

## Анатолий Григорьевич Иванов –

*основатель научной школы динамической прочности в РФЯЦ-ВНИИЭФ*

В. А. ОГОРОДНИКОВ



*А. Г. Иванов*

В октябре 2018 г. исполнилось бы 95 лет известному русскому ученому, заслуженному деятелю науки и техники РСФСР, доктору технических наук, профессору Анатолию Григорьевичу Иванову.

Он родился 3 октября 1923 г. в Рязанской области недалеко от железнодорожной станции Александров-Невская. В 1941 г. он окончил школу, а в 1942 г. был призван в действующую армию и прошел всю Великую Отечественную войну. За участие в боевых действиях был награжден орденом Красной Звезды, орденом Отечественной войны I степени и медалью «За отвагу». Демобилизовавшись из армии, начал трудовую деятельность лаборантом в Институте химической физики АН СССР, откуда поступил учиться на физико-технический факультет МГУ и продолжил обучение в Московском инженерно-физическом институте, куда была переведена группа студентов физтеха МГУ и который он закончил в 1953 г.

В июне 1953 г. Анатолий Григорьевич получил направление на работу в КБ-11. С тех пор вся его трудовая деятельность – более 50 лет (до 2006 г.) – была связана с Всероссийским научно-исследовательским институтом экспериментальной физики (РФЯЦ-ВНИИЭФ). Работу он начал в отделе 26 газодинамической отработки ядерных зарядов. Результаты проведенных исследований по газодинамической отработке группы зарядов стали содержанием его кандидатской диссертации. По предложению академиков Ю. Б. Харитона и Е. А. Негина кандидатская диссертация

Не счесть проблем в науках точных  
Как ни скрывала тайны прочность.  
Все, что в ней виделось невнятно  
Теперь открыто и понятно.

*О. В. Свицкий*

была переоформлена, и после ее защиты в мае 1965 г. Анатолий Григорьевич получил степень доктора наук.

А. Г. Иванов принадлежал ко «второй волне» специалистов, призванных на работу в КБ-11 (ВНИИЭФ). Многие ученые из «первой волны» набора 1946–1947 гг., создатели первых конструкций советского ядерного оружия, вскоре уехали из ВНИИЭФ. На плечи оставшихся ученых, а также молодых специалистов «второй волны» легла основная тяжесть создания ядерного щита Советского Союза.

Анатолий Григорьевич более 35 лет (1959–1996 гг.) возглавлял научно-исследовательский отдел Института экспериментальной газодинамики и физики взрыва ВНИИЭФ, а с 1997 г. сосредоточился только на научной работе. Его имя широко известно научной общественности нашей страны и за рубежом благодаря ряду монографий и сотням публикаций в научных журналах, в том числе его пионерским работам по исследованию электрических эффектов в ударных волнах, открытию ударных волн разрежения, изучению динамической прочности материалов, установлению роли масштабных эффектов энергетической природы при динамическом разрушении, созданию уникальных по своим параметрам взрыволокализирующих контейнеров облучательных транспортальных комплексов и обоснованию динамической прочности корпусов ядерных реакторов. Под его руководством защищено 16 кандидатских и 6 докторских диссертаций.

Наиболее значимый след Анатолий Григорьевич оставил в науке о прочности и разрушении. Следует напомнить, что важным этапом в развитии современных представлений об этой науке в начале XX века явился революционный переход от классических теорий предельных состояний,

основанных на критических значениях главных напряжений ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ), главных деформаций ( $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ ), главных касательных напряжений ( $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ ) или максимальной удельной энергии формоизменения, предложенных Галилеем, Мариоттом, Треском, Максвеллом, Генки и Мизесом, к линейной механике разрушения, в основе которой лежит утверждение, что реальную прочность образцов материала определяют имеющиеся в них микротрещины или дефекты, способствующие концентрации напряжений, достигающих в локальных областях величины теоретической прочности. Это, в частности, объясняет примерно на два-три порядка меньшую прочность кристаллических тел по сравнению с теоретической.

Не рассматривая напряженное состояние материала в вершине трещины и не учитывая разрыв межатомных связей, используя только изменение энергии системы при росте трещины, А. Гриффитс получил фундаментальный результат: для плоского напряженного состояния ( $\sigma = \text{const}$ ) или плоской деформации ( $\varepsilon = \text{const}$ ) зависимость нагрузки или разрушающих напряжений  $\sigma$  от длины начальной трещины  $l_T$  имеет вид (А. А. Griffith. The phenomenon of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Rox. Soc. A221, 1920, p. 163 – 198):

$$\sigma\sqrt{l_T} = \sqrt{2\gamma_0 E},$$

где  $\gamma_0$  – удельная энергия образования поверхности,  $E$  – модуль Юнга.

Анализ подхода А. Гриффитса показывает, что он сильно упрощает ряд сложных особенностей явления разрушения, связанных с влиянием пластичности, температуры, времени, предыстории нагружения, внешней среды и др. Поэтому практическая применимость теории А. Гриффитса в ее первоначальном виде ограничена рядом обстоятельств. В частности, приведенный критерий представляет необходимое условие разрушения, но может быть недостаточным, так как рассматривает только исходное и конечное состояния системы и не учитывает детали развития разрушения на пути продвижения трещины. В общем случае должно существовать дополнительное условие, например, условие достижения критического напряжения. Кроме того, для пластичных материалов, разрушающихся после предварительного пластического деформирования, возникает необходимость учета части энергии, расходуемой на процесс пластического деформирования вблизи вершины трещины.

Тем не менее, теория А. Гриффитса принципиально объясняет ряд явлений: катастрофический характер хрупкого разрушения, большие скорости при движении трещин, невозможность остановить процесс роста трещины, если пройдена критическая точка, зависимость разрушающих напряжений от чистоты боковой поверхности образца и, наверное, самое главное для практических приложений – наличие масштабных эффектов статистической природы при разрушении. Последнее следует из того обстоятельства, что чем больше характерный размер объекта, тем выше вероятность нахождения в нем трещин большего размера, а следовательно, в соответствии с критерием, необходима меньшая величина разрушающего напряжения.

Успехи в разработке линейной механики разрушения и ее модификаций хорошо известны. Однако известны и их узкие места, особенно, когда это касается применения результатов исследований к конкретным конструкциям. Если ранее непрогнозируемое разрушение списывали на ошибки конструкторов, качество материалов и т. п., то при переходе к линейной механике разрушения изменилась сама идеология надежности. Принимается, что «жизнь» конструкции – это «жизнь» ее дефектов. При достижении трещиной критических размеров возможен ее неконтролируемый рост. Положение здесь парадоксальное: чем прочнее материал, тем меньше критический размер трещины. Требуется постоянная высоконадежная диагностика дефектов, которая не всегда возможна, например,

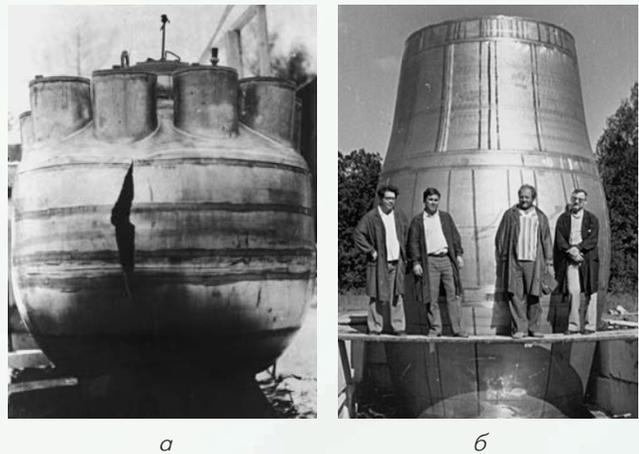


Рис. 1. Опыты по взрывному нагружению сосудов: а – диаметр сосуда 1,3 м, стенки – сталь, толщина 3 мм; заряд ВВ – 0,2 кг; б – диаметр сосуда 2,44 м, высота 5,5 м, стенки – сталь, толщиной 5,5 мм. Слева направо участники опыта 31 июня 1980 г.: В. В. Жидков, В. И. Цыпкин, Г. Ф. Городов, А. Г. Иванов

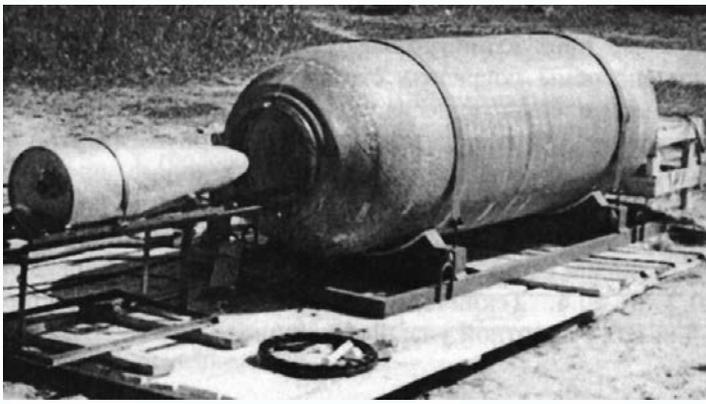


Рис. 2. Взрывостойкие камеры, использующие волокнистые композиты

для крупногабаритных объектов или описания разрушения в условиях высокоинтенсивного динамического разрушения. Эти обстоятельства требовали поиска других подходов к решению проблемы разрушения, отличных от принятых в линейной механике разрушения и ее модификациях.

И такой подход, названный интегральным, был предложен А. Г. Ивановым («Разрушение разномасштабных объектов при взрыве». Под редакцией А. Г. Иванова. Саров, 2001.) В отделе 26, которым руководил А. Г. Иванов в 1960–1970 гг. в секторе 3, начали активно заниматься прочностью замкнутых сосудов при их экстремально высоком взрывном нагружении изнутри.

Было обнаружено наличие сильных масштабных эффектов. Так, при уменьшении размера геометрически подобной модели из той же марки стали в 15 раз относительно прототипа значение параметра  $\xi = m_{\text{ВВ}}/M_{\text{сосуда}}$  возрастало тоже примерно в 5 раз, что нельзя было объяснить с позиций линейной механики разрушения (масштабный эффект статической природы).

А. Г. Иванов пришел к выводу, что результаты подобных эффектов можно объяснить, если принять во внимание, что работа, совершаемая при прохождении трещины разрушения, пропорциональна площади сечения сосуда ( $R^2$ ), а кинетическая энергия радиально-ускоряемых стенок пропорциональна массе ВВ и сосуда, то есть  $R^3$ . Поэтому разрушение геометрически подобных сосудов меньших размеров, нагружаемых изнутри взрывом ВВ, должно протекать при больших значениях параметра  $\xi$ , чем у сосудов большего размера.

Согласно интегральному подходу А. Г. Иванова, для исключения самой возможности разрушения главное внимание уделено необходимо-

му условию разрушения – наличию требуемого для разрушения запаса упругой энергии деформации во всем объекте или его характерной части. При таком подходе описание разрушения рассматривается как двухстадийное. Первая стадия – накопление повреждений, развитие и объединение которых происходит независимо от природы различных микромеханизмов, их порождающих. Вторая стадия – прохождение магистральной трещины.

Переход от первой стадии разрушения ко второй количественно может быть описан как следствии достижения или некоторого превышения уровня накопившейся в объекте упругой энергии деформации в сравнении с упругой энергией, необходимой для совершения работы по продвижению магистральной трещины через рассматриваемый объект. Если вторая стадия наступает без заметного изменения характеристик материала объекта, например, в упругой области деформации, фактически минуя первую стадию, процесс прохождения трещины идет со скоростью, сравнимой со скоростью звука в материале. Само разрушение носит хрупкий характер и может иметь катастрофические последствия.

Для исключения самой возможности хрупких разрушений необходимо выполнение условия, чтобы запаса упругой энергии в объекте было меньше работы, необходимой для его разрушения на части. Вкладом инерционных сил в работу разрушения в ряде случаев можно пренебречь.

С позиций интегрального подхода становятся понятными пути ухода от масштабных эффектов энергетической природы: замена прутка на канат, толстостенной оболочки на рулонированную, одной газовой трубы большого размера тремя-пятью параллельно соединенным трубопро-



Рис. 3. Транспортные взрывные камеры

водами с меньшим поперечным размером, при выполнении силовых оболочек взрывозащитных камер можно использовать стеклопластики, где характерным размером будет не толщина стенки оболочки, а диаметр стеклянных нитей, имеющих большую прочность, чем сталь.

Предложенный А. Г. Ивановым подход к проблеме разрушения позволил с единых энергетических позиций понять ряд явлений, которые не нашли объяснения ни в рамках классических теорий прочности, ни в рамках линейной механики разрушения:

- обнаружить и описать динамический пик пластичности на зависимости  $\varepsilon_p = \varepsilon(\dot{\varepsilon})$ , где  $\varepsilon_p$  – деформация,  $\dot{\varepsilon}$  – скорость изменения деформации;

- предложить физическую модель фрагментации материалов оболочки радиуса  $R$  с начальной скоростью  $U_0$  под действием нагрузки взрывного типа на осколки с характерным размером  $a$ ;

- установить единый механизм откольного разрушения пластичных и хрупких материалов, получить зависимость энергии разрушения  $\lambda$  от времени  $t$  или толщины откола  $L = C \cdot t$  и объяснить явление «зеркального откола» путем взаимодействия ударных волн разрежения, открытых им экспериментально;

- предложить физически непротиворечивое описание процесса взаимодействия малых космических тел типа кометы Шумейкерова – Леви,

Тунгусского и Сихотэ-Алинского метеоритов, с атмосферами планет и их фрагментацию, а также гипотезу образования Луны – как отколовшуюся часть Земли в результате лобового соударения налетевшего космического тела в область экватора планеты;

- создать высоконадежные взрывостойкие камеры и сосуды различного назначения с использованием волокнистых композитов, свободных от проявления сильных масштабных эффектов энергетической природы;

- создать самостоятельное научное направление, в рамках которого разработаны транспортные взрывостойкие камеры, способные локализовать внутри без разгерметизации взрыв заряда с тротильным эквивалентом от 10 г до 150 кг (рис. 3).

Из приведенных примеров очевидна роль Анатолия Григорьевича Иванова не только в разработке всего семейства ядерных зарядов ВНИИЭФ, но и в создании науки о динамической прочности – одной из составных частей научной школы газодинамики Института экспериментальной газодинамики и физики взрыва в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

**ОГОРОДНИКОВ Владимир Александрович** –  
 начальник лаборатории ИФВ РФЯЦ-ВНИИЭФ,  
 доктор физ.-мат. наук