

Уважаемые читатели!

В этом номере журнала в рубрике «История. Памятные даты. События» мы помещаем статью академика Н. Н. Семёнова «Новая жизнь древнего открытия» о замечательном советском ученом А. Ф. Беляеве, опубликованную 27 января 1967 г. в газете «Правда» по случаю скоростной кончины ученого. Наше внимание на эту статью любезно обратил член редколлегии журнала А. А. Сулимов.

Ваши отзывы можно оставить на интернет-форуме по адресу: www.combex.ru.

НОВАЯ ЖИЗНЬ ДРЕВНЕГО ОТКРЫТИЯ (РУБРИКА «НАУКА РАЗДВИГАЕТ ГОРИЗОНТЫ»)

Добыча огня — это величайшее достижение человека послужило основой зарождения и развития культуры и промышленности. Его огромное значение сохранилось до наших дней. Ведь и сейчас 90 процентов мировой энергетики основаны на сжигании топлива. Подавляющая часть транспорта — от паровых машин до космических ракет — работает на двигателях, в которых используется процесс горения. Вся металлургия и большая часть химии требуют высоких температур, которые также достигаются в результате сжигания топлива.

Однако, несмотря на то, что человек уже многие тысячелетия знаком с огнем, несмотря на прогресс науки, в частности термодинамики, механизм горения и взрывов, как ни странно, оставался до начала нашего века почти не выясненным. Даже сейчас мы знаем о нем значительно меньше, чем о механизме электрических явлений или механизме выделения атомной энергии. Это во многом объясняется тем, что учение о скоростях и механизме химических реакций — химическая кинетика — вышло из младенческого возраста всего пятьдесят лет назад. А ведь горение и взрыв — тоже химическая реакция.

Советская научная школа в теории горения и взрыва пользуется мировым признанием. Среди выдающихся ученых, создавших эту школу, видное место принадлежит заведовавшему лабораторией Института химической физики Академии наук СССР профессору Александру Федоровичу Беляеву, скоростно скончавшемуся недавно.

Существует два типа взрывов — тепловые и разветвленно-цепные. Здесь речь будет идти о наиболее распространенном тепловом взрыве и горении. Главная идея советских исследователей заключается в том, что в основе этих явлений лежит скорость химических реакций. Они осложняются, однако,

процессами выделения тепла, теплопередачи, движения газов и другими последствиями химических реакций. В свою очередь эти явления оказывают воздействие на скорость химических реакций. Последовательный учет такой «обратной связи» — одна из характерных особенностей теории горения и взрывов, развитой представителями советской научной школы.

Приведем простейший пример. В горячем газе или взрывчатом веществе идет химическая реакция, скорость которой, как известно, быстро растет с повышением температуры. В ходе этой реакции выделяется тепло, и вещество разогревается. Однако, если реакция идет достаточно медленно и, значит, скорость выделения тепла невелика, стенки сосуда или поверхность взрывчатого вещества успевают его отводить. В результате вещество разогревается очень слабо, и во времени этот процесс не изменяется. Но когда начальная температура вещества достаточно высока, выделяющееся тепло не успевает отводиться во внешнюю среду, и вещество быстро разогревается. Соответственно увеличивается скорость реакции, и это ускоряет выделение тепла. В конечном счете происходит самовоспламенение и взрыв.

Таким образом, при определенном диаметре сосуда с горючим газом или диаметре заряда взрывчатого вещества имеется критическая начальная температура («температура воспламенения»). Ниже ее температура вещества во времени не меняется, а выше — наступает прогрессивный разогрев, приводящий к взрыву.

Изучение кинетики медленных реакций, знание характера теплопередачи дает возможности предвычислять температуру самовоспламенения и ее зависимость от размеров заряда, концентрации го-

НАУКА РАЗДВИГАЕТ ГОРИЗОНТЫ

НОВАЯ ЖИЗНЬ
ДРЕВНЕГО ОТКРЫТИЯ

Доюга огня — это величайшее достижение человека послужило основой зарождения и развития культуры и промышленности. Его огромное значение сохранилось до наших дней. Ведь и сейчас 90 процентов мировой энергии основаны на сжигании топлива. Подавляющая часть транспорта — от паровых машин до космических ракет — работает на двигателях, в которых используется процесс горения. Вся металлургия и большая часть химии требуют высоких температур, которые также достигаются в результате сжигания топлива. Однако, несмотря на то, что человек уже многие тысячелетия знаком с огнем, несмотря на прогресс науки, в частности термодинамики, механизма горения и взрывов, как ни странно, оставался до начала нашего века почти не выясненным. Даже сейчас мы знаем о нем значительно меньше, чем о механизме электрических явлений или механизме выделения атомной энергии. Это во многом объясняется тем, что учение о скоростях и механизмах химических реакций — химическая кинетика — вышло из младенческого возраста всего лишь десятилет лет назад. А ведь горение и взрыв — тоже химическая реакция.

Советская научная школа в теории горения и взрыва пользуется мировым признанием. Среди выдающихся ученых, создавших эту школу, видное место принадлежит заведовавшему лабораторией Института химической физики Академии наук СССР профессору Александру Федоровичу Беляеву, скоропостижно скончавшемуся недавно.

Существует два типа взрывов — тепловые и разветвленно-цепные. Здесь речь будет идти о наиболее распространенном тепловом взрыве и горении. Главная идея советских исследователей заключается в том, что в основе этих явлений лежит скорость химических реакций. Они осложняются, однако, процессами выделения тепла, теплопроводности, движения газов и других последствий химических реакций. В свою очередь эти явления оказывают воздействие на скорость химических реакций. Последовательный учет такой «обратной связи» — одна из характерных особенностей теории горения и взрывов, развитой представителями советской научной школы.

Приведем простейший пример. В горючем газе или взрывчатом веществе идет химическая реакция, скорость которой, как из-

вестно, быстро растет с повышением температуры. В ходе этой реакции выделяется тепло, и вещество разогревается. Однако, если реакция идет достаточно медленно и, значит, скорость выделения тепла невелика, стенка сосуда или поверхность взрывчатого вещества успевают его отводить. В результате вещество разогревается очень слабо, и во времени этот процесс не изменяется. Но когда начальная температура вещества достаточно высока, выделяющееся тепло не успевает отводиться во внешнюю среду, и вещество быстро разогревается. Соответственно увеличивается скорость реакции, а это ускоряет выделение тепла. В конечном счете происходит самовоспламенение и взрыв.

Таким образом, при определенном диаметре сосуда с горючим газом или диаметре заряда взрывчатого вещества имеется критическая начальная температура («температура воспламенения»). Ниже ее температура вещества во времени не меняется, а выше — наступает прогрессивный разогрев, приводящий к взрыву.

Изучение кинетики медленных реакций, знание характера теплопередачи дает возможность предвещать температуру самовоспламенения и ее зависимость от размеров заряда, концентрации горючей смеси, теплового эффекта реакции. Можно заранее определить время, которое пройдет от начала опыта до возникновения взрыва. В зависимости от размеров сосуда, природы вещества, его плотности и других характеристик это время изменяется от сотых долей секунды до больших величин.

Еще в начале века бытовал взгляд на температуру воспламенения как на некоторую постоянную для данного вещества величину. Теперь же стало ясно, что температура воспламенения зависит от многих, казалось бы, «посторонних» причин, например, от размера заряда.

Как уже говорилось, для заря-

да определенного диаметра существует критическая начальная температура вещества, выше которой происходит взрыв. Очевидно, что для заданной начальной температуры вещества существует критический диаметр заряда, выше которого взрыв есть, а ниже — нет.

Критические условия характерны не только для самовоспламенения, но и всех процессов поджигания и распространения пламени. Так, распространение пламени возможно лишь в определенных интервалах состава смеси («концентрационные пределы»). По мере уменьшения давления «концентрационные пределы» сужаются. Наконец, ниже определенного давления («предел по давлению») горение вообще невозможно. Все эти явления объясняются на основе тех же соображений о воздействии выделения и отвода тепла на кинетику химических реакций.

Советская школа исследователей раскрыла также механизм распространения пламени. Разработана теория нормальной скорости распространения пламени в газовых горючих смесях, взрывчатых веществах, порохах. В веществе с постоянной скоростью распространяется узкая зона реакции, разделяющая холодный газ от горячих продуктов реакции. Этот режим горения также определяется взаимосвязью выделяемого тепла и отвода его в близлежащие слои холодного, непрореагировавшего газа. Оказалось, что равенство между тепловыделением и теплоотводом обеспечивается лишь при строго определенной скорости распространения зоны пламени. При поджигании газа скорость устанавливается автоматически. Зная кинетику химических реакций, можно теоретически определить эту скорость и ее зависимость от различных условий опыта.

До сих пор мы говорили о взаимодействии химической реакции и вызванного ею выделения тепла. Не менее важно и

взаимодействие между химической кинетикой и механическим движением, возникающим в ходе реакции. Взрывчатое вещество, например, не детонирует, если диаметр цилиндрического заряда мал. Другими словами, для детонации существует «критический» диаметр. Объясняется это тем, что при достаточно большом диаметре заряда химическая реакция успевает завершиться прежде, чем вещество будет раздроблено из-за повышения давления. Итак, детонация происходит в том случае, когда время реакции меньше времени разброса вещества, из которого состоит заряд определенного диаметра, и наоборот.

В течение многих лет специалисты не могли объяснить причины катастрофического взрыва в Оплау (Германия) нескольких тысяч тонн удобрения — смеси аммиачной селитры с инертным веществом — сульфатом аммония. Он произошел при попытке дробления сложившейся массы взрывом малых зарядов. В свете понятия критического диаметра детонации причины взрыва в Оплау становятся ясными. Долгое время считалось, что даже чистая аммиачная селитра неспособна к детонации. Профессор А. Ф. Беляев опроверг это мнение. «Секрет» заключался в том, что «критический диаметр» для этого вещества даже в рыхлом состоянии сравнительно большой — десять сантиметров.

Профессору А. Ф. Беляеву большая роль принадлежала также в исследовании введенного академиком Ю. Б. Харитоновым понятия «критического диаметра детонации» как характеристики детонационной способности вещества, ныне общепринятой в мировой научной литературе.

Исследуя в 30-х годах совместно с Ю. Б. Харитоновым условия возникновения детонации, А. Ф. Беляев обнаружил, что взрыв может передаваться от одного заряда к другому даже в вакууме. Происходит это за счет мельчайших частиц взрывчатого

вещества, разлетающихся со скоростью нескольких километров в секунду, которые при ударе о «мишень» создают микроскопические очаги нагрева, достаточные, однако, для возбуждения детонации. В очаге действует та же «конкуренция» между скоростью выделения тепла из-за начавшейся химической реакции и скоростью теплоотвода в окружающее взрывчатое вещество. В результате очаг либо охлаждается и потухает, либо разогревается, растет и вызывает детонацию. Можно говорить о критической энергии и критическом размере очага. Этими характеристиками в основном определяется чувствительность взрывчатых веществ к удару и трению. Процессы в очагах различных размеров А. Ф. Беляев исследовал путем импульсного нагрева тонких проволок, помещенных внутрь взрывчатого вещества.

Широкую известность получили работы ученого о горении летучих взрывчатых веществ, например, нитроглицерина. А. Ф. Беляев показал, что сгорает не само взрывчатое вещество, а его пары. Пламя держится над поверхностью вещества в определенном отдалении от него и своим теплом вызывает его испарение. Эти исследования позволили применить разработанную ранее Я. Б. Зельдовичем и Д. А. Франк-Каменецким теорию скорости распространения пламени в газах к описанию сгорания конденсированных летучих взрывчатых веществ. Позже, когда пришла пора разрабатывать теорию горения порохов и проводить необходимые эксперименты, эта работа Беляева послужила отправной точкой.

В последние годы А. Ф. Беляев изучал горение смесевых порохов. Он открыл много новых явлений, помогающих понять механизм горения в этих системах.

Профессор А. Ф. Беляев был экспериментатором, обладающим замечательным даром объективного, непрелюбительного наблюдения природы. Исключительное научное чутье позволяло ему обнаруживать новые и неожиданные свойства, в казалось бы, известных явлениях. Это достигалось нередко с помощью простых, но четко поставленных опытов.

А. Ф. Беляев внес большой вклад в науку о горении и взрыве. Эта наука продолжает развиваться, углубляя полученные результаты, разрабатывая новые перспективные направления.

Академик
Н. Н. СЕМЕНОВ.

рующей смеси, теплового эффекта реакции. Можно заранее определить время, которое пройдет от начала опыта до возникновения взрыва. В зависимости от размеров сосуда, природы вещества, его плотности и других характеристик это время изменяется от сотых долей секунды до больших величин.

Еще в начале (двадцатого) века бытовал взгляд на температуру воспламенения как на некоторую постоянную для данного вещества величину. Теперь же стало ясно, что температура воспламенения зависит от многих, казалось бы, «посторонних» причин, например, от размера заряда.

Как уже говорилось, для заряда определенного диаметра существует критическая начальная температура вещества, выше которой происходит взрыв. Очевидно, что для заданной начальной температуры вещества существует критический диаметр заряда, выше которого взрыв есть, а ниже — нет.

Критические условия характерны не только для самовоспламенения, но и всех процессов поджигания и распространения пламени. Так, распространение пламени возможно лишь в определенных интервалах состава смеси («концентрационные пределы»). По мере уменьшения давления «концентрационные пределы» сужаются. Наконец, ниже определенного давления («предел по давлению») горение вообще невозможно. Все эти явления объясняются на основе тех же соображений о воздействии выделения и отвода тепла на кинетику химических реакций.

Советская школа исследователей раскрыла также механизм распространения пламени. Разработана теория нормальной скорости распространения пламени в газовых горючих смесях, взрывчатых веществах, порохах. В веществе с постоянной скоростью распространяется узкая зона реакции,

разделяющая холодный газ от горячих продуктов реакции. Этот режим горения также определяется взаимосвязью выделяемого тепла и отвода его в близлежащие слои холодного непрореагировавшего газа. Оказалось, что равенство между тепловыделением и теплоотводом обеспечивается лишь при строго определенной скорости распространения зоны пламени. При поджигании газа скорость устанавливается автоматически. Зная кинетику химических реакций, можно теоретически определить эту скорость и ее зависимость от различных условий опыта.

До сих пор мы говорили о взаимодействии химической реакции и вызванного ею выделения тепла. Не менее важно и взаимодействие между химической кинетикой и механическим движением, возникающим в ходе реакции. Взрывчатое вещество, например, не детонирует, если диаметр цилиндрического заряда мал. Другими словами, для детонации существует «критический» диаметр. Объясняется это тем, что при достаточно большом диаметре заряда химическая реакция успевает завершиться прежде, чем вещество будет разбросано из-за повышения давления.

Итак, детонация происходит в том случае, когда время реакции меньше времени разброса вещества, из которого состоит заряд определенного диаметра, и наоборот.

В течение многих лет специалисты не могли объяснить причины катастрофического взрыва в Оппау (Германия) нескольких тысяч тонн удобрения — смеси аммиачной селитры с инертным веществом — сульфатом аммония. Он произошел при попытке дробления слежавшейся массы взрывом малых зарядов. В свете понятия критического диаметра детонации причины взрыва в Оппау становятся ясными. Долгое время считалось, что даже чистая аммиачная селитра не способна к детонации. Профессор А. Ф. Беляев опроверг это мнение. «Секрет» заключался в том, что «критический диаметр» для этого вещества даже в рыхлом состоянии сравнительно большой — десять сантиметров.

Профессору А. Ф. Беляеву большая роль принадлежит также в исследовании введенного академиком Ю. Б. Харитоновым понятия «предельного диаметра детонации» как характеристики детонационной способности вещества, ныне общепринятой в мировой научной литературе.

Исследуя в 30-х годах совместно с Ю. Б. Харитоновым условия возникновения детонации в **инициирующем ВВ — азиде свинца**, А. Ф. Беляев обнару-

жил, что взрыв может передаваться от одного заряда к другому даже в вакууме. Происходит это за счет мельчайших частиц взрывчатого вещества, разлетающихся со скоростью нескольких (2–3) километров в секунду, которые при ударе о «мишень» создают микроскопические очаги нагрева, достаточные, однако, для возбуждения детонации. В очаге действует та же «конкуренция» между скоростью выделения тепла из-за начавшейся химической реакции и скоростью теплоотвода в окружающее взрывчатое вещество. В результате очаг либо охлаждается и потухает, либо разогревается, растет и вызывает детонацию. Можно говорить о критической энергии и критическом размере очага. Этими характеристиками в основном определяется чувствительность взрывчатых веществ к удару и трению. Процессы в очагах различных размеров А. Ф. Беляев исследовал путем импульсного нагрева тонких проволок, помещенных внутрь взрывчатого вещества.

Широкую известность получили работы ученого о горении летучих взрывчатых веществ, например нитроглицерина. А. Ф. Беляев показал, что сгорает не само взрывчатое вещество, а его пары. Пламя держится над поверхностью вещества в определенном отдалении от него и своим теплом вызывает его испарение. Эти исследования позволили применить разработанную ранее Я. Б. Зельдовичем и Д. А. Франк-Каменецким теорию скорости распространения пламени в газах к описанию сгорания конденсированных летучих и взрывчатых веществ. Позже, когда пришла пора разрабатывать теорию горения порохов и проводить необходимые эксперименты, эта работа Беляева послужила отправной точкой.

В последние годы А. Ф. Беляев изучал горение смесевых порохов. Он открыл много новых явлений, помогающих понять механизм горения в этих системах.

Профессор А. Ф. Беляев был экспериментатором, обладающим замечательным даром объективного, непредубежденного наблюдения природы. Искключительное научное чутье позволяло ему обнаруживать новые и неожиданные свойства в казалось бы известных явлениях. Это достигалось нередко с помощью простых, но четко поставленных опытов.

А. Ф. Беляев внес большой вклад в науку о горении и взрыве. Эта наука продолжает развиваться, углубляя полученные результаты, разрабатывая новые перспективные направления.

Академик Н. Н. Семенов
Газета «Правда» 27 января 1967 г.