

## Вязкость и диссипативные процессы в ударно-сжатых веществах

В. А. ОГОРОДНИКОВ

Реологическое поведение различных материалов определяется их упругостью, пластичностью, прочностью и вязкостью. Вязкость или внутреннее трение наиболее универсальная характеристика среды, свойственная ее различным агрегатным состояниям: твердому, жидкому и газообразному. Из классической механики следует, что для поддержания равномерного прямолинейного движения тел не нужно никаких сил. Однако известно, что движущиеся в той или иной среде тела при исчезновении силы, приводящей их в движение, со временем останавливаются. Вязкость – это как раз то свойство среды, которое приводит к кажущемуся противоречию классической механики с действительностью. Интересно отметить, что именно Ньютону принадлежит авторство простого опыта, позволяющего определить силу вязкого трения –  $F_{\text{тр}}$ , а также исследовать ее зависимость от свойств среды и условий движения тела в ней. Ньютон установил, что сила вязкого трения в слое среды пропорциональна его площади –  $S$ , скорости движения верхней границы слоя относительно его нижней границы –  $U$  и обратно пропорциональна толщине слоя –  $d$  (расстояния между верхней и нижней границами слоя):

$$F_{\text{тр}} = -\eta \frac{US}{d},$$

где  $\eta$  – коэффициент динамической вязкости или внутреннего трения, который характеризует свойства среды и имеет размерность Па·с.

Из закона трения Ньютона следует связь между касательными напряжениями при сдвиге  $\tau$  и градиентом скорости –  $\frac{dU}{dx}$  или скоростью деформации –  $\dot{\epsilon}$ :

$$\tau = \eta \frac{dU}{dx} = \eta \dot{\epsilon}.$$

Экспериментально установлено, что для многих материалов динамический предел текучести  $\sigma_D$  зависит от скорости деформации в виде:

$$\sigma_D = \sigma_0 + \eta \dot{\epsilon},$$

где  $\sigma_0$  – статический предел текучести. При этом величина  $\eta \dot{\epsilon}$  является вязким сопротивле-

нием пластической деформации, а коэффициент динамической вязкости характеризует необратимые процессы, которые происходят при пластической деформации. Известна возможность существования таких течений металлов при больших скоростях деформации  $\dot{\epsilon} \geq 10^2 \text{ с}^{-1}$ , при которых вязкое сопротивление деформированию будет соизмеримо с пластическим сопротивлением и даже определяющим.

Говоря об универсальности вязкости, как характеристики среды, следует указать на своеобразии механизмов ее проявления в различных агрегатных состояниях вещества, отличающихся ближним (жидкости) или дальним (кристаллы) порядком взаимодействия между частицами или его отсутствием в газах. Так, если в газовой среде частицы совершают хаотически поступательное движение, а в твердом теле частицы колеблются около положения равновесия, то в жидкости молекулы демонстрируют некоторое промежуточное поведение между поведением в твердом теле и в газе. Молекулы жидкости некоторое время колеблются около одного положения равновесия, а затем перескакивают и оседают уже у другого положения равновесия. При этом вязкость жидкости зависит от времени оседлости молекул около положений их равновесия, которое определяется, в свою очередь, отношением энергии активации  $E_0$ , то есть энергии, которую необходимо сообщить молекуле для совершения такого скачка, к энергии теплового колебания  $kT$ , где  $T$  – температура,  $k$  – постоянная Больцмана. Отсюда следует знаменитая формула Я. И. Френкеля  $\eta = A e^{E_0/kT}$ , где  $A = \text{const}$ , в соответствии с которой при увеличении температуры вязкость жидкости убывает. Для газов наблюдается увеличение вязкости с ростом температуры  $\eta \approx \sqrt{T}$ . В то же время, нельзя не отметить, что именно Я. И. Френкелю принадлежит устранение кажущейся противоположности между жидким и твердым состоянием при температурах не слишком далеких от точки плавления или кристаллизации путем раскрытия элементов твердости и порядка в жидкостях, с одной стороны, и элементов текучести и беспорядка в твердых телах, с другой стороны.

Вязкость является важнейшей характеристикой, особенно для таких веществ, как кровь, спирт, лаки, краски, горючесмазочные материалы и т. д. Мощность многих промышленных установок, например, насосов, компрессоров и мешалок, определяется именно этой величиной. Для металлов коэффициент вязкости является одной из физических характеристик материала с влиянием которой связывается зависимость сопротивления от скорости деформации, проявляющаяся во всех процессах упругопластического деформирования под действием импульсных нагрузок: процессах сварки и резки взрывом, технологических операциях формоизменения металлической заготовки (штамповке) с использованием импульсных источников энергии, при высокоскоростном взаимодействии твердых деформируемых тел (бронепробитии) и так далее. В связи с этим исследование зависимости коэффициента динамической вязкости от структуры материала и скорости пластической деформации, характеризующей мгновенные условия нагружения, является необходимым как для понимания закономерностей высокоскоростного деформирования, так и для решения практических задач по использованию импульсных нагрузок в современной технике и технологиях. Важную роль при решении практических и научных задач играет зависимость вязкости от температуры и давления. Так, например, важно знать, не загустеет ли нефть в трубопроводах при различных климатических условиях ее транспортировки. Вязкость жидкого железа, сплавов на его основе и расплавленных силикатов, входящих в наружную оболочку (мантию) Земли, служит одним из основных параметров для интерпретации сейсмических данных, обоснования моделей, которые объясняют химическую дифференциацию вещества, приводящую к современному состоянию Земли и других планетарных тел, а также распределение температуры и генерацию магнитного поля Земли. Кроме того, вязкость является наиболее чувствительной характеристикой вещества, дающей представление о силах межмолекулярного взаимодействия в широком диапазоне давлений.

В связи с большими неопределенностями в величинах вязкости при высоких давлениях и температурах, ее оценки и представление об основных тенденциях ее поведения являются весьма существенными. Следует отметить, что прямое экспериментальное исследование вязкости материалов в усло-

виях, например, их нахождения в ядре Земли при давлениях порядка 100–400 ГПа и температурах выше 4000 К выходит за рамки возможностей современной лабораторной техники при использовании статического сжатия в алмазных наковальнях с применением лазерного нагрева. Казалось бы, эту проблему могли решить ударно-волновые методы. Однако пример с вязкостью ударно-сжатой воды в диапазоне давлений до 10 ГПа (по данным разных авторов) свидетельствует об ее отличиях до шести порядков (от  $10^{-3}$  до  $10^3$  Па·с), что указывает на существование вопросов в методическом плане. Действительно, как следует из обширной библиографии работ, на сегодня решены принципиальные проблемы теоретического и экспериментального характера по оценке вязкости  $\eta$  для жидких металлов при высоких температурах. Однако среди большого количества методов оценки вязкости веществ в их твердом и жидком состояниях при высоких давлениях и температурах имеются значительные неопределенности. Особенно это относится к методам оценки вязкости при ударно-волновом нагружении, при котором физическая картина ударно-волновой деформации твердого тела имеет довольно сложный характер. Он связан с конкуренцией процессов сжатия и нагрева, переходом вещества из упругого твердого в пластическое квазижидкое состояние. При этом вязкость влияет как на ширину фронта ударной волны ( $\Delta V$ ), так и на диссипативные процессы. Пионерская работа в этом направлении была выполнена в отделе 26 ИФВ в начале 1960-х гг. А. Г. Олейником и В. Н. Минеевым совместно с Р. М. Зайделем и А. Д. Сахаровым, который сформулировал эту задачу. Они исследовали развитие детерминированных возмущений на



Обсуждение проблемы вязкости  
(В. А. Огородников, А. В. Романов)

фронте УВ в геометрически подобных системах, а данные о вязкости находили из сравнения экспериментальных результатов с теоретическими расчетами.

Несмотря на лестную оценку экспериментального метода: «...Метод элегантен в своей простоте», данную в американском физическом журнале, близкие результаты по величине вязкости, полученные с помощью этого метода для таких веществ, как вода, свинец, алюминий, сталь и уран, носят до сих пор дискуссионный характер.

В монографии (Огородников В. А. Вязкость и ее роль в динамических процессах. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2012) приводится описание более поздних, наиболее часто применяемых методов оценки коэффициента динамической вязкости веществ в ударно-волновых экспериментах:

- по ширине фронта УВ;
- скоростным зависимостям сопротивления материалов деформированию в УВ и растяжению в волне разгрузки (при отколе);
- экспериментальной зависимости смещения частиц материала соударяющихся пластин при сварке взрывом в направлении движения точки контакта, которую сравнивают с аналогичной зависимостью, получаемой с использованием в расчетах обобщенного уравнения Стокса для установившегося движения несжимаемой вязкой жидкости;
- регистрации зависимости от времени ускорения «тяжелых» цилиндрических тел (проволочек) потоком легкого вещества за фронтом УВ, которую сравнивают с расчетной при использовании уравнения Навье–Стокса для вязкой жидкости;



*Подготовка эксперимента по апробации нового метода оценки динамической вязкости*

– измерению проводимости веществ за фронтом УВ;

– расчетному анализу экспериментов с типичными вязкопластическими течениями, например, при инерционном сжатии цилиндрических оболочек или образовании полости в центре шара при их взрывном нагружении.

Анализ результатов, полученных с использованием перечисленных выше методов оценок вязкости, для таких веществ, как вода, алюминий, свинец, медь, сталь и уран, при давлениях на фронте УВ в диапазоне от 0,1 до 250 ГПа, свидетельствует о больших разбросах в значениях вязкости для одних и тех же материалов при близких условиях нагружения, что также указывает на их дискуссионный характер.

Нетривиальное значение диссипативных процессов при высокоскоростных вязкопластических течениях осознавалось давно. Однако последовательный учет диссипативных потерь, обусловленных влиянием вязкости, в различных задачах физики высоких плотностей энергии сдерживается из-за отсутствия достаточно развитых моделей и соответствующего константного обеспечения. Остановлюсь на одном конкретном примере важности учета адекватных значений коэффициента динамической вязкости конструкционных материалов. В работе (Попов Н. А., Щербаков В. А., Минеев В. Н., Фунтиков А. И. УФН, 2008, т. 138, № 10, с. 1087–1094) при обсуждении проблемы газодинамического термоядерного синтеза (ГДТС), основанного на быстром сферически-симметричном сжатии дейтерийтритиевой (ДТ) мишени с помощью энергии взрыва заряда ВВ и использования эффекта имплозии в различных кумулирующих системах (каскадного, многослойного или комбинированного типов) показано, что на выполнение условий зажигания ДТ-смеси влияет ряд ограничивающих факторов. Это связано с тем, что в известных системах ГДТС использовали сферические заряды ВВ с большим наружным радиусом  $R_+$  и мишени с малым начальным радиусом  $r_0$ , то есть выполняли условие  $r_0 \ll R_+$ , а заряд ВВ инициировали по наружной поверхности в конечном числе точек. Кроме того, физические схемы представляли собой многокаскадную или многослойную систему, состоящую из оболочек различной плотности (сталь, уран, оргстекло и т. п.), скрепленных между собой несимметричными элементами – спицами. Даже переход к многоточечной высокосинхронной системе



Обсуждение постановки расчетов (А. О. Бликов, В. А. Огородников)

инициирования ( $n > 1000$ ) и достаточно однородному жидкому заряду ВВ, позволившем достичь высокой точности фокусировки, отличающейся от расчетной геометрии не более чем на 0,1 мм, не позволил достичь расчетного выхода нейтронов. Максимальный, рекордно высокий, достигнутый на сегодня нейтронный выход из центра мишени с начальным радиусом  $r_0 = 1$  мм, содержащей ДТ-смесь с плотностью  $\rho_0 = 0,1 \text{ г} \cdot \text{см}^3$ , составил  $\sim 5 \cdot 10^{13}$  нейтронов. В этом опыте, проведенном в 1982 г., по оценкам были достигнуты температура  $T \approx 0,65$  кэВ, максимальная плотность  $\rho \approx 80 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$  и величина  $\rho r \approx 0,8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ , достаточно близкие для воспламенения ДТ-газа по критерию Лоусона:  $\rho r \geq 1,0 \text{ г} \cdot \text{см}^{-2}$ ,  $T \geq 2-3$  кэВ. Тем не менее, экспериментальный нейтронный выход оказался на 2-3 порядка ниже расчетного.

Как следует из указанной работы, на выполнение реальных условий зажигания влияют, главным образом, симметрия сжатия, от которой зависит максимально достижимая плотность газа, и перемешивание на границах разноплотных слоев, от которого зависит степень кумуляции и величина максимальной температуры в центре термоядерной смеси. Турбулентное перемешивание возникает на контактной границе разноплотных сред при ее ускорении со стороны легкого вещества, в частности, при торможении тяжелой оболочки легким газом, когда она испытывает отрицательное ускорение (гравитационная неустойчивость Рэля-Тейлора) или после прохождения через нее фронта УВ (неустойчивости Рихтмайера-Мешкова, Кельвина-Гельмгольца). Наряду с этим необходимо учесть возможность попадания в газ материала оболочек в виде струйных течений и выброса частиц с поверхности оболочки при выходе на

нее УВ. Однако учет этих эффектов современными расчетными методиками пока не позволил адекватно описать полученные экспериментальные результаты.

По мнению автора, на формирование начального уровня асимметрии оболочек и ее дальнейшее развитие, вплоть до появления неустойчивости и перемешивания границ разноплотных слоев, должна сильно влиять вязкость материала оболочек. Вязкость будет влиять и на динамику системы, то есть определять уровень диссипативных потерь. В сферических устройствах ГДТС материал оболочек при их схождении деформируется при высоких скоростях деформации:

$\dot{\epsilon} = \frac{W}{R}$ , где  $W$ ,  $R$  – начальные скорость

и радиус расположения оболочки, которые составляют величину  $\dot{\epsilon}$  ( $10^5-10^7 \text{ с}^{-1}$ ). Это, в свою очередь, должно приводить к высоким диссипативным потерям, связанным с сопротивлением симметричной составляющей при схождении оболочек,  $\eta \dot{\epsilon}$ . Если величины  $\dot{\epsilon}$  легко поддаются оценке, то с определением величины коэффициента динамической вязкости  $\eta$  в условиях нагружения, реализующихся в системах ГДТС, как отмечено выше, дело обстоит сложнее. Если воспользоваться данными для стали и урана, которые дают значение вязкости  $\eta \approx 10^3-10^4 \text{ Па} \cdot \text{с}$ , то динамическое сопротивление деформированию может составить величину  $\eta \dot{\epsilon} \approx 10^{10}-10^{11} \text{ Па}$ , что на 1-2 порядка больше исходной прочности этих материалов в твердом состоянии. Таким образом, учет вязкости может оказать решающее значение на симметрию, динамику и диссипативные потери систем ГДТС. Этим еще раз подтверждена необходимость получения достоверных экспериментальных данных по величине коэффициента динамической вязкости конструкционных материалов в широком диапазоне изменения давлений, скоростей деформации и температур. Однако необходимо использовать достаточно обоснованные методики ее определения в данных условиях нагружения. Отсутствие таковых является одной из нерешенных сегодня задач физики ударных волн в конденсированных средах.

**ОГОРОДНИКОВ Владимир Александрович** –  
начальник отдела 0309 ИФВ, доктор физ.-мат.  
наук, лауреат премии Правительства РФ,  
профессор СарФТИ НИЯУ МИФИ