шпуров, увеличение общей продолжительности действия силового поля, формирование в силовом поле касательных напряжений, создание условий для соударения движущихся частей (отдельностей) разрушаемого массива. Основываясь на этих подходах, были разработаны многочисленные рецептуры ВВ с регулируемыми параметрами, конструкции зарядов с каскадным инициированием, встречным инициированием, патронов с управляемым режимом детонации, с помещением в специальные водоизолирующие оболочки (рукава) [17, 19, 21, 26, 30, 33, 40]. Для создания условий многократного нагружения элементов взрываемого массива в горизонтальной и вертикальной плоскостях были предложены комбинированные заряды, формирующиеся сочетанием различных типов ВВ с каскадным инициированием со сплошной или рассредоточенной колонкой. Эффект взрыва такого заряда достигается за счет разности скоростей детонации частей заряда из разных ВВ с созданием неоднородного поля напряжений. Соответствующим подбором пар ВВ можно добиться сложения импульсов с образованием нескольких максимумов, что позволяет регулировать кусковатость горной массы в заданных пределах (В. Д. Воробьев). Однако эффект действия таких зарядов значительно повышается при расположении их по рациональной сетке скважин в разрушаемом объеме горных пород на уступе карьера за счет учета анизотропных свойств горного массива по разработанной и используемой в практике методике [42, 43, 45–47].

Ухудшение горно-геологических условий на карьерах и возрастающие требования технико-экологического характера стимулировали поиск более совершенных средств и методов отбойки скальных пород в условиях заряжания обводненных (часто с проточной водой) скважин. Большую роль в решении

вопросов стабилизации детонации зарядов с предотвращением вымывания растворимых компонентов ВВ проточной водой и переход на использование бестротильных взрывчатых составов, в том числе местного приготовления, сыграли разработки технологий заряжения с помещением ВВ в специальные полиэтиленовые оболочки (рукава). За последние годы были разработаны средства механизации изготовления оболочек, несколько классов новых взрывчатых веществ: бестротильные промышленные ВВ – полимиксы ГР-1, комполайты ГС и ПС, тротилсодержащие ГРТ, ГР-ГРМ, порохосодержащие ГР-ПБ, акватола ТВ (В. Д. Воробьев, В. С. Прокопенко и др.).

Такой набор ВВ позволяет обеспечить эффективное ведение взрывных работ в различных горно-геологических условиях (сухие, обводненные скважины, породы различной крепости).

Результаты исследований по стабилизации детонационных свойств простейших ВВ. В ОГВ, его СКТБ, ЗАО «Техновзрыв» проводились систематические работы по совершенствованию существующих рецептур ВВ (главным образом в направлении повышения водостойкости и стабильности детонационных характеристик), а также по созданию новых ВВ с регулируемыми начальными параметрами (например, пенообразные малоплотные составы) с широкой проверкой в производственных условиях (Ф. М. Галаджий, А. А. Вовк, Н. В. Кривцов, В. И. Плужник, Н. В. Сычевская, С. Д. Лысюк); по созданию специальных конструкций зарядов и технологий их использования: в полиэтиленовых рукавах (В. С. Прокопенко, В. Д. Воробьев), для торпедирования призабойной зоны продуктивных скважин (А. В. Михайлюк, Н. А. Лысюк, А. А. Вовк и др.), для возбуждения регулируемого импульса (Ф. М. Галаджий, Н. В. Сычевская, В. А. Поплавский).

Технико-экономические преимущества простейших составов ВВ (аммиачная селитра плюс горючая добавка) способствовали их широкому использованию в горном деле и строительстве. Но при этом потребовалось обеспечить надежность процесса детонации за счет повышения удерживающих свойств селитры, эмульсионной гидрофобизации и использования топливного компонента в эмульгированном виде.

Для получения устойчивых эмульсий использовались стабилизирующие компоненты. При разработке эмульсионных ВВ (Е. Олек, В. И. Плужник) на основе обратных эмульсий «вода в масле» с целью повышения чувствительности к взрыву в состав вводились искусственные и естественные микросферы, вспученный перлитовый песок, газообразующие добавки.

При исследовании процессов детонации в цилиндрических зарядах установлено, что детонационные волны, стационарные и устойчивые, на расстояниях $l \leq 3,5d_3$ теряют устойчивость и образуются детонационные волны с пульсирующим фронтом, часто происходит обрыв детонации или выход на новый стационарный режим (в частности спиновой). Это свидетельствует о необходимости развития теории детонации путем ввода помимо критического диаметра еще и параметра критической длины заряда для обеспечения стационарности и устойчивости процесса детонации.

Поддержка стабильности параметров в детонационной волне с расстоянием может быть достигнута введением небольшого количества активных добавок: раствора аммиачной селитры, мононитроалканов, алифатических углеводородов и других горючих компонентов, а также инертных добавок: молотого известняка, кубовых остатков ректификации метилхлорсиланов, тонких порошков гранита и корунда. Добавка 1...2 % корунда дает прирост детонации на 12 %. Стабилизация детонационных волн может быть достигнута также профилированием образующей заряда по определенному закону с изменением площади его сечения на 30...50 % на участке длиной, равной: входного сечения – 3...4 радиуса заряда, выходного сечения – 1,5...2,5 и соединяющего сечения – 0,3...2,5 радиусов. Сущность такого метода заключается в том, что при подходе детонационной волны к участку сужения происходит торможение продуктов детонации, в результате чего повышается их давление. Многократное отражение продуктов детонации приводит к увеличению температуры слоя ВВ, росту активизации и степени завершенности химических реакций с выходом на устойчивый режим детонации.

Использование энергии взрыва в скважинных геотехнологиях извлечения полезных ископаемых. Скважинные геотехнологии извлечения из недр жидких и газообразных ископаемых (нефти, газа, подземных вод) основаны на отборе из прискважинной зоны флюидов, поступающих по фильтрационным каналам. В последние годы бесшахтным методом начали разрабатывать и некоторые виды твердых полезных ископаемых (выщелачивание в межскважинном пространстве закачиванием растворов, выплавка серы и т.п.).

Во всех этих технологических схемах важным моментом является поддержание стабильных фильтрационных потоков в прискважинной зоне или создание системы трещин в межскважинной зоне твердого полезного ископаемого.

Взрывные работы призваны обеспечить: в первом случае – повысить коэффициент фильтрации в продуктовой призабойной зоне за счет образующейся вокруг заряда зоны дробления и трещин, во втором – создать систему трещин, сообщающихся между соседними скважинами. Докторами техн. наук А. В. Михалюком, Ю. И. Войтенко, кандидатами техн. наук Н. А. Лысюком и А. Ф. Белоиваном разработаны аналитические расчетные методы определения параметров зоны дробления и трещинообразования в призабойном и межскважинном пространствах, созданы конструкции торпед, генераторов и технологий их использования, защитных устройств, предохраняющих обсадку скважин. Исследованиями показано, что вязкость горных пород не является константной характеристикой и зависит от длительности приложенной нагрузки, а также температуры и физико-механических свойств пород. Полученные количественные данные о механизме образования и размерах характерных зон наведенной трещинной пустотности с расстоянием от очага позволили выработать ряд конкретных рекомендаций, направленных на увеличение дебита продуктивных скважин в 1,14...3 раза в течение 100...400 дней.

Разработка средств и методов вторичного взрывания. Теоретической основой данного направления явились результаты исследований составов ВВ с добавками поверхностно-активных веществ (ПАВ), их адсорбционных параметров на поверхности раздела раствор–воздух. Образующие в результате адсорбции ПАВ поверхностные пленки играют основную роль в процессах возникновения и стабилизации пен («живучести») для достижения более плотной упаковки молекул ПАВ (основы стабильности). Сотрудники ОГВ (Т. П. Кудря, Ф. М. Галаджий, А. А. Вовк, Н. В. Кривцов, В. Г. Кравец, В. И. Плужник) предложили и исследовали бинарные смеси ПАВ, позволяющие получить более плотные адсорбционные слои за счет образования молекулярных агрегатов. Наиболее перспективными признаны бинарные смеси додецилсульфата натрия и моноалкилоламов жирных кислот, образующие комплексы, которые приобретают значительную долю олеофильности и обладают повышенной адсорбционной способностью. Таким способом удалось создать пенообразные стабильные составы, обладающие повышенной удерживающей способностью селитры, и добиться улучшения условий контактного взаимодействия между компонентами взрывчатых смесей с возможностью регулирования плотности от 0,15 до 0,84 г/см³ в зависимости от технологических требований. Следует особо отметить, что с помощью таких взрывчатых составов удастся увеличить длительность головной части импульса в 1,2...1,8 раза по сравнению со стандартным ВВ игданитом при снижении амплитуды давления на фронте, что обеспечивает разрушение негабаритных камней без переизмельчения, значительное снижение интенсивности ударной воздушной волны и уменьшение разлета кусков.

Для увеличения стабильности пенообразных составов предложены и защищены патентом (авторы А. А. Вовк, В. В. Бойко, В. И. Плужник, С. Д. Лысюк) твердопенные составы с зафиксированной после вспенивания плотностью за счет затвердевающих добавок.

Из числа других способов разрушения негабаритных камней изучались возможности электрогидравлического метода возбуждения механического разрушающего импульса, способного выполнить требуемую операцию по раскалыванию негабаритного камня. Важной особенностью этого метода является возможность регулирования параметров импульса изменением электрических параметров разрядного контура.

Исследования в области промышленной сейсмологии. На основе уникального экспериментального материала, полученного исследованиями в Отделении, дополненного данными обработки сейсмограмм промышленных взрывов, впервые сформулирован ряд положений, уточняющих картину формирования и движения сейсмических волн в различных средах. Важным результатом можно считать выработку концепции зарождения и движения сейсмических волн, уточнение методик определения размеров сейсмического очага с учетом не только зоны систематических трещин, но и случайных (локальных) зон, влияющих на величину начальных параметров сейсмических волн, которые входят в алгоритм, описывающий их движение (О. А. Вовк). В работах А. А. Кузьменко и А. А. Вовка впервые опубликованы данные о влиянии

геометрии заряда на кинематические и частотно-временные параметры сейсмозрывных волн, освещен ряд положений об энергетике сейсмических волн, вызванных горными ударами.

Среди наиболее существенных результатов можно отметить следующие:

установлено влияние конструктивных особенностей цилиндрического заряда на интенсивность сейсмозрывной волны и закономерности ее затухания с расстоянием, что позволяет не только более точно прогнозировать сейсмобезопасное ведение ВР, но и на принципиально новой основе вести расчет значений параметров сейсмозрывных волн;

разработана методика определения размеров зоны необратимых деформаций сжимаемых и скальных грунтов (радиуса излучателя), являющейся очагом сейсмозрывных волн. Установлено, что при взрыве рассредоточенных зарядов сейсмоэффект существенно больше, чем при взрыве сосредоточенного заряда эквивалентной массы;

разработан эффективный метод прогнозирования сейсмического влияния взрыва цепочки зарядов при проходке траншей, экранов и щелей возле охраняемых объектов;

получены новые данные по закономерностям движения сейсмозрывных волн при массовых взрывах, уточнены допустимые значения интенсивности на жилые и производственные здания в зависимости от их технического состояния (В. В. Бойко, А. А. Кузьменко, В. Д. Воробьев);

разработаны методы снижения в 1,5...2,5 раза интенсивности воздействия сейсмозрывных волн на охраняемые объекты с помощью создания перед объектом искусственной преграды в виде цепочки полостей, полученных взрывом ряда вертикальных цилиндрических зарядов, разработан и внедрен укладчик детонирующего шнура для возбуждения сейсмических волн линейно-протяженными источниками (А. А. Кузьменко, В. Г. Кравец, В. Д. Воробьев).

В последние годы были выполнены исследования по прогнозированию горных ударов, их влияния на поверхностные объекты, разработаны методы ликвидации их сейсмического влияния на поверхности над подрабатываемыми территориями (А. А. Вовк, В. Г. Кравец, М. Кугель, О. А. Вовк). Обоснован критерий энергетической оценки горных ударов по тротиловому эквиваленту, разработан графоаналитический метод оценки сейсмобезопасных расстояний над эпицентром горного удара с учетом глубины очага горного удара и физико-механических свойств пород над ним (О. А. Вовк). Результаты приведенных выше исследований отражены в более чем 60 монографиях и брошюрах, свыше 600 научных публикациях, в том числе в 100 зарубежных изданиях.

Цикл работ по прикладной геодинамике взрыва был отмечен Государственной премией Украины в области науки и техники (авторы А. А. Вовк, В. Г. Кравец, Л. И. Демешук, А. А. Кузьменко, А. М. Рыжов, В. В. Тесленко, С. С. Григорян, В. И. Плужник). Отдельные разработки отмечены дипломами Почета ВДНХ СССР и УССР, медалями ВДНХ, почетными грамотами Минводхоза СССР, Президиума АН УССР.

Заключение

Из вышеизложенного и библиографии основных публикаций сотрудников ОГВ следует вывод о значительном объеме выполненных исследований по прикладной геодинамике взрыва. К числу наиболее значимых из них, где получены пионерные разработки, можно отнести:

решение класса динамических задач по динамике связных грунтов с использованием более совершенных моделей и существенным развитием численных методов;

получение полостей в грунтах, стволов шахт, шпуров, колодцев для водоснабжения, водосейсмозащитных экранов, подземных хранилищ;

взрывные методы ликвидации просадочных свойств лессовых грунтов;

результаты использования энергии взрыва в геотехнологиях;

получение открытых выемок (каналов, коллекторов, водоемов) в необводненных и водонасыщенных грунтах – руслорегулирование, дноуглубление, осушительные каналы, посадка насыпей на минеральное дно болот;

разработка средств и методов ведения взрывных работ в скальных и нескальных грунтах;

разработка рецептур новых ВВ и конструкций зарядов и специальных торпедирующих устройств, разработка средств механизации приготовления и укладки зарядов в траншеи и скважины;

результаты исследований сейсмобезопасности взрывных работ при массовых взрывах траншейных и скважинных зарядов;

исследования сейсмического действия горных ударов;

методические разработки по расчету эффективных и безопасных параметров взрывных работ в мягких грунтах и скальных породах.

Таким образом, максимальная активность в развитии исследований по проблемам прикладной геодинамики взрыва и их реализации в различных отраслях промышленности приходится на период 70–80 гг. Инженерные и конструкторские наработки Отделения и его СКТБ, всесторонне апробированные в полигонных и полупромышленных условиях, были востребованы многими заказчиками: Минцветметом, Минводхозом, Кривбассвзрывпромом, КБ «Южное», рядом организаций ВПК («Вымпел», Ленинградское КБСМ, Загорский НИИ), внедрялись на различных объектах Белоруссии, Литвы, Грузии, Молдовы, Российской Федерации, Туркмении, Казахстана, Киргизии и др. Причиной снижения активности и объема исследований по проблеме в последние годы явились следующие обстоятельства. В 1985–1986 гг. усилиями работников директивных органов была реализована коррумпированная акция по «реорганизации» ОГВ и СКТБ, в результате которой было заменено руководство, якобы из-за имевшихся злоупотреблений и хищений (не подтвердившихся после проверки органами прокуратуры). Цель была достигнута – прежнее руководство сменили, а многих сотрудников уволили. Таким образом, коррупционная схема сработала, важная научная тематика, развитая в экспериментально-производственных координатах и ориентиро-

ванная на повседневное сопровождение прогрессивных взрывных технологий и их элементов, была недальновидно и неграмотно изжита.

В настоящее время отдельные фрагменты прежней проблемы разрабатываются в ряде институтов: гидромеханики, промышленной безопасности и охраны труда, механики, НТУУ «КПИ». Разумеется, они разрознены и значительно менее эффективны, хотя кадровый потенциал, как отмечено выше, значительный: 15 докторов наук, а еще есть высококвалифицированные кандидаты – А. И. Крючков, Н. А. Лысюк, А. А. Кузьменко, Л. И. Демещук, В. И. Плужник, А. А. Фролов и др.

Следуя европейскому вектору развития науки, возможно, оптимальным вариантом было бы объединение усилий специалистов данного профиля на базе бывшего горно-механического факультета (теперь ИЭЭ) НТУУ «КПИ» (где уже в настоящее время работает на основной работе или по совместительству более 10 докторов наук), для активизации исследований и подготовки кадров высшей квалификации.

1. *Вовк А. А.* Справочник взрывника. – К.: Гостехиздат УССР, 1963. – 288 с.
2. *Товстановский Д. П., Нестеров П. Г., Вовк А. А.* Производительность труда на горнорудных предприятиях Украины. – К.: Гостехиздат УССР, 1963. – 256 с.
3. *Вовк А. А., Кочерга Н. Т., Черный Г. И.* Разработка рудных месторождений Украины на больших глубинах. – К.: Гостехиздат УССР, 1964. – 268 с.
4. *Вовк А. А., Черный Г. И.* Разработка месторождений полезных ископаемых комбинированным способом. – К.: Наук. думка, 1965. – 192 с.
5. *Вовк А. А., Черный Г. И., Смирнов А. Г.* Основы взрывной проходки подземных выработок. – К.: Наук. думка, 1966. – 236 с.
6. *Вовк А. А., Черный Г. И., Смирнов А. Г.* Деформирование сжимаемых сред при динамических нагрузках. – К.: Наук. думка, 1971. – 176 с.
7. *Вовк А. А., Черный Г. И., Михалюк А. В.* Действие взрыва в грунтах. – К.: Наук. думка, 1973. – 280 с.
8. *Вовк А. А., Черный Г. И.* Взрывные работы в горных породах. – К.: Техника, 1973. – 164 с.
9. *Вовк О. О.* Вибух. – К.: Наук. думка, 1973. – 255 с.
10. *Акутин Г. К., Вовк А. А., Кравец В. Г. и др.* Действие крупномасштабных взрывов в массиве горных пород. – К.: Наук. думка. – 1974. – Ч. 1. – 155 с.
11. *Вовк А. А., Смирнов А. Г., Кравец В. Г.* Динамика водонасыщенных грунтов. – К.: Наук. думка, 1975. – 202 с.
12. *Вовк А. А.* Основы прикладной геодинамики грунтов. – К.: Наук. думка, 1976. – 273 с.
13. *Лучко И. А., Плаксий В. А.* Прикладные задачи динамики грунтов. – К.: Наук. думка, 1979. – 132 с.
14. *Кравец В. Г.* Динамика уплотнения грунтового массива взрывом. – К.: Наук. думка, 1979. – 134 с.
15. *Вовк А. А.* Укращення вибуха. – К.: Наук. думка, 1979. – 176 с.

16. *Черный Г. И.* Изменение физико-механических свойств грунтов при динамических нагрузках. – К.: Наук. думка, 1979. – 114 с.
17. *Вовк А. А., Ткачук К. Н., Гоблер М. А.* Взрывные работы в сложных горно-геологических условиях. – К.: Наук. думка, 1980. – 290 с.
18. *Михалюк А. В.* Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. – К.: Наук. думка, 1980. – 151 с.
19. *Геодинамика взрыва и ее приложения / А. А. Вовк, В. Г. Кравец, И. А. Лучко, А. В. Михалюк.* – К.: Наук. думка, 1981. – 296 с.
20. *Новиков В. Д., Луговой П. З.* Подводные и прибрежные взрывы. – К.: Наук. думка. – 1982. – 136 с.
21. *Ефремов Э. И., Вовк А. А.* Справочник по взрывным работам. – К.: Наук. думка, 1983. – 328 с.
22. *Кравец В. Г., Грищенко Н. С., Демещук Л. И.* Формирование инженерных свойств грунтов взрывными методами. – К.: Наук. думка, 1983. – 188 с.
23. *Смирнов А. Г., Бержишкис И. С.* Использование взрыва при строительстве сооружений в водонасыщенных грунтах. – М.: Недра, 1984. – 216 с.
24. *Вовк А. А., Замышляев Б. В и др.* Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок. – К.: Наук. думка, 1984. – 288 с.
25. *Воробьев В. Д., Перегудов В. В.* Взрывные работы в скальных породах. – К.: Наук. думка, 1984. – 240 с.
26. *Вовк А. А., Лучко И. А.* Управление взрывным импульсом в породных массивах. – К.: Наук. думка, 1985. – 215 с.
27. *Михалюк А. В.* Торпедирование и импульсный гидроразрыв пластов. – К.: Наук. думка, 1986. – 208 с.
28. *Кравец В. Г., Лучко И. А., Михалюк А. В.* Использование взрыва в мелиоративном строительстве. – М.: Недра, 1987. – 208 с.
29. *Лучко И. А., Плаксий В. А., Ремез Н. С. и др.* Механический эффект взрыва в грунтах. – К.: Наук. думка, 1989. – 232 с.
30. *Геомеханика и ее практические приложения / А. А. Вовк, В. Г. Кравец, А. С. Марченко, Р. Т. Темирбулатов.* – К., 1989. – Ин-т геофизики им. Субботина АН УССР. – 206 с.
31. *Сейсмическое действие взрыва в горных породах / А. А. Кузьменко, В. Д. Воробьев, И. И. Денисюк, А. А. Дауетас.* – М.: Недра, 1990. – 173 с.
32. *Seismic effects of blasting in rock/ А. А. Kuzmenko, V. D. Vorobev, I. I. Denizyuk, A. A. Dauetas // Oxford and IBN Publishing Co. Pvt. Ltd.: New Delhi, 1993. – 169 p.*
33. *Бруякин А. В., Воробьев В. Д.* Буровзрывные работы в строительстве. Краткий справочник. – К.: Будівельник, 1993. – 176 с.
34. *Барановский З., Вовк А. А., Кравец В. Г.* Вопросы защиты поверхностных зданий и сооружений на подрабатываемых территориях. – К.: Институт гидромеханики НАНУ, 1996. – 114 с.

35. *Вовк А. А., Барановский З. и др.* Закономерности деформаций грунтов и горных пород при динамических воздействиях. – К.: Институт гидромеханики НАНУ, 1996. – 170 с.

36. *Вовк А. А., Воеводка А., Кужея Е.* Некоторые проблемы экологии в горнодобывающей промышленности. – К.: НТУ Украины «КПИ», ИГМ НАНУ, 1996. – 157 с.

37. *Прокопенко В. С., Лотоус В. В.* Разрушение твердых горных пород взрывами скважинных зарядов взрывчатых веществ в рукавах. – К.: ЗАО «Техновзрыв», ОАО «Полтавский ГОК». – 2003. – 82 с.

38. *Chudek H, Krawiec W., Wowk A. i in.* Kompleksowa metoda prognozowania oddziaływania wpływu podziemnej eksploatacji złóż oraz wstczasów gorotworu na chronione obiekty powierzchniowe w brzeźnym obszarze niecki obniżeniowej. – Gliwice, 2003. – Wydawnictwo politechniki se skiej. – 535 s.

39. *Прокопенко В. С.* Основы методов гранулометрии взорванной горной массы. – К.: Политехника, 2005. – 172 с.

40. *Прокопенко В. С., Лотоус К. В.* Взрывание горных пород скважинными зарядами взрывчатых веществ в рукавах. – К.: Политехника, 2006. – 113 с.

41. *Воробьев В. Д.* Учет анизотропии массива при выборе сейсмо-безопасных параметров взрывных работ // Добыча угля открытым способом. – М.: ЦНИЭИуголь. – 1982. – № 5. – С. 6–7.

42. *Воробьев В. Д., Гончар И. Ф., Ходос Л. П.* Методические рекомендации по расчету эффективных и безопасных параметров взрывных работ на карьерах. – Тернополь: Збруч, 1982. – 98 с.

43. *Кравець В. Г., Воробийов В. Д., Кузьменко А. О.* Підривні роботи на кар'єрах. – К.: ІСДО, 1994. – 375 с.

44. *Смирнов А. Г., Воробьев В. Д., Громов В. А.* Добыча и переработка нерудных строительных материалов. – К.: Будівельник, 1984. – 96 с.

45. *Временная инструкция по проектированию и производству буровзрывных работ на карьерах нерудной промышленности для использования унифицированных буровых станков УСБШ-130/165-32/А.* А. Вовк, В. Д. Воробьев, А. А. Кузьменко и др. – К.: АО «Випол», 1995. – 117 с.

46. *Крючков А. И., Воробьев В. Д.* Методика расчета параметров взрывных работ в блочных массивах скальных пород на карьерах. – К.: Випол, 1995. – 54 с.

47. *Рекомендации по снижению энергоемкости буровзрывных работ на карьерах* // В. Д. Воробьев, А. И. Крючков, В. С. Прокопенко и др. – К.: Випол, 1996. – 66 с. (Энергоемкость технологического цикла «Карьер-ДСЗ»; Ч. 4).

48. *Кузьменко А. О.* Оцінка масштабності аварійного вибуху за його уражаючими факторами // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – К.: НТУУ «КПІ». – 2007. – Вип. 15. – С. 158–162.

49. *Луговий П. З., Анік'єв І. І., Сущенко Є. О.* Визначення та аналіз ударних і сейсмічних навантажень на об'єкт під дією вибуху // Проблеми охорони праці в Україні. – К.: ННДІОП. – 2000. – Вип. 3. – С. 63–68.