

Начало исследований «рихтмайеровской» неустойчивости во ВНИИЭФ

Е. Е. МЕШКОВ

После окончания в 1960 г. МИФИ и поступления во ВНИИЭФ я попал в отдел 21 сектора 3 (сейчас ИФВ), которым руководил Александр Сергеевич Козырев. Отдел в это время переживал необычайный подъем. В начале 1960-х гг. существовала уверенность в возможности скорого достижения зажигания термоядерного горючего в фокусе сферического заряда ВВ – позднее это направление работ получило название газодинамический термоядерный синтез (ГДТС). Этому способствовало значительное (на несколько порядков) повышение нейтронного выхода в экспериментах на сферических зарядах с применением слоистой кумулирующей системы Забабахина (или как ее называли «слойки»), достигнутое недавно. И казалось, что новые усовершенствования приведут к быстрому успеху. И это всем казалось, не только Козыреву.

Одно из направлений работ по ГДТС этого времени – попытка решить проблему путем применения в качестве слоев слоистой системы некоторых экзотических материалов. Инициатором этого направления был Иван Григорьевич Проскурин, сотрудник отдела 25. Отдел 25, в котором также велись работы по ГДТС, был для нашего отдела конкурентом. Проскуруну удалось добиться некоторого успеха. Впрочем, этот успех нами оспаривался, и в нашем отделе была проведена серия экспериментов с различными материалами в слойке (совсем не экзотическими), и результаты этих опытов подвергали сомнению результаты Проскурина. С другой стороны, они указывали на возможность суще-

ственного влияния гидродинамических неустойчивостей на процессы кумуляции ударной волны в слойке.

Но это была только гипотеза. А как ее проверить? Как «заглянуть» внутрь слойки, расположенной в сферическом заряде ВВ массой более 200 кг во время взрыва этого заряда? Именно в это время (конец 1963 г.)

и в связи с описанными событиями у меня родилась мысль использовать для исследования задачи о влиянии на процессы кумуляции в слоистой системе, как тогда ее у нас называли, «рихтмайеровской» неустойчивости, ударную трубу, в которой слоистая система создавалась бы из газов разной плотности, разделенных тонкими пленками. «Рихтмайеровской» неустойчивость называлась по имени американского математика Роберта Рихтмайера, который опубликовал свою работу в 1960 г. (Richtmyer R. D. (1960). Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids. Commun. Pure Appl. Math. V. 13, 297). Эта работа в описываемые времена приобрела во ВНИИЭФ широкую известность.

Во многих отношениях для начатой работы обстоятельства складывались благополучно. Незадолго до описываемых событий в 1962 г. вышел сборник переводов «Ударные трубы». Он содержал большой объем статей, в которых можно было найти практически все необходимые сведения для выбора конструкции ударной трубы и расчета параметров течения в ней. Эта книга была для меня настольной на протяжении многих лет. Схему своей ударной трубы я скопировал из этой книги, из статьи известного исследователя Шардина, который подробно, с немецкой аккуратностью, описал свою трубу. И, в общем, я не ошибся в своем выборе, во многих отношениях эта конструкция оказалась удобной в работе. На ней было выполнено огромное число экспериментов. И до сих пор эта ударная труба работает.

Другой большой удачей для меня была находка теневой установки ИАВ-451. Случилось это следующим образом. В подвале под лестницей нашего здания сектора 3 стояли два загадочных преогромных длинных ящика, к тому же окованных железом. Меня мучило любопытство – что же за «сокровища» скрываются в этих ящиках? И вот я вдруг случайно узнал, что в этих ящиках действительно скрывается сокровище именно для меня – теневая установка ИАВ-451 – как раз то, что мне было необходимо для визуализации течения в ударной трубе. Как выяснилось, эту установку получил С. А. Новиков еще в 1956 г. для какой-то работы, но по-



А. С. Козырев



Ю. Д. Лавровский

том оказалось, что есть более срочная работа, потом другая, и в результате установка мирно почивала многие годы, дожидаясь своего часа. И, наконец, дождалась; с тех пор и до сего времени установка находится в работе.

Несомненной удачей было и то, что в отделе нашлась для создаваемого комплекса комната площадью около сорока

квадратных метров (это была комната № 4 на третьем этаже).

Благоприятной была и атмосфера, в которой развивалась эта работа. Козырев поддержал мою инициативу. Начальником группы, в которой я работал, был Юрий Дмитриевич Лавровский – ученый и доброжелательный человек, оставивший в памяти всех, кто с ним работал, самые теплые воспоминания. Он постоянно поддерживал мое начинание и практически не вмешивался в мои действия.

Но вместе с тем были и трудности. И трудности немалые. В то время во ВНИИЭФ не было еще ни одной ударной трубы, и набираться опыта работы с такой установкой можно было только из книг и статей. В течение двух лет мне пришлось самостоятельно решать целый ряд методических задач: подобрать материал для диафрагмы ударной трубы; разработать схему оптического сочленения теневой установки и регистрирующей камеры СФР; разработать метод синхронизации работы ударной трубы и камеры СФР; отработать методику получения тонкой (менее 1 мкм) полимерной микропленки; разработать методику заполнения отсеков измерительной секции ударной трубы, разделенных тонкими микропленками, и контроль чистоты газов в отсеках; разработать методику задания возмущений на исследуемой границе; потребовалась также разработка ряда устройств: блока питания лампы вспышки ИФК-120 и т. д.

В середине 1965 г. в цеху нашего сектора были изготовлены узлы ударной трубы (конструкцию которой разработал Борис Кодола), на экспериментальной площадке № 19 была изготовлена деревянная подставка под ИАБ-451, и можно было приступать к монтажу установки. Маленькая работа начинается с большого перекура – и с начала лета все узлы ударной трубы лежали вдоль стен комнаты № 4, посредине сто-

ял стол с сеткой, и весь отдел резался в пинг-понг. А я ходил по комнате и терзался мыслью: «Зачем я ввязался в эту историю?! Зачем мне это было надо?! И что я теперь буду делать?! Ходил бы я как обычно в подвал к Васе Сергиенко, собирал бы себе слойки для очередного опыта, ездил бы на площадку, участвовал бы в подрыве очередного заряда и получал бы очередную порцию талонов на обед». Но слезами горю не поможешь. И после возвращения из отпуска я приступил к работе. К тому же в начале октября у меня появился постоянный помощник – Коля Дерюгин, который в этом году окончил школу и поступил в качестве лаборанта в наш отдел.

Надо сказать, что работа, которой я занимался, для большинства сотрудников отдела представлялась (на фоне основных работ отдела) каким-то пустяком, а сам я чем-то вроде отдельского ненормального (тем более, что в эти годы в свободное время я усердно занимался живописью, и всем это было известно). Но надо сказать, что практически все ко мне относились с симпатией и с интересом наблюдали за этой историей.

Ю. Д. Лавровский в это время был заместителем начальника нашего отдела, у него и без меня была масса дел, но он всегда при необходимости приходил ко мне на помощь. Помогали и другие сотрудники отдела – начальник группы измерителей Вячеслав Викторович Новиков относился ко мне доброжелательно и направлял ко мне сотрудников своей группы: И. Дудина, Н. Мунина, С. Щукина. Но измерительная группа находилась на первом этаже нашего здания, а моя комната № 4 – на третьем. И поэтому я чаще обращался за помощью к соседям – сотрудникам группы Сергея Михайлови-



Установка с ударной трубой, ИАБ-451 и камерой СФР в комнате № 4

ча Бабадея: Игорю Будникову и Геннадию Красовскому. Один из них был лаборантом, другой техником, оба примерно моего возраста, их комната находилась рядом, через коридор напротив нашей комнаты, и при необходимости я всегда мог обращаться к ним за помощью и консультациями по разным техническим вопросам, а они охотно шли мне навстречу, может быть еще и потому, что им и самим было интересно то, чем я занимался. Надо сказать, что И. Будников, будучи всего лишь лаборантом, был весьма сведущ в разных областях электротехники и оптики и недаром получил в отделе прозвище Кулибин; в свою очередь, Г. Красовский свободно ориентировался в высоковольтной технике того времени.

Скоро сказка сказывается, но не скоро дело делается. И половина 1965 г. и почти весь 1966 г. ушли на решение методических задач и подготовку к проведению опытов на ударной трубе. И вот в начале четвертого квартала 1966 г. Козырев, которому надоело наблюдать второй год эту непонятную возню в комнате № 4, и у которого лопнуло терпение, записал мне в квартальный план работ выпуск отчета и предупредил, что, если не будет результата, он закроет мою лавочку.

Неожиданно ушел от меня на более выгодную работу Коля Дерюгин, а на смену ему в октябре пришел новый лаборант Вася Кручинин, и тоже после окончания школы. И вот мы с Васей принялись выполнять грозное указание Козырева. Мы старались изо всех сил, но дело у нас пошло только в декабре. Надо сказать, что я вначале планировал исследование работы газовой слоистой системы – системы слоев газа разной плотности, разделенных тонкими пленками. Но здесь я осознал, что не успеваю решить указанную задачу к заданному сроку и поэтому решил упростить задачу – исследовать неустойчивость границы между двумя газами, ускоряемой ударной волной. Такой вариант постановки задачи был описан в расчетно-теоретической статье Рихтмайера, опубликованной в 1960 г. В своей статье он рассматривал случай развития начальных возмущений границы между двумя газами разной плотности, после ускорения ее ударной волной в направлении от менее плотного газа к более плотному, а случай ускорения границы в противоположном направлении он почему-то в своей статье не рассматривал. Надо сказать, что в описываемое время существовало твердое убеждение, что в этом случае, по аналогии с неустойчивостью Рэлея – Тейлора, граница должна

быть устойчивой. Так думали все, я не был исключением, и поэтому только в двадцатых числах декабря я решил провести такой опыт, просто на всякий случай. И вот где-то за неделю до Нового года мы с Васей такой опыт провели. Это был опыт, в котором ударной волной ускорялась граница между углекислым газом и воздухом. Был уже конец дня, Вася ушел домой, я принес из фотолаборатории еще мокрую после проявления фотопленку, полученную в опыте, и стал ее рассматривать в свете настольной лампы.

То, что я увидел, было для меня неожиданно, как удар грома, – после ускорения ударной волной амплитуда возмущения границы сначала уменьшилась до нуля, а затем после изменения знака амплитуда возмущения начала безостановочно расти. Для меня это было неожиданно, но я мгновенно осознал значение этого факта... Воспоминание об этом мгновении до сих пор заставляет учащенно биться мое сердце.

До конца года мы с Васей провели еще одну серию опытов, я успел написать отчет и сдал его в печать. На квартальном отчете С. Б. Кормер похвалил мою работу и порекомендовал напи-



Наша группа в 1968 г. (фотография с секторской доски почета). Верхний ряд: Т. Куманева (Кораблева), Е. Мешков; нижний ряд: В. Кручинин, А. Мунин

сать статью, отчет занял третье место на конкурсе. Так одним махом моя работа вместо закрытия получила развитие. У меня появился еще один лаборант – Саша Муни, позднее пришла Таня Куманева (позже Т. В. Кораблева), и в таком составе группа проработала до 1969 г.

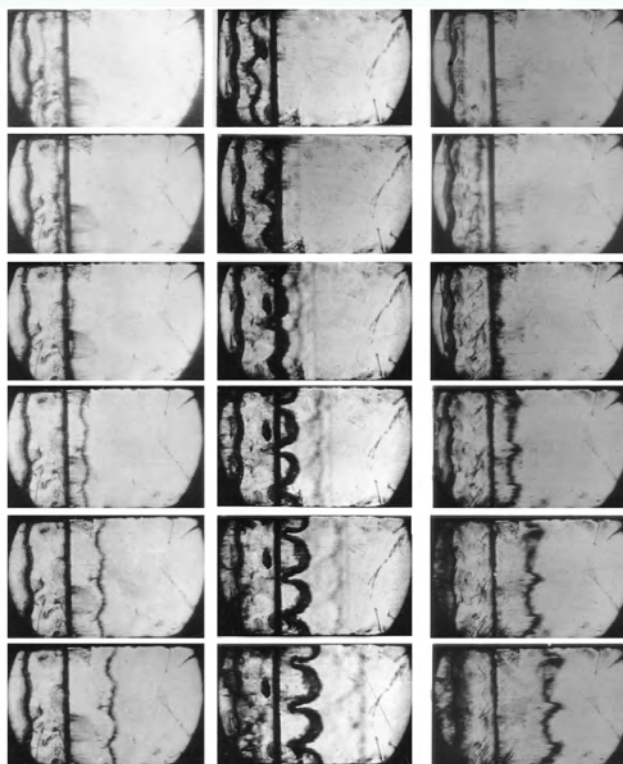
За это время была усовершенствована конструкция измерительной секции трубы, получила развитие методика работы на ударной трубе, были разработаны искровой источник света и методика работы с ним. Написана статья по результатам экспериментов 1966 г., она была опубликована в 1969 г. (Мешков Е. Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной // Изв. АН СССР, МЖГ. № 5, с. 151–158). Эта статья была переведена на английский язык и получила широкую известность (в настоящее время неустойчивость границы двух сред разной плотности, ускоряемая стационарной ударной волной в современной литературе чаще всего именуется неустойчивостью Рихтмайера – Мешкова).

На рисунках ниже приведены серии теневых фотографий течения газов в ударной трубе в последовательные моменты времени, снятые поперек ударной трубы.

Этот успех вдохновил меня: неожиданно я понял, что в моих руках появилась методика, которая позволит решать многие задачи, представляющие интерес для ВНИИЭФ.

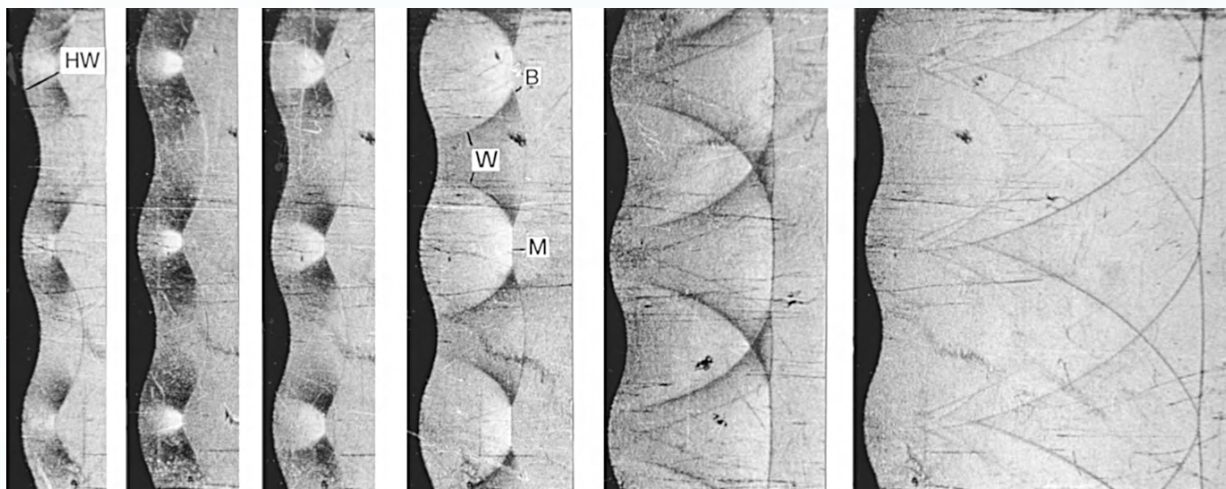
Последовал ряд исследований на ударной трубе явлений, так или иначе связанных с неустойчивостью, индуцированной ударной волной:

- развитие возмущений фронта ударной волны, отраженной от волнистой стенки;

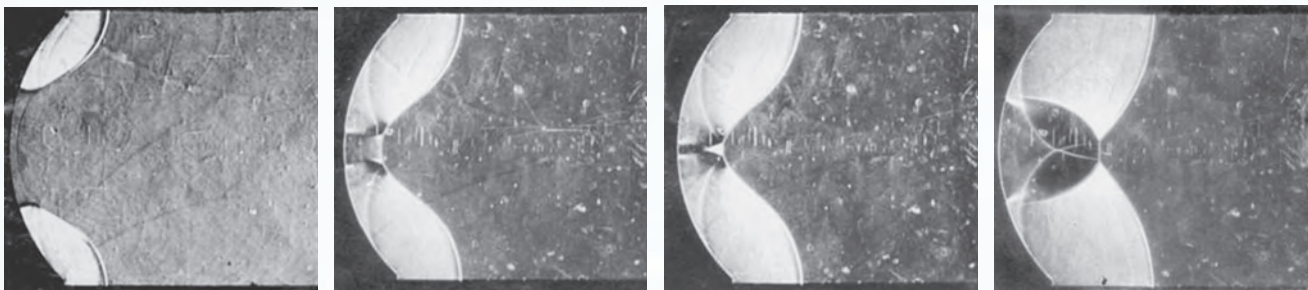


a *b* *c*

Развитие синусоидального возмущения ($\lambda = 40$ мм) границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной (время увеличивается сверху вниз): *a* – воздух ($\rho_0 = 1,2$ г/л) → углекислый газ ($\rho_0 = 1,8$ г/л); *b* – гелий ($\rho_0 = 0,17$ г/л) → фреон-22 ($\rho_0 = 3,6$ г/л); *c* – углекислый газ → воздух. В первых двух случаях ударная волна ускоряет границу в направлении от легкого к более тяжелому газу, при этом возмущение растет, не изменяя знака. В случае *c* ударная волна проходит границу от тяжелого к легкому газу, при этом возмущение также неограниченно растет, но изменив при этом фазу на обратную



Отражение стационарной ударной волны от жесткой волнистой стенки. Жесткая стенка слева (HW), время увеличивается слева направо



Отражение плоской ударной волны от жесткой вогнутой стенки. Жесткая стенка слева, время увеличивается слева направо

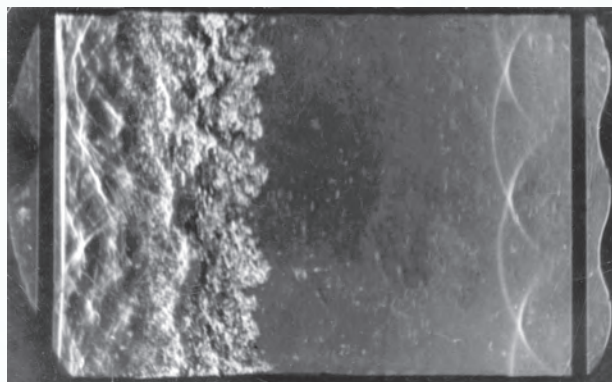
- исследование нелинейных эффектов, связанных с развитием возмущений ударных волн и ограничения, накладываемые ими на применимость линейного приближения на исследования задач, связанных с развитием возмущений в газодинамике (Е. Е. Мешков, В. Н. Мохов, 1982. О критерии применимости линейного приближения в задачах о развитии малых возмущений в газодинамике // ФГВ, № 4, с. 93–96).

Возмущение фронта ударной волны подобно стоячей волне, колеблясь, затухает, и одновременно можно наблюдать, как форма фронта отраженной волны с течением времени отклоняется от синусоидальной. Это проявляется в образовании точек излома на фронте волны, одновременно формируются разрывы на фронтах поперечных волн в потоке за фронтом отраженной волны.

Следующим шагом было исследование эффекта локальной кумуляции, возникающей при отражении ударной волны от жесткой вогнутой стенки (Е. Е. Мешков, 1970. Отражение плоской ударной волны от жесткой вогнутой стенки // Изв. АН СССР. МЖГ, № 4, с. 33).

При отражении ударной волны от вогнутой стенки наблюдается образование и симметричное схождение цилиндрической ударной волны, которое прерывается столкновением на плоскости симметрии тангенциальных волн сжатия или ударных волн; при этом (судя по $X-t$ диаграммам) резко возрастает скорость отраженной от стенки ударной волны. Формируется область концентрации энергии, ограниченная приблизительно плоским участком волны (волна Маха) и поперечными расходящимися ударными волнами. Давление в этой области может возрастать в разы, соответственно возрастает температура (в некоторых научных кругах эта работа более известна, чем исследование неустойчивости).

В ноябре 1968 г. были выполнены эксперименты, давшие позднее толчок к развитию исследований турбулентного перемешивания в 1970-е гг., после того В. В. Никифоровым стали разрабаты-



Первые эксперименты, в которых наблюдалось турбулентное перемешивание на границе двух газов (воздух – гелий), ускоряемой ударными волнами (ноябрь 1968 г.)

ваться полуэмпирические модели турбулентного перемешивания (В. А. Андронов, С. М. Бахрах, Е. Е. Мешков, В. Н. Мохов, В. В. Никифоров, А. В. Певницкий, А. И. Толшмяков, 1976. ЖЭТФ, т. 71, вып. 2(8), с. 806–811).

Первые эксперименты, в которых наблюдалось турбулентное перемешивание в экспериментах на ударной трубе были выполнены еще в 1968 г., но долгое время их результаты не публиковались, поскольку тогда не была ясна роль пленки в этих экспериментах и степень ее влияния на развитие зоны турбулентного перемешивания в экспериментах на ударной трубе. Позднее было установлено, что в этих экспериментах роль начального возмущения играет разнотолщинность (и следовательно разномасовость) пленки. Существенной также является эластичность пленки

В 1969 г. в отдел и в нашу группу перешел Б. Клопов, а в 1970-м после окончания МИФИ к нам попал А. И. Толшмяков, и тематика работ в группе существенно расширилась.

МЕШКОВ Евгений Евграфович –

зав. учебно-исследовательской гидродинамической лабораторией СарФТИ, кандидат физ.-мат. наук