

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ РАЗВИТИЯ ВЗРЫВНОГО ДЕЛА В УКРАИНЕ

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

Висвітлені основні напрямки розвитку наукових досліджень в галузі використання енергії вибуху в народному господарстві України. Відмічено вклад видатних українських фахівців вибухової справи у розв'язанні різноманітних прикладних задач геодинаміки вибуху.

Украина, занимая 0,5% мировой суши, добывает 5% твердых полезных ископаемых (руд, угля, строительных материалов). Минеральное сырье добывается главным образом с применением энергии взрыва.

Область применения взрывных работ непрерывно расширялась, охватывая горно-строительные технологии возведения инженерных сооружений в мягких и скальных грунтах, отдельные процессы машиностроения, металлообработки и материаловедения. Конкретные запросы производства стимулировали развитие научных исследований, способствовавших совершенствованию существующих и созданию новых технологий и их элементов с использованием энергии взрыва в указанных трех направлениях. На горнодобывающих предприятиях ставилась задача повышения степени дробления горной породы взрывом с целью увеличения производительности погрузочно-транспортного, дробильного и обогатительного оборудования, уменьшения и снижения эксплуатационных затрат.

В плане научно-инженерного обеспечения этих работ необходимо было сформулировать научную концепцию, разработать аналитические подходы, направленные на: изучение закономерностей деформирования горных пород, разработку их математических моделей и построение уравнений состояния; исследование предельного состояния и разрушения пород; создание математического аппарата для количественного описания распространения трещин при произвольных внешних воздействиях; исследование сложных пространственных движений горных пород в динамическом силовом поле; изучение закономерностей распространения в массивах импульсных возмущений и их взаимодействия с горной породой и др.

Если ограничиться рассмотрением вопросов научно-технического прогресса в области взрывного дела начиная с послевоенных лет и до настоящего времени, можно отметить следующее. Исследования на Украине в начальный период осуществлялись “под патронатом” главным образом московской школы взрывников и механиков, и вычленили из общего массива достижений компоненту украинских специалистов затруднительно.

Однако начиная со второй половины 50-х годов Днепропетровский горный, Криворожский горнорудный, Донецкий индустриальный, Киевский политехнический институты, МакНИИ, а позднее академические институты

геотехнической механики горного дела, геофизики, электросварки, проблем материаловедения становятся центрами зарождения и развития исследований по многим проблемам, связанным с ускорением научно-технического прогресса как в традиционных отраслях – угольной и горнорудной промышленности, добыче строительных материалов, так и в совершенно новых направлениях – при строительстве каналов, полостей, обработке просадочных массивов и т.д.

Развитие научно-исследовательских работ базировалось, как правило, на новых концептуальных положениях, сформулированных на тот период. При решении многих задач приходилось отказываться от устоявшихся представлений: о мгновенной передаче энергии взрыва окружающей среде; о целесообразности использования критерия равенства акустической жесткости породы и импеданса взрывчатого вещества (ВВ) как оптимальной его характеристики, что вело к завышенной оценке полезности такого параметра, как скорость детонации; о чисто волновом механизме воздействия взрыва на массив.

Сложность реальной горной породы как гетерогенной поликристаллической среды является причиной того, что теоретически построенные уравнения состояния горных пород носят преимущественно характер физических оценок, основанных на весьма упрощенных моделях, позволяющих лишь качественно объяснить изменение основных свойств горных пород при их динамическом нагружении. Поэтому основным источником сведений о динамических свойствах горных пород являлся эксперимент. С прикладной точки зрения большое значение приобрела разработка математических моделей в области умеренных нагружений, сравнимых с прочностью породы.

В основу исследований этого периода была положена концепция, рассматривающая взаимодействие элементов и системы заряд–окружающая среда в пространственно-временных координатах. Согласно энергетическому подходу к механизму деформации массива при приложении импульсной нагрузки процесс разрушения в форме развития трещин является инерционным, и для его реализации требуется соблюдение определенных параметров нагружения при регулировании обеих составляющих взрывного импульса: и силовой, и временной.

Основным способом обеспечения повышения эффективности использования энергии взрыва ВВ является управление: взрывчатым превращением ВВ, формированием оптимальных параметров взрывного импульса на стадии детонации ВВ, подбором соответствующих рецептур и методов инициирования; пространственным расположением ВВ в разрушаемом массиве; технологией взрывания – последовательностью детонации зарядов в пространстве и времени, а также направлением распространения детонации по заряду и регулированием ее параметров вдоль скважины.

Развитие открытого способа добычи полезных ископаемых стимулировали ускорение темпов научного обеспечения, небывалый рост высококвалифицированных научных и научно-инженерных кадров, формирование мощных региональных школ, в первую очередь Днепропетровско-Криворожской (горнорудная промышленность), Донецко-Макеевской (Донецкий политехнический институт, МакНИИ – угольная промышленность), Киевской

(геодинамика сжимаемых грунтов и скальных пород, создание ВВ с регулируемыми оптимальными характеристиками, сварка, резка металлов, получение новых материалов с особыми свойствами).

Многие важные научные разработки, выполненные представителями этих школ, носили пионерный характер и зачастую реализовывались за пределами Украины. В связи с этим отметим достижения и этапы развития взрывного дела по отдельным направлениям и отраслям народного хозяйства.

В горнорудной промышленности. Потребность металлургической отрасли в больших объемах железорудного и флюсового сырья обусловила применение новых средств и технологий дробления горного массива на открытых разработках и в подземных условиях при добыче крепких руд и ликвидации образованных после выемки руды пустот. Как в рудниках, добывающих богатые руды подземным способом, так и на открытых горных работах преимущественное распространение получают массовые крупномасштабные взрывы. В последнем случае это связано с разработкой и обогащением бедных железистых кварцитов и во много раз возросшими объемами горной массы на вскрышных и добычных горизонтах.

Коренное усовершенствование взрывных работ потребовало соответствующего научного сопровождения силами днепропетровской и криворожской групп научных работников. В Днепропетровском горном институте, а затем в институте геотехнической механики АН УССР были начаты комплексные исследования по моделированию взрывных процессов, их опытно-промышленной проверке на горных предприятиях Кривого Рога, Докучаевска и других горнодобывающих районов Украины и широкая реализация разработанных научно-производственных рекомендаций (Ф. И. Кучерявый, М. Ф. Друкованый, Э. И. Ефремов, В. М. Комир, В. Д. Петренко и др.). Параллельно работам днепропетровцев развивались исследования криворожской группы ученых (Г. М. Китач, Г. М. Малахов, К. Н. Ткачук, В. В. Недин, П. И. Федоренко, В. Ф. Бызов, Ю. С. Мец, В. В. Перегудов и др.). Этими учеными выполнялись исследования по многим актуальным направлениям.

Необходимо было незамедлительно решать проблемы повышения эффективности процесса разрушения породы при массовом многорядном взрывании, сводя при этом к минимуму вредное воздействие на близлежащие производственные и жилищно-коммунальные объекты. Одной из первоочередных разработок явились рекомендации по короткозамедленному взрыванию (КЗВ) [3, 6, 12].

Работами днепропетровских ученых установлено, что процесс разрушения массива представляет собой последовательное во времени явление, которое условно можно подразделить на следующие взаимосвязанные этапы: зарождение (образование) трещин – развитие трещин – движение среды. Из результатов исследований вытекает, что длительность каждой стадии процесса разрушения отличается на порядок. Указанные положения вполне согласуются с представлением об инерционности механизма передачи энергии внешних сил в точке дислокаций, в связи с чем имеет место некий инкубационный период времени для их взаимодействия, в процессе которого происходит накопление

упругой энергии с последующим поглощением ее части пластическими деформациями, замедляющими образование новых поверхностей на докритической стадии.

Если время действия нагрузки меньше инкубационного периода (зависящего от текстуры и прочности породы), то разрушение породы произойдет лишь при напряжениях, равных теоретической прочности или превышающих ее, что в реальных условиях нагружения выполняется лишь в непосредственной близости от заряда (не более 1...3 радиусов заряда), а разрушение среды носит пластический характер. Это положение послужило отправным моментом при разработке механизмов оптимизации взрывного разрушения горных пород: КЗВ, внутрискважинное замедление (М. Ф. Друкованый, Э. И. Ефремов), взрывание в зажатой среде (М. Г. Новожилов, Ф. И. Кучерявый, М. Ф. Друкованый и др.), каскадное инициирование (В. Д. Воробьев, В. В. Перегудов), по методу суперпозиций, предусматривающему описание поля напряжений от зарядов при помощи суммарного потенциала (А. В. Михалюк, А. А. Вовк, Ю. И. Войтенко, П. З. Луговой).

Для достижения высокого эффекта взрыва по схемам взрывания необходимо правильно выбирать параметры сетки расположения скважин и интервалы замедления, поскольку лишь оптимальные их значения, учитывающие особенности процесса деформирования, обеспечивают интенсивное и равномерное дробление массива. При этом эффективность взрыва повышается, когда массив в результате взрыва зарядов первой очереди находится в напряженном состоянии к моменту взрыва зарядов последующей очереди [6, 13].

За период реализации многообразных схем КЗВ (“через один”, “клин”, “трапецеидальный клин”, порядные врубовые, поперечные ряды, диагональные, диагонально-волновые, радиальные, комбинированные) [3, 17, 22, 37] были достигнуты серьезные успехи: выход горной массы с одного метра длины скважины увеличился в 1,3–2 раза при значительном сокращении выхода негабаритов – с 15...20% до 1% [6], до 4,2...0,01% [17] и т.п.

Учеными и производственниками были разработаны несколько вариантов схем КЗВ: на необрушенную горную массу и на неразрушенный массив [6, 7, 16, 41].

Наряду с методами интенсификации и оптимизации взрывных работ [3, 7, 10, 16, 22, 34] были реализованы разнообразные рекомендации по оптимизации конструкции заряда, из которых наибольшее распространение получили комбинированные заряды с каскадным инициированием, с воздушными оболочками и промежутками, водяными промежутками [44], в специальных оболочках-рукавах [62] и т.п.

Преимуществом зарядов с каскадным инициированием является то, что при формировании их при различных сочетаниях типов ВВ по величине и мощности можно дифференцированно распределять энергию взрыва по высоте разрушаемого уступа пород. При взрыве [44] образуется неоднородное поле напряжения по длине скважины, а импульс взрыва каждой части заряда может иметь несколько максимумов. Подбирая типы ВВ и оптимальные соотношения их в парах, можно обеспечить многократное нагружение околоскважинного

материала по вертикали (вдоль скважины), а, следовательно, и увеличение времени воздействия. В горизонтальном направлении подобный эффект достигается за счет взрывания с замедлением.

В процессе реализации научных разработок ученые и производственники искали решения, направленные на минимизацию вредных факторов от действия взрыва. К числу таких мероприятий и рекомендаций можно отнести ограничение масштабов одноразовых взрывов с целью снижения интенсивности сейсмических волн, уменьшения времени заряжания и потребности в оборотных средствах за счет ускорения их оборачиваемости; разработку предложений по созданию новых рецептур ВВ, которые отвечали бы реальным требованиям горных предприятий – обладали водостойкостью и в то же время не содержали в своем составе тротила (либо содержали его в минимальном количестве); обеспечение возможности механизации зарядных работ.

Исходя из этого, были выработаны принципиальные подходы при решении проблемы обеспечения горных предприятий ВВ с оптимальными характеристиками и средствами механизации транспортно-зарядных работ. Одним из важных направлений было создание водоустойчивых составов без увеличения их стоимости, а также приготовление ВВ на месте производства зарядных работ из невзрывчатых компонентов. Поскольку бестротиловые гранулированные составы в качестве окислителя содержали аммиачную селитру, встал вопрос об усовершенствовании ее характеристик, в основном о повышении удерживающей способности за счет использования добавки высокодисперсной двуокиси кремния, аминоэтоксидиоксиаэросила, загустителя нефтебитума БН-III, гидрофобизации нанесением покрытия на гранулы полимеров, смешивания с аэрированным дизтопливом и др.

Стабилизация детонации и повышение плотности взрывчатой смеси достигались путем введения калиевой соли жирных кислот фракции $C_5...C_9$ (В. И. Плужник, Т. П. Кудря). Киевской группой взрывников (Ф. М. Галаджий, Н. В. Кривцов, А. А. Вовк, В. Г. Кравец, Т. П. Кудря, В. И. Плужник) на основе разносторонних исследований физико-химических процессов детонации взрывчатых составов и полигонных испытаний был разработан класс новых малоплотных взрывчатых веществ пенообразной консистенции (плотностью от 0,1 до 0,7 г/см³), позволяющих в значительной мере решить проблему вторичного дробления в наиболее безопасном и экологически благоприятном режимах.

Среди большого количества разработок можно отметить создание для условий разработки кимберлитовых, алмазосодержащих трубок специальных конструкций зарядов, работающих в режиме «обратной связи» (Т. П. Кудря, В. И. Плужник, Ф. М. Галаджий, А. А. Вовк, М. Ш. Кендис, В. Н. Глущенко, В. В. Бойко). Такой патрон состоит из полиэтиленовой оболочки с внутренними перегородками, между которыми размещены два или три слоя взрывчатых смесей. Особенностью действия такого слоистого патрона на среду является то, что скорость детонации слоев зависит от крепости пород (чем она больше, тем скорость детонации смеси в слоях больше и наоборот). Такое саморегулирование детонации позволяет оптимизировать параметры импульса взрыва.

За последние годы значительный объем взрывных работ выполняется с использованием зарядов смесевых ВВ с различными свойствами, помещаемых в полиэтиленовые оболочки (рукава) [62]. Такая технология, обеспеченная соответствующими средствами механизации всего производственного цикла, способствует снижению расхода ВВ на 17...30% при сохранении качества взорванной массы, устраняет вымывание ВВ, обеспечивает равномерность заряда по длине скважины, повышает эффективность за счет добавления в заряд в процессе его формирования определенных количеств различных компонентов – активных веществ, повышающих водоустойчивость и энергонасыщенность заряда.

Большую роль в процессе взрывного дробления массива играет правильно выбранная конструкция заряда, в частности оптимально выполненная забойка. Украинскими учеными (Э. И. Ефремов, С. В. Шевченко, В. В. Воробьев, В. С. Прокопенко, М. Ф. Друкованый, В. М. Комир, В. Ф. Скорченко, В. Г. Кравец и др.) предложены разнообразные конструкции и параметры забойки (активная, пассивная, комбинированная), способствующие задержанию выброса продуктов взрыва в атмосферу и снижению количества выброса токсичных газов за счет добавления в материал забойки соответствующих абсорбентов, применения вариантов внутренней и внешней водяной забоек и т.п. Многие из этих предложений не имеют аналогов в мировой практике ведения взрывных работ.

В угольной промышленности. Эта отрасль имеет свою специфику. Разработка средств и методов взрывных работ осуществлялась главным образом научными коллективами Донецкого политехнического института и МакНИИ. Последний в послевоенные годы занял ведущее положение в бывшем СССР по многим вопросам безопасного ведения взрывных работ [4, 5, 33, 34]. Особенностью разработки угольных месторождений является наличие в углях метана и образование взрывоопасных пылевоздушных смесей, способных взрываться. Поэтому, где это возможно, предпочитают механические методы разрушения угля (а в ряде случаев и породы). Разработаны различные мероприятия, целью которых является воздействие на свойства и состояние пласта. Первостепенное значение среди них имеют торпедирование, камуфлетное и двухъярусное взрывание, вызывающие контролируемый выброс при отсутствии людей и др.

Применение камуфлетного взрывания снижает напряжения в призабойной зоне вследствие нарушения структуры угля, быстрой его дегазации и перемещения зоны концентрации давления вглубь целика. Производят такие взрывы зарядами 2...4 кг ВВ в шпурах длиной 6...8 м [33].

В случае большой опасности выбросов при проходке выработок применяется сотрясательное взрывание зарядами ВВ удвоенной массы, вызывающее спровоцированный выброс и снятие напряжений. В забоях подготовительных и очистных выработок и в наиболее выбросоопасных зонах производят торпедирование угольного массива.

Эти разработки, базирующиеся на фундаментальных исследованиях газодинамических процессов в горном массиве, его напряженного состояния (В. Т. Глушко), в подавляющем количестве случаев носили пионерный

характер, а некоторые из них отмечены Государственной премией СССР (Ф. М. Галаджий и др.).

Определенные достижения донецких специалистов имеют место в вопросах создания предохранительных ВВ и электродетонаторов (Ф. М. Галаджий, Н. А. Росинский), днепропетровских – в области изучения механики горных пород и выбросоопасных массивов, ведения взрывных работ в этих условиях (М. Ф. Друкованый, В. М. Комир, В. Т. Глушко, Б. М. Усаченко, Э. И. Ефремов, В. Н. Харитонов).

В области использования энергии взрыва в машиностроении и металлообработке наиболее весомые результаты получили в Институте электросварки АН УССР – сварка взрывом, резка металла специальными зарядами с боковой кумуляцией (В. М. Кудинов, А. А. Волгин, С. Г. Лебедь и др.), в Институте проблем материаловедения АН УССР – получение искусственных алмазов и боразона (Г. В. Саввакин, В. П. Алексеевский, Г. Г. Карик), создание гибких зарядов с боковой кумуляцией (В. И. Трофимов, Г. Г. Карик).

Серьезные работы выполнены киевскими специалистами по использованию энергии взрыва в скважинных геотехнологиях, позволяющих расширить сырьевую базу за счет вовлечения в эксплуатацию ранее нерентабельных залежей, поскольку разработка наиболее богатых и доступных месторождений не обеспечивала в должной мере потребностей промышленности. Скважинная геотехнология находит применение также при добыче руд твердых полезных ископаемых, выщелачивании растворимых солей, подземной выплавке серы.

Все технологические схемы включают, кроме буровых работ по вскрытию залежей, создание трещинообразных фильтрационных каналов между соседними скважинами (методами торпедирования, импульсного воздействия различной природы и т.п.). По этому направлению разработаны аналитические методы расчета параметров зоны трещинообразования в межскважинном пространстве при взрыве, созданы конструкции торпед и импульсных генераторов и технологии их применения (А. В. Михалюк, Ю. И. Войтенко, Н. А. Лысюк) [15, 17, 18, 32].

Исследованиями сотрудников Отделения геодинамики взрыва показано, что вязкость горных пород не является константной характеристикой и зависит от длительности приложенной нагрузки, температуры и физико-механических свойств пород (И. В. Белинский, А. В. Михалюк, Б. Я. Христофоров). В зернистых горных породах при неравномерном пространственном нагружении в допредельной области имеет место дилатантное разуплотнение горных пород, свидетельствующее о взаимной связи и взаимном влиянии шаровой и девиаторной компонент тензора напряжений и деформаций [10].

В области динамики связных грунтов. Становление и развитие исследований по использованию энергии взрыва в нескальных грунтах, в машиностроении и материаловедении является результатом деятельности многочисленной киевской школы взрывников в рамках решаемых академиком М. А. Лаврентьевым научно-прикладных проблем первоначально силами небольшой исследовательской группы (Н. М. Сытый, С. В. Малашенко, И. И. Ищенко, В. П. Алексеевский). Позднее при Институте геофизики АН УССР

были созданы СКТБ и отделение геодинамики взрыва, развернувшие широкий спектр исследований по многим проблемам прикладной геодинамики.

Из прикладных задач наиболее полное развитие и практическую реализацию получили следующие:

взрывные технологии получения подземных (камуфлетных) полостей и открытых выемок (в частности, каналов) в мягких породах;

взрывные методы просадочных свойств лессовых грунтов за счет более полной упаковки скелета грунта и методов снижения фильтрации;

взрывные технологии для выполнения энергоемких работ в труднодоступных местах (подводное взрывание, разрушение и перемещение водонасыщенных грунтов);

научные основы и технологические рекомендации в области использования скважинных геотехнологий для интенсификации притока флюидов и газов в призабойное пространство;

промышленная сейсмика и методы защиты поверхностных объектов над выработанным пространством от влияния горных ударов;

создание новых взрывчатых материалов и средств взрывания, позволяющих задать (и при необходимости изменять) детонационные характеристики и управлять механизмом формирования силовых полей на стадии детонации;

критерии совершенствования рецептур ВВ, средств и методов их взрывания как с позиций формирования оптимального силового поля, так и с ужесточением экологических требований.

Аналитические исследования выполнялись на основе новых методических подходов и концептуальных положений, более полно учитывающих реальные процессы, имеющие место при рассмотрении системы заряд–окружающая среда. Отличительными особенностями задач, решаемых по данному направлению, являются: импульсный характер применения нагрузки и волновой характер возмущений, распространяющихся 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.

Важным этапом в развитии динамики грунтов и горных пород был переход к использованию упруго-пластической модели С. С. Григоряна при описании процесса распространения волн, в которой помимо четырех уравнений – сохранения массы (неразрывности) и трех уравнений, соответствующих закону сохранения количества движения, добавляется замыкающее уравнение, выражающее свойства среды. В качестве такого уравнения принимается выражение, характеризующее объемную сжимаемость среды в виде зависимости среднего нормального напряжения от объективной деформации, то есть $\sigma = \sigma(\theta)$, которое определяется экспериментально. Для замыкания системы в модели используется еще одно уравнение, которое создает связь между главными напряжениями в виде условия пластичности Мизеса–Шлейхера, определяемого экспериментально, и представляет собой некую

функцию среднего нормального напряжения, характеризующую интенсивность касательных напряжений при пластическом состоянии твердого тела.

Достоверность и возможность практического использования в вычислительных алгоритмах для решения более высокого класса двумерных задач достигались за счет организации многочисленных экспериментов с использованием новейших, часто уникальных методик с получением экспериментальных данных.

Учитывая существенную нелинейность задач, большое внимание уделялось разработке вычислительных программ и развитию методов численного счета с реализацией конечно-разностных расчетных схем (И. А. Лучко, В. Г. Кравец, В. А. Плаксий, Н. С. Ремез).

Характерной особенностью исследований было привлечение смежных направлений геомеханики и других наук для выработки комплексных рекомендаций. Так, например, экспериментальные работы сопровождались совершенствованием существовавших и созданием новых методик и средств регистрации параметров взрывных волн с привлечением сведений в области научного приборостроения, в первую очередь, в процессе создания специальных датчиков (для регистрации давления, массовой скорости, ускорения) – механических и оптических тензометров, емкостных индуктивных и пьезоэлектрических преобразователей. Разрабатывались специальные методы прогнозирования механического действия взрыва в различных средах для получения сведений о поведении грунта естественного сложения при динамических нагрузках (В. И. Плужник, П. А. Паршуков, В. И. Кононенко, В. Н. Кобасов). В части организации экспериментальных исследований динамических волновых процессов в грунтах большие работы проведены В. Г. Кравцем, В. А. Плаксием, И. А. Лучко, Л. И. Демещуком, И. В. Белинским. В комплексных исследованиях уплотненной зоны необратимых деформаций вокруг взрывающегося заряда были задействованы нетрадиционные методы получения информации об остаточных явлениях последствия взрыва (полях деформаций), в числе которых В. Г. Кравцем и Л. И. Демещуком впервые в практике таких исследований использовались радиоактивные методы (γ - γ и нейтронного каротажа) и сейсмометрический метод, позволивший получать информацию в области микроструктурных изменений в зоне влияния взрыва (В. Г. Кравец, А. А. Кузьменко, В. В. Захаров, С. Н. Маркелов, Л. А. Фурман).

С развитием взрывных технологий разработки мягких грунтов возникла потребность в решении динамических задач, описывающих действия линейных зарядов выброса в двумерной постановке [36]. При этом процесс образования выемки рассматривается лишь на начальной (момент подачи импульса к заряду) и конечной (до момента прекращения движения грунта и ПД) стадиях.

Получение камуфлетных полостей в грунтах. Начало создания водозаборных колодцев в сжимаемых грунтах с использованием шпуровых зарядов было положено Институтом математики АН УССР (Н. М. Сытый). В дальнейшем это направление развивалось в Отделении геодинамики взрыва уже на комплексной основе с реализацией в различных отраслях промышленности.

Результаты этих разработок изложены в публикациях В. Г. Кравца, Г. И. Черного, А. А. Вовка, В. М. Глобы [8, 12, 18, 20, 32, 39, 41].

Особо следует выделить технологические рекомендации, основанные на результатах исследований полей деформаций вокруг взрывааемого заряда. Они послужили основой разработки взрывных методов ликвидации просадочных свойств лессовых грунтов (В. Г. Кравец, А. А. Вовк, Л. И. Демещук, И. М. Литвинов, А. М. Рыжов, В. И. Плужник, А. В. Михалюк, И. А. Лучко), устройства противодиффузионных экранов (В. Г. Кравец, В. Д. Воробьев, А. А. Кузьменко), снижения диффузионных потерь из водотранспортных магистралей (В. Г. Кравец, Л. И. Демещук, Ю. П. Андреев) [16, 24, 36, 40, 41, 50, 52].

Разработка методов подводного взрывания. Технологическим рекомендациям по применению энергии взрыва для разработки водонасыщенных грунтов, повышению дноуглубительных операций и других задач предшествовали аналитические решения по описанию затухания ударных волн и движению газового пузыря в воде (П. З. Луговой, И. А. Лучко, А. Г. Смирнов, А. А. Вовк, В. Д. Новиков). В рамках модели несжимаемой жидкости точные решения можно получить лишь для случая точечного взрыва в безграничной среде. Решения задач выполнялись в предположении, что под влиянием границ раздела сред (дна и поверхности) образуются волны, отраженные от этих границ и требующие решения нелинейных уравнений гидродинамики для двумерного нестационарного случая с получением недостающих констант и параметров экспериментальным путем. Задачи решались в акустическом приближении численными методами.

В прикладном плане были разработаны технологии сооружения осушительных каналов в украинском Полесье (Ю. П. Андреев, А. Г. Смирнов), в Грузии (И. А. Лучко, Ю. П. Андреев), строительства водоемов (Н. М. Сытый, Д. В. Бигдаш), а также создания водозащитных экранов, спрямления русел рек, строительства и углубления водоемов. Особый интерес представляют взрывные методы посадки насыпей на минеральное дно болот в дорожном строительстве. Одна из таких разработок была отмечена Государственной премией Литовской ССР в 1981 году, а два сотрудника (А. А. Вовк, А. Г. Смирнов) удостоены звания лауреатов этой премии [41, 42].

Возбуждение ударной волны в воде может быть вызвано не только взрывом заряда, но и с помощью подводного электроразряда. Для этого потребовались новые методики регулирования параметров импульса, заключающиеся в размещении в межэлектродном пространстве энергетической (газообразующей) добавки. При протекании разрядного тока через этот состав происходит его разогрев, сопровождающийся экзотермическим химическим превращением (В. И. Плужник, А. А. Вовк, Е. Олек). При этом повышается температура в разрядном промежутке с ростом амплитуды ударной волны и образуется дополнительное количество газообразных продуктов. Это способствует приросту как акустической энергии, так и энергии пульсирующего пузыря. Возрастает также временная составляющая импульса. На основе результатов исследований были разработаны конструкции комплексных переносных установок для бескапсюльного инициирования зарядов.

Разработка средств и методов вторичного взрывания. Поиски новых средств дробления негабаритов вместо кумулятивных накладных либо обычных шпуровых зарядов заводского изготовления осуществлялись в направлении замены их экономичными бесшпуровыми средствами местного приготовления. Такие методы ликвидации негабаритов были созданы на основе разработанного нового класса ВВ – пенообразных композиций переменной плотности, изготавливаемых на месте разделки негабаритов. Теоретической основой их создания явились исследования составов с добавкой поверхностно-активных веществ (ПАВ). Образующие в результате адсорбции ПАВ поверхностные пленки играют основную роль в процессах возникновения и стабилизации пен («живучести»).

Киевскими учеными (Т. П. Кудря, А. А. Вовк, Н. В. Кривцов, В. Г. Кравец, В. И. Плужник) предложены и исследованы бинарные смеси ПАВ, позволяющие получить более плотные адсорбционные слои за счет образования молекулярных агрегатов. Наиболее перспективными признаны бинарные смеси додецилсульфата натрия и моноалкиламидов 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.

В области сейсмобезопасности взрывных работ. В практике ведения взрывных работ специалисты столкнулись со все возрастающей сейсмоопасностью, причинами которой являются:

- развитие фронта работ в сторону застроенных территорий;
- применение технологий, предусматривающих одновременное взрывание больших масс зарядов ВВ;
- увеличение обводненности взрывааемых пород по мере углубления карьеров, приводящее к росту интенсивности сейсмозрывных волн.

В решение задач промышленной сейсмики украинскими учеными сделан существенный вклад. Основные результаты этих исследований содержатся в многочисленных публикациях Ф. И. Кучерявого, В. Д. Воробьева, Ю. С. Меца, А. А. Кузьменко, И. И. Денисюка, А. Закирова, В. Г. Кравца, А. А. Вовка и других. На основе уникального экспериментального материала, полученного исследователями, и обработки сейсмограмм промышленных взрывов впервые в практике горного дела был сформулирован ряд положений, уточняющих картину формирования и движения сейсмических волн в различных средах.

Среди них можно назвать следующие:

- установлено влияние конструктивных особенностей цилиндрического заряда на интенсивность сейсмозрывной волны и закономерностей ее затухания с расстоянием;
- разработана методика определения сейсмобезопасного расстояния в любом азимутальном направлении с учетом анизотропии горного массива;

разработана методика определения размеров зоны необратимых деформаций сжимаемых 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, и установлена зависимость периода колебаний от радиуса заряда, а не от его массы.

Наряду с исследованиями при взрывах вертикальных зарядов ВВ, аналогичные исследования выполнены и для случаев взрывания горизонтальных зарядов выброса, а также при взрывных работах по уплотнению лессовых грунтов (А. Закиров, А. С. Жмуденко, В. Г. Кравец, А. М. Рыжов). Разработаны методы снижения в 1,5...2,5 раза интенсивности воздействия сейсмозрывных волн на охраняемые объекты с помощью создания перед объектом искусственных преград. Создан и внедрен укладчик детонирующего шнура для возбуждения сейсмических волн линейно-протяженными источниками (А. А. Кузьменко, В. Д. Воробьев, Ю. А. Писарев, В. Г. Кравец).

За последние годы 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, З. Барановский, В. Г. Кравец, М. Кугель, О. А. Вовк), обоснован критерий энергетической оценки горных ударов по тротиловому эквиваленту и разработан графоаналитический метод оценки сейсмобезопасных расстояний над эпицентром горного удара.

В заключение необходимо отметить следующее.

1. Специализированные предприятия по выполнению взрывных работ в промышленности (Трансвзрывпром, Кривбассвзрывпром, Техновзрыв, Союзмелиовзрывпром, Гранитас и др.) в силу специфики технологий практически постоянно функционируют в инновационном поле, что предопределило необходимость постоянного и активного научного сопровождения как силами исследовательских коллективов, так и собственными специалистами. Это способствовало небывалому росту научных кадров, в том числе и непосредственно на предприятиях.

Только в Кривбассвзрывпроме в разное время защитили кандидатские диссертации Н. М. Бондаренко, С. В. Шевченко, В. В. Перегудов, С. С. Ященко, О. Я. Усов. Работая на производстве, защитил кандидатскую диссертацию, а позднее докторскую диссертацию В. П. Мартыненко. Под руководством киевских ученых защитили диссертации работники литовского объединения «Гранитас» И. С. Биржишкис и А. А. Дауетас, стали докторами наук производственники В. С. Прокопенко (Техновзрыв), В. И. Пугачев (Трансвзрывпром), А. Закиров (Каракумстрой). Для реализации научных рекомендаций киевлян в Саратове был создан трест «Союзмелиовзрымпром», возглавил его лауреат

Государственной премии Украины, канд. техн. наук В. В. Тесленко. Перечень подобных фактов может быть продолжен.

2. Большой вклад в развитие взрывного дела внесен выпускниками горного факультета КПИ. В их числе доктора наук, лауреаты Государственной премии В. Г. Кравец, К. Н. Ткачук, доктор технических наук, лауреат Государственной премии Литвы А. Г. Смирнов, доктор технических наук А. В. Михалюк, кандидаты технических наук, лауреаты Государственной премии Украины А. А. Кузьменко, Л. И. Демешук, канд. техн. наук, заслуженный изобретатель Украины Ю. А. Писарев, канд. техн. наук, доцент А. И. Крючков.

На факультете в настоящее время работает самый многочисленный в Украине коллектив известных механиков-взрывников: доктора наук В. Г. Кравец, И. А. Лучко, В. И. Списаренко, В. Д. Воробьев, Н. В. Кривцов, К. Н. Ткачук, А. М. Самедов, А. А. Пирский, заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Государственной премии Украины и Литвы А. А. Вовк, докт. техн. наук В. Д. Захматов, докт. техн. наук Н. С. Ремез, докт. техн. наук, лауреат Государственной премии Украины А. А. Желтоножко, зав. кафедрой, доцент А. И. Крючков.

3. Приведенная ниже даже неполная библиография основных монографических публикаций свидетельствует о больших достижениях украинских ученых, в том числе и работников горного факультета, в развитии многих проблем прикладной геодинамики взрыва. Объем сборника ограничивает возможность с достаточной полнотой отметить даже основные результаты и достижения в этой области, ввиду чего изложение материала выглядит фрагментарно.

Автор приносит искренние извинения тем украинским ученым, исследования которых не нашли отражения в данной статье.

Основные публикации украинских ученых по взрывным работам:

1. *Акутин Г. К.* Проведение выработок в мягких сжимаемых грунтах уплотнением их энергией взрыва. – К.: АН УССР, 1960. – 204 с.

2. *Недин В. В., Ибраев Ш. И.* Буровзрывные работы. – М.: Горгостехиздат, 1960. – 196 с.

3. *Кучерявый Ф. И., Друкованый М. Ф., Гаек Ю. В.* Короткозамедленное взрывание на карьерах. – М.: Горгостехиздат, 1962. – 227 с.

4. *Вовк А. А.* Справочник взрывника. – К.: Гостехиздат УССР, 1963. – 288 с.

5. *Таранов П. Я.* Буровзрывные работы. – М.: Недра, 1964. – 226 с.

6. *Кучерявый Ф. И., Новожилов М. Г., Друкованый М. Ф.* Совершенствование буровзрывных работ на карьерах. – М.: Недра, 1965. – 255 с.

7. *Новожилов М. Г.* и др. Взрывание в зажатой среде. – К.: Наук. думка, 1966.

8. *Вовк А. А., Черный Г. И., Смирнов А. Г.* Основы взрывной проходки подземных выработок. – К.: Наук. думка, 1966. – 236 с.

9. *Основы динамики грунтов и ее практические приложения / А. А. Вовк, Г. И. Черный, А. Г. Смирнов, В. Г. Кравец.* – К.: Наук. думка, 1968. – 203 с.

10. *Ефремов Э. И.* Взрывание с внутрискважинными замедлениями. – К.: Наук. думка, 1971. – 170 с.

11. Друкованый М. Ф., Дубнов Л. В. и др. Справочник по буровзрывным работам на карьерах. – М.: Недра, 1973. – 439 с.
12. Вовк А. А., Черный Г. И., Смирнов А. Г. Деформирование сжимаемых сред при динамических нагрузках. – К.: Наук. думка, 1971. – 175 с.
13. Кучерявый Ф. И., Кожушко Ю. М. Разрушение горных пород. – М.: Недра, 1972. – 240 с.
14. Моделирование разрушающего действия взрыва в горных породах / В.М. Комир, Л.М. Гейман, В.С. Кравцов, Н.И. Мячина. – М.: Недра, 1973. – 216 с.
15. Друкованый М. Ф., Комир В. М., Кузнецов В. М. Действие взрыва в горных породах. – М.: Наук. думка, 1973. – 184 с.
16. Друкованый М. Ф. Методы управления взрывом на карьерах. – М.: Недра, 1973. – 416 с.
17. Друкованый М. Ф., Ефремов Э. И. Справочник по буровзрывным работам на карьерах. – К.: Наук. думка, 1973. – 439 с.
18. Вовк А. А., Черный Г. И. Взрывные работы в горных породах. – К.: Техника, 1973. – 164 с.
19. Ткачук К. Н. Разрушение горных пород. – К.: Техника, 1974. – 211 с.
20. Вовк А. А., Черный Г. И., Кравец В. Г. Действие взрыва в грунтах. – К.: Наук. думка, 1974. – 207 с.
21. Вовк А. А., Смирнов А. Г., Кравец В. Г. Динамика водонасыщенных грунтов. – К.: Наук. думка. – 1975. – 202 с.
22. Кучерявый Ф. И., Олейников А. С., Волов А. Т. Многорядное короткозамедленное взрывание на карьерах строительных материалов. – К.: Будівельник, 1975. – 126 с.
23. Вовк А. А. Основы прикладной геодинамики взрыва. – К.: Наук. думка, 1966. – 236 с.
24. Кутузов Б. Н., Галаджий Ф. М., Давыдов С. А. и др. Безопасность взрывных работ в промышленности. – М.: Недра, 1977. – 344 с.
25. Литвинов И. М. Укрепление и уплотнение просадочных грунтов в жилищном и промышленном строительстве. – К.: Будівельник, 1977. – 286 с.
26. Ткачук К. Н., Федоренко П. И. Взрывные работы в горнорудной промышленности. – К.: Высшая школа, 1978. – 272 с.
27. Ефремов Э. И., Кравцов В. С., Мячина Н. И. и др. Основы теории и методы взрывного дробления горных пород. – К.: Наук. думка, 1979. – 223 с.
28. Мец Ю. С. Взрывные работы в сложных горно-геологических условиях. – К.: Техника, 1979. – 110 с.
29. Друкованый М. Ф., Ефремов Э. И., Ильин В. И. Буровзрывные работы на карьерах. – М.: Недра, 1978. – 390 с.
30. Лучко И. А., Плаксий В. А. Прикладные задачи динамики грунтов. – К.: Наук. думка, 1979. – 132 с.
31. Кравец В. Г. Динамика уплотнения грунтового массива. – К.: Наук. думка, 1979. – 134 с.
32. Даниленко И. И. Использование энергии взрыва в строительстве. – К.: Будівельник, 1981. – 167 с.

33. *Вовк А. А., Ткачук К. Н., Гоблер М. А.* Взрывные работы в сложных горно-геологических условиях. – К.: Наук. думка, 1980. – 290 с.
34. *Михалюк А. В.* Горные породы при неравномерных динамических нагрузках. – К.: Наук. думка, 1980. – 151 с.
35. *Ефремов Э. И.* Подготовка горной массы на карьерах. – М.: Недра, 1980. – 271 с.
36. *Геодинамика взрыва и ее приложения / А. А. Вовк, В. Г. Кравец, И. А. Лучко, А. В. Михалюк.* – К.: Наук. думка, 1981. – 296 с.
37. *Клевцов И. В., Федоренко П. И.* Схемы взрывания на карьерах и качество дробления горной массы. – К.: Техника, 1981. – 104 с.
38. *Новиков В. Д., Луговой П. З.* Подводные и прибрежные взрывы. – К.: Наук. думка, 1982. – 136 с.
39. *Глоба В. М.* Сооружение подземных газонефтехранилищ. – Львов: Львовское изд-во объединения «Высшая школа», 1982. – 148 с.
40. *Кравец В. Г., Грищенко Н. С., Демещук Л. И.* Формирование инженерных свойств грунтов взрывными методами. – К.: Наук. думка, 1983. – 188 с.
41. *Ефремов Э. И., Вовк А. А.* Справочник по взрывным работам. – К.: Наук. думка, 1983. – 328 с.
42. *Смирнов А. Г., Биржишкис И. С.* Использование взрыва при строительстве сооружений в водонасыщенных грунтах. – М.: Недра, 1984. – 216 с.
43. *Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок / А. А. Вовк, Б. В. Замышляев, Л. С. Евтерев, И. В. Белинский, А. В. Михалюк / К.: Наук. думка, 1984. – 288 с.*
44. *Воробьев В. Д., Перегудов В. В.* Взрывные работы в скальных породах. – К.: Наук. думка, 1984. – 240 с.
45. *Друкованый М. Ф., Ефремов Э. И., Бондаренко Н. М. и др.* Механизация взрывных работ. – М.: Недра, 1984. – 248 с.
46. *Вовк А. А., Лучко И. А.* Управление взрывным импульсом в породных массивах. – К.: Наук. думка, 1985. – 215 с.
47. *Черный Г. И.* Изменение физико-механических свойств грунтов при динамических нагрузках. – К.: Наук. думка, 1979. – 114 с.
48. *Михалюк А. В.* Торпедирование и импульсный гидроразрыв пластов. – К.: Наук. думка, 1986. – 208 с.
49. *Разрушение негабаритных кусков горных пород / В. Ф. Бызов, М. И. Великий, А. И. Чернокоп, С. З. Вайман.* – К.: Техника, 1986. – 135 с.
50. *Кравец В. Г., Лучко И. А., Михалюк А. В.* Использование взрыва в мелиоративном строительстве. – М.: Недра, 1987. – 208 с.
51. *Михалюк А. В., Храмов И. А., Лысюк Н. А.* Формирование призабойных зон скважин взрывом. – К.: Техника. – 1986. – 144 с.
52. *Лучко И. А., Плакий В. А., Ремез Н. С. и др.* Механический эффект взрыва в грунтах. – К.: Наук. думка, 1989. – 232 с.
53. *Сейсмическое действие взрыва в горных породах / А. А. Кузьменко, В. Д. Воробьев, И. И. Денисюк, А. А. Дауетас.* – М.: Недра, 1990. – 173 с.

54. *Повышение эффективности действия взрыва в твердой среде / В.М. Комир, В. М. Кузнецов, В.В. Воробьев, В. Н. Чибенко.* – М.: Недра, 1988. – 232 с.
55. *Ефремов Э. И., Петренко В. Д. Пастухов А. И.* Прогнозирование дробления горных массивов взрывом. – К.: Наук. думка, 1990. – 120 с.
56. *Ефремов Э. И., Комир В. М. и др.* Ресурсосберегающие технологии взрывного разрушения горных пород. – К.: Техника. – 1990. – 148 с.
57. *Михалюк А. В., Бойтенко Ю. И.* Импульсный разрыв пород. – К.: Наук. думка, 1991. – 204 с.
58. *Федоренко П. И.* Буровзрывные работы. – М.: Недра 1991. – 272 с.
59. *Ефремов Э. И., Бересневич П. В., Петренко В. Д. и др.* Проблемы экологии массовых взрывов на карьерах. – Днепропетровск: Січ, 1996. – 179 с.
60. *Крысин Р. С., Домничев В. Н.* Современные взрывчатые вещества местного приготовления. – Днепропетровск: Наука и образование, 1998. – 140 с.
61. *Прокопенко В. С.* Основы методов гранулометрии взорванной горной массы. – К.: Політехніка, 2005. – 172 с.
62. *Прокопенко В. С., Лотоус К. В.* Взрывание горных пород скважинными зарядами взрывчатых веществ в рукавах. – К.: Политехника, 2006. – 113 с.
63. *Бруякин А. В., Воробьев В. Д.* Буровзрывные работы в строительстве: Краткий справочник. – К.: Будівельник, 1993. – 117 с.
64. *Кравець В. Г., Воробйов В. Д., Кузьменко А. О.* Підривні роботи на кар'єрах / Навч. посібник. – К.: ІСДО, 1994. – 375 с.