

Однажды при мне Я.Б. произнес длинный монолог по телефону, уговаривая телевизионщиков организовать передачу, посвященную великому физику Георгию Антоновичу Гамову — Джорджу Гамову, «невозвращенцу» (это было до «перестройки»).

Во время другой встречи он познакомил меня с профессором Яковом Петровичем Терлецким, тем самым, который посещал Нильса Бора в 1945 г. с «особой» миссией. Я был свидетелем дискуссии между Я.Б. и Нобелевским лауреатом Ильей Романовичем Пригожиным в присутствии Германа Хакена, «отца синергетики». Дискуссия о «диссипативных структурах» происходила в кулуарах конференции в Пущино в 1983 г. (если не ошибаюсь). Яков Борисович нападал, Пригожин защищался, а Хакен молчал. Видно было, что Нобелевскому лауреату приходилось трудно.

Вспоминается и смешное. Однажды ко мне в номер московской гостиницы, где я остановился, пришла Ави́гея Николаевна Иванова, замечательный математик из Черногловки, из лаборатории Айзека Исааковича Вольперта. Мы с Ави́геей Николаевной долгое время сотрудничали в построении кинетической модели автоколебаний скорости в реакции каталитического окисления СО на платине. Было 6 часов вечера, внезапно раздался телефонный звонок: Звонил Я.Б. Он просил прийти к нему домой. Сейчас. Это было настолько неожиданно,

что я не нашел ничего лучшего, как сказать: «Яков Борисович, у меня женщина!» — «Понимаю», — сказал Яков Борисович и повесил трубку.

Прошли годы, более 40 лет. Я смотрю на листки старого письма. Дата: 2/1/1978. Среди новогодних праздников Яков Борисович нашел время для слов поддержки неизвестному и незнакомому научному сотруднику. Трогательно и незабываемо!

## Литература

1. Яблонский Г. С., Быков В. И., Горбань А. Н. Кинетические модели каталитических реакций. — Новосибирск: Наука, 1983. 254 с.
2. Yablonskii G. S., Bykov V. I., Gorban A. N., Elokhin V. I. Kinetic models of catalytic reactions / Ed. R. G. Compton. — Comprehensive chemical kinetics ser. of monographs. — Amsterdam: Elsevier, 1991. Vol. 32. 402 p.
3. Marin G., Yablonsky G. S. Kinetics of chemical reactions: Decoding complexity. — Weinheim: Wiley-VCH, 2011. 428 p.
4. Marin G. B., Yablonsky G. S., Constaes D. Kinetics of chemical reactions: Decoding complexity. — 2nd ed. — Wiley-VCH, 2019. 464 p.
5. Gorban A. N., Bykov V. I., Yablonskii G. S. Macroscopic clusters induced by diffusion in catalytic oxidation reactions // Chem. Eng. Sci., 1980. Vol. 35. No. 11. P. 2351–2352.

Г. С. Яблонский

Профессор Вашингтонского университета в Сент-Луисе, США

90-летию ИХФ РАН посвящается

## ДЕВЯНОСТО ЛЕТ ЛАБОРАТОРИИ ВЗРЫВНЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ ИХФ РАН

В 1931 г. Юлием Борисовичем Харитоном по предложению Н. Н. Семёнова была создана лаборатория, в задачи которой входили исследования горения, взрыва и детонации конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). Имелось в виду теоретическое и экспериментальное изучение связи между физико-химическими свойствами ВВ и физикой взрывных процессов. Название лаборатории со временем несколько изменялось. Первоначальное название — лаборатория детонации взрывчатых веществ. С 1948 г. она стала называться лабораторией взрывных процессов в конденсированных системах. Это название сохранилось до настоящего времени.

Все эти годы тематика исследований лаборатории в своей основе сохранялась неизменной. Первые молодые сотрудники стали появляться в начале 1932 г. Пришли А. Ф. Беляев, А. Я. Апин, Б. М. Степанов, З. Л. Рдултовская, В. Г. Клязер, В. С. Розинг. Несколько позже — О. И. Лейпунский, Н. М. Рейнов, С. Б. Ратнер и др. Образовался коллектив, увлеченный наукой о ВВ, которая стала развиваться широким фронтом. По существу, зарождалась всемирно известная научная школа взрыва Ю. Б. Харитона. Как пишет в своей книге Ф. И. Дубовицкий, «Ю. Б. Харитон, будучи замечательным экспериментатором, отличался исключительной работоспособностью, четкостью в постановке

эксперимента, всегда стремился к ясности при постановке задач и проверке идей. Он много работал сам, одновременно уделял много внимания научному росту своих сотрудников, предоставляя большую самостоятельность в выполнении поставленной задачи. Юлий Борисович как безупречный физик огромного диапазона умел ставить задачи, определять направления каждому сотруднику».

Заместителем Юлия Борисовича по лаборатории все эти годы был его ученик Александр Федорович Беляев. Первые работы Беляева и Харитона были посвящены возбуждению и передаче детонации между кристаллами иницирующего ВВ (азид свинца). Было установлено, что передача детонации носит статистический характер. Ее вероятность зависит от расстояния между зарядами и площади пассивного заряда, но не обращается в нуль даже в глубоком вакууме, т. е. когда отсутствует воздушная ударная волна. Авторы сделали правильный вывод, что передача детонации в их опытах осуществляется микроскопическими (субмикронными) осколками, разбрасываемыми при взрыве активного кристалла азид свинца. Согласно расчетам, скорость этих частиц в вакууме составляет 2–3 км/с, а линейный размер — порядка 1 мкм. Серия этих работ была опубликована в ведущих журналах страны (ДАН СССР, ЖЭТФ и др.) в 1934–1937 гг.

В эти же годы Альфред Янович Апин продолжал начатые еще в лаборатории С. З. Рогинского работы по кинетике газовых реакций и распаду метилнитрата, нитрогликоля, а также по кинетике реакций в твердой фазе (азид свинца) и реакций газового и жидкофазного разложения сверхчувствительного ВВ — хлористого азота.

Наряду с изучением процессов взрыва и детонации развивались направления химической физики при высоких давлениях — статических и динамических. Клязер В. Г., Рейнов Н. М. и Харитон Ю. Б. разработали методику исследования химических реакций при сверхвысоких давлениях и температурах, получаемых сильным адиабатическим сжатием (Н. М. Рейнов, Б. Я. Якутович), в результате чего удалось получить окись азота быстрым сжатием и расширением воздуха.

Лейпунский О. И. и Рейнов Н. М. изучали поведение вещества при сверхвысоких статических давлениях. Эти исследования, теоретические и экспериментальные, впоследствии явились научной основой при организации промышленного получения отечественных алмазов и в последствии обеспечили успешную защиту СССР при судебном разбирательстве с американской компанией.

В это же время Ю. Б. Харитон впервые обосновал хорошо известный в мире критерий устойчи-

вости детонации в конденсированных ВВ, согласно которому детонация может быть только тогда, когда время реакции во фронте детонационной волны меньше времени, за которое может произойти разброс исходного вещества. Лаборатория вскоре стала основой общепризнанной школы физики взрыва. Перед войной Харитон занялся исследованиями цепного деления урана, а во время войны он, используя опыт и знание физики взрыва, вел большую экспериментальную и теоретическую работу по обоснованию новых видов вооружений Красной Армии и изучению новых видов вооружений противника, а также по суррогатированным ВВ. В 1943 г. И. В. Курчатова, который возглавил в СССР Атомный проект, привлекает Харитона к разработке атомного оружия и зачисляет в состав Лаборатории № 2 АН СССР. Руководителем лаборатории взрывных процессов становится его заместитель А. Ф. Беляев.

В годы Великой Отечественной войны лаборатория вместе с Институтом химической физики переезжает из Ленинграда в Казань. К сожалению, сохранилось мало сведений о том, как располагались лаборатории в Казани, в каких условиях сотрудники жили и проводили эксперименты.

Так как в годы войны ощущался острый дефицит в полноценных ВВ, Беляев с сотрудниками лаборатории провели обстоятельные исследования детонационной способности аммиачно-селитренных, так называемых суррогатированных, ВВ и заложили научные основы для широкого использования таких ВВ в народном хозяйстве и военном деле. Значительный вклад был внесен сотрудниками лаборатории в существующие представления о возбуждении взрыва и детонации при механических и тепловых воздействиях на аммиачно-селитренные ВВ. Любимое детище Беляева — механизм стационарного горения ВВ, чему была посвящена его докторская диссертация, блестяще защищенная в 1946 г.

Работы по спецтематике лаборатории взрывных процессов, выполненные в 1940–1950-х гг., вошли в четыре тематических сборника «Физика взрыва» (под редакцией М. А. Садовского и А. Ф. Беляева), которые были изданы в 1952–1955 гг. В 1944 г. Институт химической физики переехал из Казани в Москву. Специально для лаборатории по заказу Н. Н. Семёнова был спроектирован и в 1948 г. построен под руководством Ю. Б. Харитона и А. Ф. Беляева новый корпус (ныне корпус 3). В нем находилась уникальная взрывная камера — первая в СССР, рассчитанная на взрыв 5 кг тротила. Само здание было спроектировано в мастерской академика архитектуры А. В. Щусева и входит в список объектов, представляющих культурную ценность.



Лаборатория взрывных процессов в конденсированных системах. 1946 г. Слева направо: стоят — В. К. Боболев, Ю. Н. Рябинин, А. Ф. Беляев, Б. М. Степанов, А. Я. Апин, К. Карпенко, С. Б. Ратнер; сидят — А. Е. Беляева, В. Д. Грамматчикова, А. Д. Ромоданова, М. Ф. Маркевич, К. Гусева и В. И. Белова

Лабораторию взрывных процессов в разные годы возглавляли: Ю. Б. Харитон (1931–1945), А. Ф. Беляев (1945–1967), О. И. Лейпунский (1967–1972), А. А. Борисов (1972–1978), А. А. Сулимов (1978–2008, ученик А. Ф. Беляева), Б. С. Ермолаев (2008–2020). В 2020 г. заведующим лаборатории назначен П. В. Комиссаров. Нужно сказать, что после скоростной смерти А. Ф. Беляева в 1967 г. и до 1978 г. лабораторию, согласно приказу Н. Н. Семёнова, в качестве исполняющих обязанности временно возглавляли проф. О. И. Лейпунский и проф. А. А. Борисов, которые очень много сделали для дальнейшего развития сложившихся научных направлений. В настоящее время в 3-м корпусе ИХФ РАН успешно работают две лаборатории: лаборатория взрывных процессов и лаборатория горения гетерогенных конденсированных систем, которую долгие годы возглавлял недавно ушедший из жизни проф. Ю. В. Фролов (ученик А. Ф. Беляева), а в настоящее время — д.т.н. А. Н. Пивкина.

После войны в ИХФ широким фронтом развернулись интенсивные работы по горению и взрыву как по теории, так и по прикладным проблемам. Научная деятельность института этого периода в значительной мере была связана с проблемами атомной (создание мощных ВВ) и ракетной техники (разработка высокоэнергетических смесевых твердых ракетных топлив (СТРТ)). В 1958 и 1959 гг. по поручению Правительства Институт химической физики возглавил научное руководство всем комплексом научных исследований по проблеме создания высокоэнергетических СТРТ. По этой проблеме ситуация была критической: США разра-

ботали, приняли на вооружение и установили ракеты с СТРТ на земле и подводных лодках. Наши специалисты убедили в свое время правительство, что все проблемы могут быть решены с использованием жидкостных ракетных двигателей, требующих, как известно, часы для подготовки к пуску (в отличие от ракетных двигателей твердого топлива, где аналогичное время составляло всего минуты). В СССР работы по СТРТ приходилось начинать с нуля (как и в случае с атомной бомбой).

Начиналась очередная погоня за США, в которой приняли участие отраслевые и академические институты, в том числе ИХФ и лаборатория взрывных процессов. В монографии Н. Н. Бахмана и А. Ф. Беляева [1], вышедшей в издательстве Наука в 1967 г., впервые были изложены результаты систематических исследований закономерностей стационарного горения модельных смесевых составов на основе перхлоратов аммония и калия и битумного связующего с добавками металлов и катализаторов при различных давлениях и температурах. Опыты проводились в бомбе постоянного давления в атмосфере азота. Были установлены зависимости скорости горения от давления, дисперсности и соотношения компонентов, начальной температуры. Дана четкая физическая картина процессов, лежащих в основе этих зависимостей. Результаты данного цикла исследований сыграли важную роль в развитии теории горения СТРТ. Одной из изюмин указанной монографии явилась установленная и объясненная Н. Н. Бахманом зависимость скорости горения смесей окислитель–горючее от размера частиц окислителя, которая имеет S-образную форму. Ослабление зависимости при



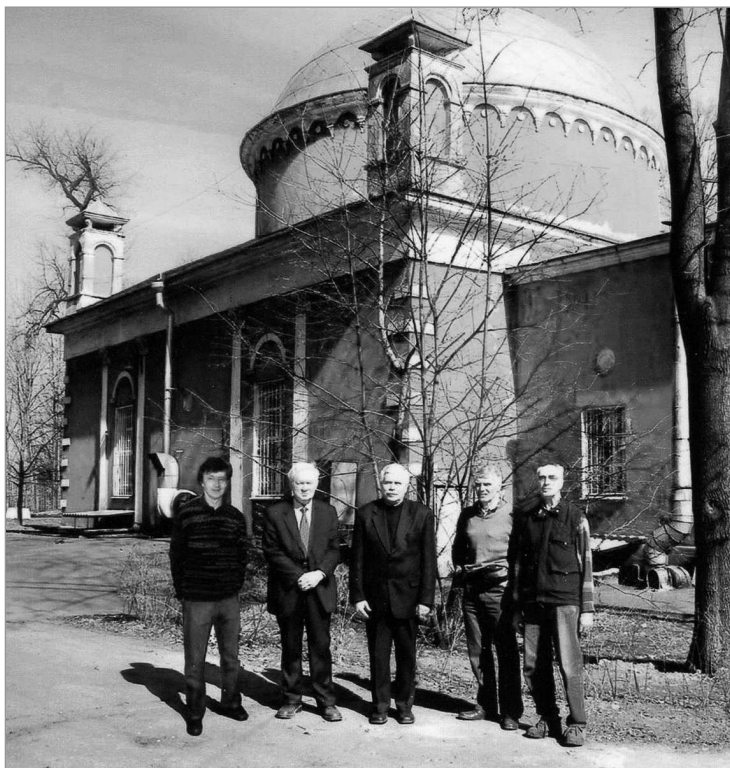
Молодые сотрудники лаборатории взрывных процессов ИХФ, 1963 г. Слева направо: стоят — Ю. Дмитриев, С. А. Цыганов, Ю. В. Фролов, Г. Лукашеня, В. Оленин, В. Егоров; сидят — А. А. Сулимов, Д. Соколов

больших размерах частиц объясняется предельной скоростью, с которой распространяется горение по границе контакта двух блоков горючего и окислителя. Предельная скорость горения при измельчении частиц окислителя отвечает ситуации, когда факелы газификации горючего и окислителя образуют однородную смесь до зоны пламени.

Однако научная интуиция А. Ф. Беляева, блестящего экспериментатора, заставила его искать слабое место этой концепции. Незадолго до смерти А. Ф. Беляев подготовил и провел эксперимент, в котором вибрированный перхлорат аммония пассивировался керосином и на несколько часов загружался в вибрмельницу. После сушки и удаления керосина была приготовлена смесь с горючим, которая горела с заметно более высокой скоростью, чем аналогичная смесь с исходным окислителем. Работа не была опубликована. Сейчас этот эффект, получивший название механоактивация, хорошо известен и используется при необходимости увеличить скорость горения ракетных топлив. Он объясняется ростом числа дефектов на частицах окислителя, что ускоряет реакции в конденсированной фазе и, соответственно, скорость горения смеси.

Параллельно в другой группе лаборатории, возглавляемой А. И. Коротковым, исследовалось поведение алюминия при горении ракетных топлив. Было показано, что в топливе алюминий воспламеняется и горит совершенно иначе по сравнению с классическими опытами по горению одиночных частиц алюминия в потоке газа. Горение частиц начинается практически на поверхности топлива, при температурах, существенно меньших температуры плавления оксида алюминия. Для практики важное значение имели исследования открытого авторами [2] эффекта агломерации конденсированных продуктов горения алюминия, из-за которой значительно снижался импульс тяги ракетных топлив, содержащих алюминий. До сих пор широко используется формула для времени горения частиц алюминия в топливе, полученная Ю. В. Фроловым и включающая зависимость от концентрации окисляющих газов в степени 0,9.

В 1960-х гг. в лаборатории взрывных процессов были проведены обстоятельные исследования конвективного горения в трещинах СТРТ (А. А. Сулимов и М. К. Сукоян). Актуальность этих работ была обусловлена необходимостью разобраться



Сотрудники лаборатории взрывных процессов в конденсированных средах (1316) на фоне взрывной камеры 3-го корпуса, 2010 г. Слева направо: А. В. Романьков, А. А. Сулимов, В. Е. Храповский, Б. С. Ермолаев, М. К. Сукоян

в причинах аварийных взрывов наших ракетных двигателей с зарядами из СТРТ, имевших место на ранней стендовой стадии их отработки. В то время СТРТ состояло из полимерного инертного связующего, перхлората аммония, алюминия и каталитических добавок. Исследовались искусственные трещины, образованные двумя пластинами из реального полиуретанового топлива ПАЛ 18/7, которые заключались в прочные оболочки. Сборка помещалась в модельный двигатель. В опытах изменялась глубина трещины (в диапазоне 50–100 мм), ее раскрытие (расстояние между пластинами пороха) и начальное давление. Была разработана установка, позволяющая проводить одновременно скоростную киносъемку процесса распространения пламени вдоль трещины и регистрацию пьезокварцевым датчиком диаграммы давление—время непосредственно в горящей трещине и ее гашение резким сбросом давления. Определялись критические условия, механизм и последствия проникновения горения в трещину. Были получены неожиданные результаты:

- (1) горение способно проникать в тончайшие трещины СТРТ с раскрытием порядка 0,01 мм, с высокими скоростями (порядка десятков и сотен метров в секунду), при этом в трещи-

не реализуется высокое избыточное давление, достигающее сотен атмосфер;

- (2) избыточное давление вызывает при определенных условиях рост трещины, разрушение стенок трещины и создает высокоскоростной поток истекающих продуктов, приводящий к эрозионному разгоранию стенок трещины.

Все эти факторы приводят к интенсивному росту давления в двигателе. Были получены количественные зависимости, связывающие скорость конвективного воспламенения и избыточное давление с начальным раскрытием и глубиной трещины. В специальной серии опытов изучался рост трещины, находящейся в массиве топлива. Учитывалось расширение трещины вследствие деформации окружающего ее топлива. Выявлена важная роль физико-механических свойств и коэффициента сцепления топлива. Эти выполненные своевременно исследования позволили установить основную причину аварийных разрушений (взрывов) ракетных двигателей на твердом топливе и способствовали целенаправленному поиску путей подавления образования и развития трещин и обеспечению нормальной безаварийной работы двигателей.

Для исследования взрывных процессов необходимо надежно измерять диаграмму давления при

горении и взрыве в широком диапазоне давлений от 0,1 до 1000 МПа. Датчик давления с частотой 100 кГц, линейной характеристикой и максимальным давлением до 1300 МПа был разработан в начале 1960-х гг. А. И. Коротковым, который имел опыт по созданию датчиков давления для регистрации воздушных ударных волн, и А. А. Сулимовым и в течение короткого времени изготовлен в нужном количестве в мастерских ИХФ АН СССР. Эти датчики выдержали испытание временем, успешно работали и появились гораздо раньше зарубежных аналогов, уступая им только в геометрических размерах.

В 1973 г. в издательстве «Наука» вышла монография коллектива авторов во главе с А. Ф. Беляевым [3]. В ней впервые в мире были изложены в систематизированном виде физические воззрения на переход горения конденсированных веществ во взрыв и детонацию. Авторы продуктивно использовали научный подход, который опирается на выделение и отдельное изучение основных промежуточных стадий перехода горения в детонацию (конвективного горения и низкоскоростного режима детонации) и определение критических условий, при которых происходит смена стадий. Этот подход позволил получить полную картину развития взрыва от послынного кондуктивного горения до детонации и провести детальное изучение переходных стадий в наиболее простых (стабилизированных) условиях. Монография переведена на английский язык и получила широкую известность как в России, так и за рубежом.

Основу книги составили результаты экспериментальных и теоретических работ, выполненных в лаборатории взрывных процессов с твердыми (пористыми, трещиноватыми) материалами. Были детально изучены типичные представители основных классов энергетических материалов: бризантные твердые ВВ, пороха, взрывчатые смеси и СТРТ. В разделе, посвященном переходу горения во взрыв в твердых пористых веществах, рассмотрено влияние, которое оказывают на характеристики промежуточных стадий и перехода горения в детонацию в целом как свойств энергетического материала (размеры пор, частиц и дефектов материала, начальная пористость и газопроницаемость, физико-механические свойства, реакционная способность), так и внешних условий (прочность и другие свойства оболочки, условия газоотвода, мощность инициирующего воздействия, геометрические размеры заряда). Показаны возможности стабилизации этих процессов в диапазоне скоростей распространения от 1 до 3000 м/с. Приведены обширные данные по влиянию различных факторов на длину преддетонационного участка.

Результаты исследований по переходу горения в детонацию, которые были выполнены в лаборатории взрывных процессов после выхода монографии (за период 1973–2016 гг.), обобщены в книге Б. С. Ермолаева и А. А. Сулимова [4], которая написана с использованием 80 оригинальных статей авторов, опубликованных в известных российских и зарубежных научных журналах. Книга была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований и опубликована в 2017 г. После дополнительной редакторской правки книга в 2019 г. издана на английском языке в США издательством DEStech Publications [5].

Исследования по взрывным процессам включают, как правило, совместные фотографические и пьезометрические измерения. Для скоростной фотографии распространения фронта реакции применялись ждущие фоторегистраторы ФР-11, ЖФР-3 и ждущая лупа времени ЖЛВ-2. Опыты проводились в специально сконструированных прозрачных камерах высокого давления. Для регистрации распространения фронтов реакции использовались также ионизационные, оптико-волоконные и фотодиодные датчики. Для измерений давления, которое проводится в нескольких точках по длине заряда, помимо высокочастотных пьезокварцевых датчиков собственной конструкции использовались датчики типа Kistler (AVL, T-6000) с регистрацией на диалоговой и цифровой аппаратуре.

Измерительный комплекс позволяет регистрировать процессы, протекающие с временами от десятых долей секунды до долей микросекунды при давлениях от нескольких атмосфер до 0,8–1 ГПа. Путем обработки результатов измерений определяли скорость распространения пламени, скорость движения горящих частиц вблизи фронта пламени, пространственный профиль давления для различных моментов времени, длину участка перехода горения в нормальную и низкоскоростную детонацию, полноту сгорания зарядов в режимах конвективного горения и низкоскоростной детонации (НСД). Для проведения исследований по внутренней баллистике применялись модельные ствольные установки и ракетные импульсные двигатели, снаряжаемые зарядами нового типа — пористыми блочными зарядами, сгорающими в режиме конвективного горения или НСД. Для измерений тяги двигателя применялся баллистический маятник. Структура волны НСД определялась по профилям массовой скорости, измеряемой по электромагнитной методике.

Эксперименты проводились совместно с теоретическими исследованиями, которые выполнялись под руководством Б. С. Ермолаева. В них в разные

годы участвовали: А. А. Борисов, Б. В. Новожилов, Б. А. Хасаинов, В. С. Посвянский, А. А. Беляев, К. А. Слепцов и др. Были разработаны компьютерные программы, позволяющие в квазиодномерном приближении анализировать конвективное горение, НСД и переход горения в детонацию в порохах, твердых взрывчатых веществах и смесевых композициях на основе окислителя (перхлората или нитрата аммония) и алюминия с добавками (ВВ, органические горючие) и проводить расчеты по внутренней баллистике, в том числе с зарядами нового типа, разработанного в лаборатории взрывных процессов — блочными высокоплотными зарядами конвективного горения (ВЗКГ).

Исследования последних десятилетий проводились по четырем направлениям:

- (1) переход горения в детонацию и взрывобезопасность;
- (2) конвективное горение;
- (3) НСД;
- (4) взрывные волны.

Приведем основные результаты.

## 1 Переход горения в детонацию и взрывобезопасность

Экспериментальная часть исследований включала опыты в классической постановке (цилиндрическая оболочка с иницированием горения от закрытого торца заряда). Эксперимент дополнен математическим моделированием, которое проводилось в квазиодномерном приближении в рамках механики двухфазных реагирующих сред. Рассмотрены все стадии процесса развития взрыва, начиная с возникновения конвективного горения и заканчивая формированием стационарной детонационной волны; изучены пространственная структура, свойства и эволюция во времени волн конвективного горения в зарядах различной пористости; определены критические условия и механизмы, вызывающие последовательную смену стадий процесса (от послыонного горения к конвективному горению и НСД). Подробно изучен переход горения в детонацию в бризантных ВВ (тэне и гексогене), зерненных пироксилиновых порохах и смесях окислитель (перхлорат и нитрат аммония) — полимерное горючее. Рассмотрено влияние размера зерна, начальной пористости и наличия ингибитора, снижающего скорость послыонного горения материала. Показано, что по внешним признакам переходный процесс может быть отнесен к одному из двух типов:

- (1) процесс, когда детонационная волна возникает на фронте волны конвективного горения (или несколько впереди него);
- (2) переход в детонацию с формированием вторичной волны давления позади фронта конвективного горения.

Подробно изучен второй тип перехода, выделены условия, в которых происходит формирование вторичной волны, измерены ее характеристики и рассмотрены механизмы, определяющие зарождение и развитие вторичной волны.

В одинаковых условиях двойные смеси нитрата и перхлората аммония с горючей добавкой существенно различаются по взрывоопасности. Развитие взрыва в смесях нитрата аммония с древесным углем и алюминием ограничивается двумя стадиями: конвективным горением и НСД. По результатам опытов в манометрической бомбе построены ряды активности конвективного горения в зависимости от соотношения компонентов, их дисперсности, плотности образца и давления, создаваемого воспламенителем. Эксперименты с одновременной фото- и пьезорегистрацией показали, что на смесях с нитратом аммония взрывной рост давления, вызванный интенсивным горением алюминия, происходит на стадии конвективного горения позади фронта, обеспечивая последующий переход к НСД. Высокая взрывоопасность смесей перхлората аммония с алюминием по сравнению со смесями на основе нитрата аммония вызвана рядом факторов, действующих одновременно: более низким давлением начала конвективного горения, более высокими величинами скорости послыонного горения и показателя степени по давлению и более высокой концентрацией окисляющих реагентов, обеспечивающих более высокую скорость диффузионного горения частиц алюминия. Вместе с тем, последствия возгорания смесей на основе перхлората аммония могут кардинально различаться в зависимости от марки алюминия и условий опыта. К примеру, смеси мелкоизмельченного перхлората аммония с субмикронным алюминием демонстрируют чрезвычайно высокую склонность к взрыву. На этих смесях впервые был получен переход горения, инициируемого спиралью накаливания, в нормальную детонацию в заряде насыпной плотности, помещенном в тонкостенную кварцевую трубку. Однако если субмикронный алюминий заменить на более крупный алюминий АСД-4 и спрессовать смесь до пористости 17%, то этот заряд в бомбе с дополнительным ресивером будет равномерно гореть со скоростью около 8 м/с в конвективном режиме.

К сожалению, лабораторные опыты по переходу горения в детонацию, проводимые в прочных

оболочках с инициированием у закрытого торца, очень далеки от условий, в которых обычно протекают аварийные взрывы дисперсных ВВ. Их особенность состоит в том, что развитие горения в очаге уже на начальной фазе взрывного процесса испытывает сильное воздействие разгрузки, вызванной разлетом слоев ВВ, окружающих очаг. Эту особенность воспроизводит лабораторно-полигонный метод, разработанный нами для оценки взрывоопасности дисперсных ВВ и получивший название «метод критической высоты слоя». Проведено систематическое изучение критических условий перехода горения во взрыв для ряда типичных взрывчатых материалов насыпной плотности в зарядах диаметром от 16 мм до 1 м (В. А. Фотеенков). Параметры, определяемые в критических условиях (критическая высота слоя и критическое давление в очаге), дают реалистическую оценку склонности ВВ к переходу горения во взрыв, позволяя разграничить условия взрывного и невзрывного горения при аварийных инцидентах с ВВ в отсутствие прочной оболочки. Рассмотрена теоретическая модель процесса, в которой учтены переход от послойного горения в очаге к конвективному горению и эффекты, связанные с разгрузкой очага. Оформлены два патента на способ определения склонности к взрыву различных ВВ.

Сотрудники лаборатории принимали активное участие в экспертизе и изучении причин аварийных взрывов с различными материалами. Остановимся на трех из них.

1. Катастрофический аварийный взрыв, происшедший 4 июня 1988 г. при транспортировке по железной дороге трех вагонов с 120 т взрывчатых материалов около железнодорожной станции Арзамас. По официальным данным погибли 91 человек, пострадали 1500 человек. Основной причиной взрыва сочли нарушение правил погрузки и перевозки ВВ (в том числе порошкообразного гексогена, который перевозился в мешках, с возможным образованием россыпи). В лабораторных исследованиях, которые проводились нами на моделях зазоров, имеющихся в полу вагонов, была показана возможность детонационноподобных взрывных явлений в слоях россыпи ВВ, которые могли просыпаться при погрузке и попасть в эти зазоры в ходе транспортировки.
2. Страшный взрыв 300 т аммиачной селитры на заводе AZF в г. Тулуза, Франция, происшедший 21 сентября 2001 г. Тротиловый эквивалент взрыва составил 40 т. Последствия взрыва оказались катастрофическими: погибли 30 и ранено около 3000 человек. Согласно официаль-

ной версии, вина за катастрофу лежит на руководстве AZF, не обеспечившем безопасное хранение активного хлорсодержащего продукта, дихлориоцианурата натрия, химически несовместимого с аммиачной селитрой. Нами проведено детальное исследование химического взаимодействия в этой паре, которое развивается при увлажнении. Рассмотрены механизмы, приводящие к самопроизвольному разогреву и взрывам, оценены возможности формирования детонационных волн.

3. Взрыв в цехе по производству порэмита, комбинат Ураласбест, 1 ноября 1990 г. Взрыв произошел на конечных операциях (эмульгирование или перекачка готового продукта). Полностью разрушено основное производственное здание, несколько соседних зданий повреждены, погибли 14 человек, 70 человек получили ранения. На момент взрыва в здании было 13,6 т эмульсии порэмита, тротиловый эквивалент взрыва не ниже 4 т. По данным экспертизы взрывной процесс начался на участке эмульгирования (в аппарате эмульгирования или насосах) и затем передался в накопительную емкость. Проведена оценка опасностей и риска взрыва при производстве эмульсии порэмита. Взрывы на производстве порэмита высвечивают проблему оценки взрывобезопасности энергетических материалов очень низкой чувствительности и горючести, которые по существующим тестам не могут быть классифицированы как взрывчатое или взрывоопасное вещество. Однако в определенных условиях они способны к экзотермическому превращению, что при отсутствии мер защиты приводит к серьезным последствиям при авариях.

## 2 Конвективное горение

Конвективное горение относится к волновым процессам дефлаграционного типа. Энергия из зоны горения к свежему веществу передается по газовой фазе в ходе фильтрационного течения горячих газов. Возможны два механизма. По механизму опережающей фильтрации энергию могут переносить фильтрующие газы и тогда скорость фильтрации должна быть выше скорости конвективного горения. Второй механизм связан с разогревом фильтрующего газа в результате его сжатия и трения о стенки пор. В этом случае скорость фильтрации будет ниже скорости конвективного горения. Показано, что когда инициируется конвективное горение и давление невелико, то реализуется механизм опережающей фильтрации. Однако по ме-



ре развития конвективного горения и увеличения давления и скорости фильтрации доминирующая роль переходит ко второму механизму.

Несмотря на ярко выраженную склонность конвективного горения к самоускорению, выделены условия, при которых процесс может распространяться в квазистационарном режиме без заметного ускорения при контролируемых скоростях и давлениях. Проведен цикл экспериментальных и теоретических исследований, которые позволили сформулировать представления о механизмах стабилизации конвективного горения, выделить контролируемые параметры и получить массив данных по характеристикам стабилизированного конвективного горения, покрывающим диапазон скоростей 1–200 м/с при давлениях от нескольких десятков до нескольких сотен мегапаскалей.

Исследования стабилизированного горения зарядов низкой пористости (вплоть до 5%–10%), получаемых прессованием из крупно-зернистых порохов (с размером зерна 0,5–3 мм), покрытых тонкой полимерной пленкой, привели к развитию нового направления во внутренней баллистике благодаря открывшимся возможностям технического применения. Было показано, что блочные заряды этого типа, получившие название ВЗКГ, обладают высокой прогрессивностью и устойчивостью горения. По результатам фундаментальных исследований свойств, механизмов и закономерностей горения блочных зарядов и масштабных баллистических испытаний, проведенных совместно с ЦНИИТОЧМАШ, г. Климовск (В. П. Королев, А. А. Сулимов) и ИПХФ РАН, г. Черноголовка (Ю. М. Михайлов), был предложен и запатентован новый класс высокоплотных прогрессивно-горящих метательных зарядов блочной конструкции к унитарным патронам для стрелкового и малокалиберного оружия. Метательный заряд, размещенный в камере, дает существенное (до 15%) и стабильное увеличение начальной скорости снаряда (пули) без увеличения максимального давления выстрела. Для патронов стрелкового оружия, имеющих бутылочную форму, оптимальны запрессованные в гильзу заряды переменной плотности.

Помимо повышения дульной скорости применение блочных зарядов позволяет решать задачу сокращения габаритов боеприпаса. Показана возможность создания нового винтовочного патрона, имеющего габариты, уменьшенные на 40%, при плотности заряжания  $1,2 \text{ г/см}^3$ . Высокоплотные блочные заряды были опробованы также в гибридной схеме выстрела с присоединенным зарядом. Здесь получен уникальный прирост дульной скорости относительно заряда традиционной схемы выстрела, составивший 20%–25%.

Экспериментально изучено конвективное горение малопористых блочных зарядов в импульсных сопловых устройствах с коротким временем работы. Опыты проводили на зарядах с относительной плотностью 0,9–0,95, изготовленных прессованием из зернистого пироксилинового пороха или смесями пороха на основе перхлората аммония. В зависимости от используемого пороха получены диаграммы давления пикообразной формы длительностью 1–5 мс или диаграммы с участком плато длительностью 10–20 мс. Двигатели работали устойчиво с высоким удельным импульсом.

### 3 Низкоскоростная детонация

Низкоскоростная детонация пористых энергетических материалов есть разновидность неидеальной детонации, свойства которой определяются медленным (по сравнению с нормальной детонацией) химическим превращением и боковыми потерями энергии. Существование НСД как устойчивой газодинамической структуры доказывается не столько проведенными опытами, в которых НСД, распространяющаяся с постоянной скоростью на уровне 1–2 км/с, наблюдалась на зарядах разных материалов длиной до 1–2 м, сколько тестами по инициированию НСД, в которых та же самая скорость процесса устанавливалась при использовании источников инициирования разной природы и мощности. Математическое моделирование, используемое для анализа экспериментальных данных, позволило в подробностях рассмотреть закономерности, механизм и структуру фронта и зоны реакции волны НСД, а также получить оценки скорости химического превращения в волне в пористых материалах разной природы.

Низкоскоростная детонация пористых энергетических материалов, благодаря способности создавать за фронтом облако горящих частиц и диапазону скоростей волны и давлений, представляет интерес для ряда технических приложений. К ним можно отнести: малогабаритные импульсные реактивные двигатели твердого топлива с коротким временем работы, импульсные устройства тяги с отстрелом массы, генераторы взвеси горящих частиц (обычно алюминия) для создания мощных взрывных волн с догоранием в воздухе/воде. В наших опытах использовалось лабораторное импульсное устройство тяги с отстрелом массы, оснащенное приборами для измерения импульса тяги, давления и разгона метаемого тела, которое является удобным инструментом для изучения энергетических свойств НСД и полноты химического превращения. Характеристики устройства изучались

на прессованных зарядах из смеси тротил/гексен 30/70 и смеси перхлората аммония с горючими добавками. Получены воспроизводимые значения импульса тяги и скорости метания при максимальном давлении не выше 1,1 ГПа и полном времени процесса менее 0,3 мс. Устройство, изготовленное из обычной стали, после опытов не имело следов деформации и использовалось многократно. Комплексный анализ с использованием данных, полученных с помощью сборки из 6 контактных датчиков, датчика давления и баллистического маятника, позволил дать оценку энергетических характеристик устройства. Выделены условия, при которых полнота химического превращения лежит в диапазоне 90%–100%. Оценка коэффициента полезного действия, равного отношению количества энергии, переданной метаемому телу, к химической энергии топлива, дала 40%–45%.

## 4 Взрывные волны

Одним из актуальных направлений работы лаборатории взрывных процессов является исследование внешнего эффекта взрывов, главным образом неидеальных воздушных и подводных взрывов. Рассматриваются задачи зарождения и распространения ударных и взрывных волн в различных средах. В последнее десятилетие активно исследовались взрывы зарядов, содержащих избыточное углеводородное и металлическое горючее (преимущественно порошок алюминия). Определены газодинамические и кинетические характеристики образования металловоздушных смесей при взрыве алюминизированных зарядов. Предложены различные схемы взрывов высокометаллизированных составов, при которых существенно повышается тротильный эквивалент, а также методы борьбы с ударными и взрывными волнами в ближней от заряда зоне, существенно снижающие их разрушительное воздействие (П. В. Комиссаров, А. А. Борисов).

Лаборатория активно занимается исследованиями неидеальных подводных взрывов, в том числе составов, использующих окружающую воду в качестве окислителя. Предложен не имеющий аналогов способ проведения направленных подводных неидеальных взрывов, при которых основная энергия заряда взрывчатой смеси выделяется в направлении пузырькового канала, соединяющего заряд и цель. Предложены сверхметаллизированные смеси составы для таких зарядов и исследованы их детонационные характеристики.

Для исследования неидеальных взрывов в лаборатории разрабатываются специализированные измерительные комплексы и датчики. В кооперации с ИР ЛИИ, г. Жуковский, разработано семейство датчиков давления типа ДДЗ, на сегодняшний день единственных датчиков, способных проводить измерения параметров взрывных и ударных волн неидеальных взрывов в воздухе. Универсальные измерительные комплексы для исследований в области физики взрыва ДОТ и ДОТ-М приняты на вооружение в РФ. Получено несколько патентов на датчики и методики измерения характеристик промышленных ВВ.

Кроме монографий, цитированных выше, сотрудниками лаборатории взрывных процессов также написаны и изданы монографии [6–8]. За 90 лет в лаборатории сменилось несколько поколений исследователей, даже простое перечисление которых представляется затруднительным. Поэтому отметим сотрудников, кроме уже упомянутых в тексте, которые активно работали по тематике лаборатории в последние годы. Это М. К. Сукоян, В. Е. Храповский, А. В. Романьков, В. Ф. Мартынюк, А. А. Беляев, В. Г. Худавердиев, В. А. Фотеенков, В. А. Окунев, Г. Н. Соколов, М. А. Силакова, С. С. Басакина. Сейчас лаборатория активно развивает представленные направления под руководством к.ф.-м.н. П. В. Комиссарова (ученика проф. А. А. Борисова).

## Литература

1. *Бахман Н. Н., Беляев А. Ф.* Горение гетерогенных конденсированных систем. — М.: Наука, 1967. 226 с.
2. *Похил П. Ф., Беляев А. Ф., Фролов Ю. В., Логачев В. С., Коротков А. И.* Горение порошкообразных металлов в активных средах. — М.: Наука, 1972. 294 с.
3. *Беляев А. Ф., Боболев В. К., Коротков А. И., Сулимов А. А., Чуйко С. В.* Переход горения конденсированных систем во взрыв. — М.: Наука, 1973. 292 с.
4. *Ермолаев Б. С., Сулимов А. А.* Конвективное горение и низкоскоростная детонация пористых энергетических материалов. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2017. 400 с.
5. *Ermolaev, B., Sulimov A.* Convective burning and low-velocity detonation in porous media. — DEStech Publications, 2019. 335 p.
6. *Андреев К. К., Беляев А. Ф.* Теория взрывчатых веществ. — М.: Оборонгиз, 1960. 595 с.
7. *Беляев А. Ф.* Горение, детонация и работа взрыва / Под ред. Н. Н. Семенова, М. А. Садовского. — М.: Наука, 1968. 255 с.
8. *Адушкин В. В., Сулимов А. А.* Вклад ученых Химфизики в советский Атомный проект. — М.: ТОРУС ПРЕСС, 2019. 479 с.

*А. А. Сулимов, Б. С. Ермолаев, П. В. Комиссаров*