

13. Kraichnan R. H. An almost Markovian Galilean-invariant turbulence model.— J. Fluid. Mech., 1971, vol. 47, N 3.
14. Kraichnan R. H. Approximations for steady-state isotropic turbulence.— Phys. Fluids, 1964, vol. 7, N 8.
15. Новиков Е. А. Статистическая необратимость турбулентности и передача энергии по спектру.— В сб.: Турбулентные течения. М., Наука, 1974.
16. Новиков Е. А. Спектральные неравенства для двумерной турбулентности.— ФАО, 1978, т. 14, № 6.
17. Rose H. A., Sulen P. L. Fully developed turbulence and statistical mechanics.— J. de Physique, 1978, vol. 39, N 5.

УДК 621.436

### КАЧЕСТВЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ФАКЕЛА ПРИ ВПРЫСКЕ ТОПЛИВА В СРЕДУ С ПРОТИВОДАВЛЕНИЕМ ДО 10 АТМ

*В. К. Баев, А. Н. Бажайкин, А. А. Бузуков,  
Б. П. Тимошенко  
(Новосибирск)*

Исследования процессов, связанных с развитием факела при высоконапорном впрыске топлива в рабочий объем, проведенные методами микрофотографирования с лазерной подсветкой и импульсного рентгенографирования [1, 2], показали, что существенную роль в его формировании играют нестационарные гидро- и газодинамические явления, сопровождающие этот процесс. Нестационарность эта выражается в том, что в течение первых 300—500 мкс с начала впрыска идет формирование струи и стабилизируется кумулятивный механизм ее взаимодействия со средой, а в течение всего остального времени внутри тела факела непрерывно возникают разномасштабные неоднородности. Мелкомасштабные, очевидно, мало влияют на общий характер продвижения струи топливо-воздушной смеси, в то время как крупномасштабные, задаваемые как характером изменения давления в топливной системе, так и нарушениями устойчивости потока [2], несомненно определяют динамику развития топливного факела. С другой стороны, на течение топливо-воздушной струи влияет и состояние среды, в которую осуществляется впрыск, и, в частности, давление в рабочем объеме.

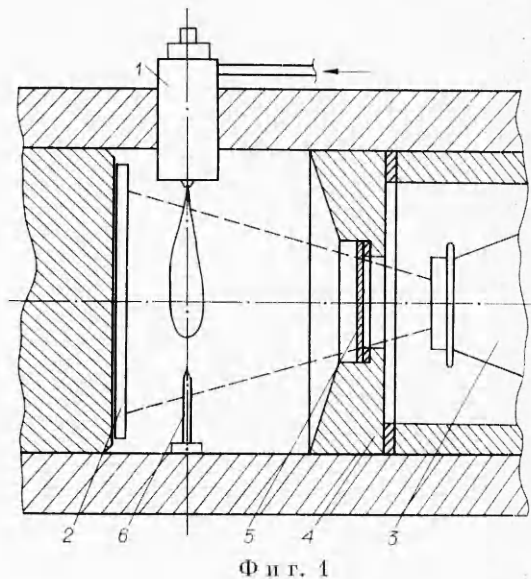
С помощью оптических методов изучение внутренней структуры топливного факела затруднено, так как он представляет собой образование, заполненное большим количеством мелких капелек жидкости, и оптически непрозрачен. Поэтому в настоящих экспериментах был использован рентгеноимпульсный метод по методике [2].

В данной работе представлены результаты качественного изучения особенностей развития топливного факела при впрыске жидкости в среду с избыточным давлением до 10 атм.

Эксперименты проводились на установке, общее описание которой представлено в [2]. Впрыск в рабочий объем смеси дизельного топлива и рентгеноконтрастных присадок (иодистого этила и иодистого бутила в пропорции 1 : 1 : 1) осуществлялся с помощью стандартной дизельной форсунки закрытого типа 1, оснащенной однодырчатым распылителем с диаметром сопла 0,35 мм (фиг. 1). При этом эпюра давления в топливной системе носила стандартный характер — нарастание давления до 800—900 атм в течение 4 мс и спад в течение 2 мс.

Рабочий объем представлял собой толстостенный цилиндр с внутренним диаметром 150 мм, закрытый с торцов крышками, расстояние между которыми около 50 мм. В связи с тем что установка любого вида крышек для герметизации рабочего объема приводит к такому поглощению рентгеновского излучения, что проведение экспериментов оказывается невозможным, было выбрано следующее методическое решение. Фотопленка в кассете 2, изготовленной из светонепроницаемой бумаги и защищенной

от брызг и паров жидкости лавсановой пленкой толщиной 5 мкм, помещалась непосредственно внутри рабочего объема и для смены пленки объем в каждом опыте разгерметизировался. Перед рентгеновской трубкой 3 была установлена заглушка 4 с бериллиевой мембраной 5 толщиной 1,5 мм, которая выдерживала нагрузку, соответствующую перепаду давлений до 40 атм. Указанные элементы в рабочем объеме были размещены таким образом, что расстояние между плоскостью фотопленки и осью форсунки составляло 20 мм, а между осью форсунки и фокальным пятном рентгеновской трубки—110 мм. Наличие защитной бериллиевой мембраны сузило апертуру, и максимальный угол, под которым могло наблюдаться изображение факела, составлял около  $35^\circ$ . Поэтому на фотопленку проектировался только центральный участок рабочего объема диаметром 80 мм, на краях которого параллакс незначителен. Расстояние от среза сопла форсунки до центра кадра 55 мм.

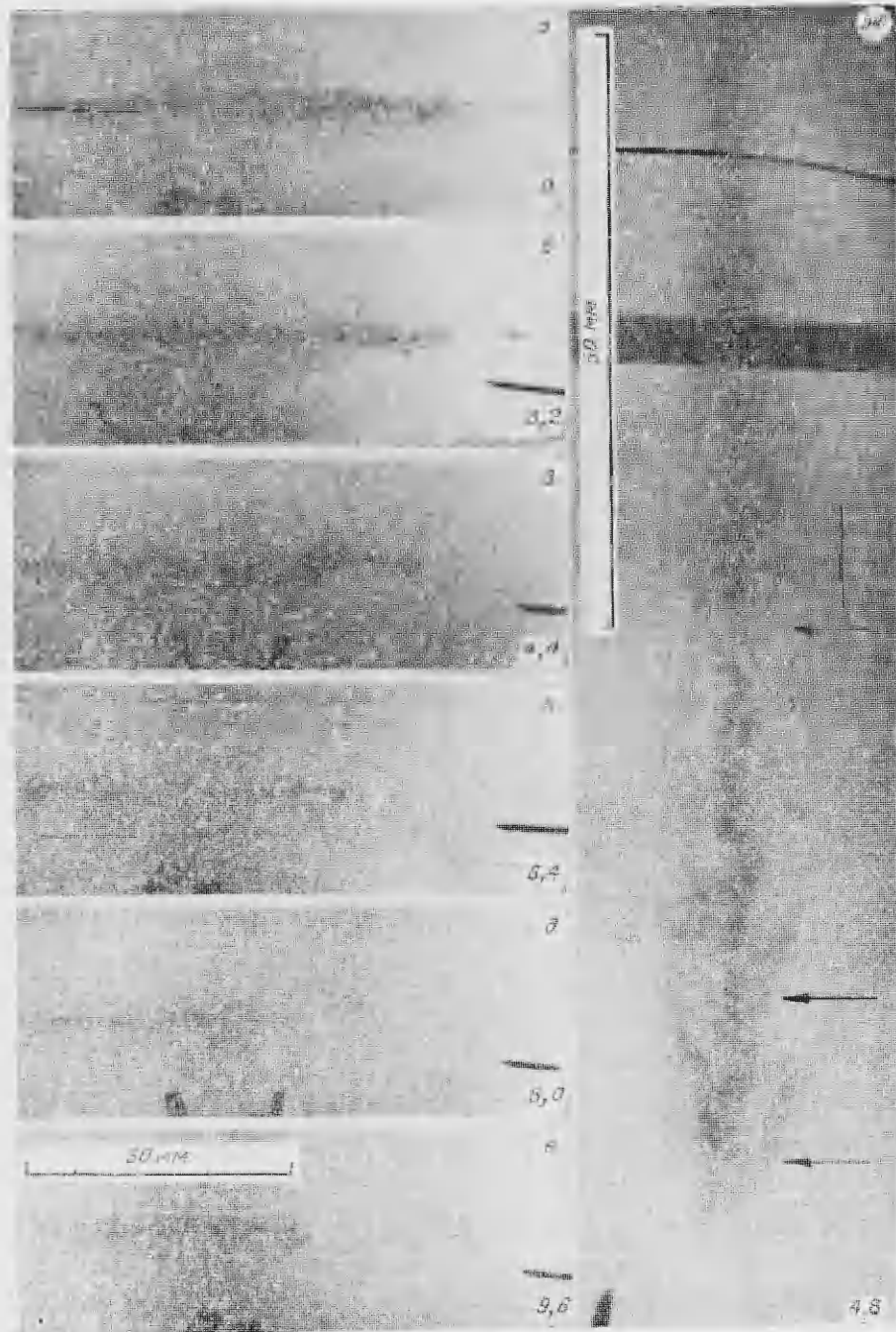


На фиг. 2 приведена серия репродукций с рентгенограмм, снятых при различных давлениях в рабочем объеме через 1,75 мс с начала нарастания давления в топливной системе. Избыточное давление в рабочем объеме на фотографиях отмечено цифрами. На репродукциях рентгенограмм видна реперная игла 6 (фиг. 1), кончик которой расположен на расстоянии 24 мм от центра кадра. На фиг. 2, а (головная часть струи находится в нескольких миллиметрах за краем кадра) отчетливо видна обычная для впрыска в объем, заполненный воздухом под атмосферным давлением, структура. В правой части кадра в струе начинает формироваться сгусток топливо-воздушной смеси, а вся срединная часть струи представляет собой поток, состоящий из равномерно рассеянных по нему мелких (масштаб  $\sim 1$  мм) неоднородностей.

При относительно небольшом повышении давления (фиг. 2, б, в) равномерная структура потока в струе нарушается и даже в тех ее участках, где не идет образование крупномасштабных неоднородностей, формируются расположенные близко друг к другу уплотнения, приобретающие специфический вид. Эти уплотнения имеют конусообразную форму с вершиной, направленной в сторону распространения факела, и с повышенной плотностью топливного компонента в головной части. К образованию такого конусообразного сгустка концентрация жидкости падает.

Интересным является эффект взаимодействия этих образований между собой. Так как каждый последующий сгусток продвигается в относительно плотном следе, оставленном предыдущим за счет распыления жидкости, часто наблюдаются случаи «планирования» очередного сгустка и уход его в сторону. Это приводит к появлению многоголовного факела (фиг. 2, в, д).

Особенный интерес представляет наблюдающееся иногда образование отсоединенной волны-предвестника, подготавливающей траекторию движения сгустка. Например, на фиг. 2, ж (отмечено стрелками) отчетливо видно, как идущий перед сгустком сигнал освобождает от топливо-воз-



Ф и г. 2

душной смеси плейф, оставшийся после прохода предыдущего участка хруп. Об этой волне нельзя говорить как о классической ударной, сопровождающей распространение тела в среде со сверхзвуковой скоростью, хотя в работах [3, 4] и говорится о возможности образования низкоскоростных ударных волн в теле факела как в полидисперсной среде. Известно [5—7], что газодинамические разрывы в многофазных системах обла-

дают большой дисперсией и ударная волна, будучи каким-либо образом сформирована в них, перестраивается в волну сжатия.

Естественно, что образование таких волн наблюдается и при пульсации сгустков смеси, которая возникает в результате схлопывания отдельных элементов струи, обладающих определенной инерционностью (наличие диспергированной жидкой фазы) и упругостью (насыщенность смеси воздухом и парами жидкости). Образование таких волн в теле факела с интенсивностью, достаточной для перестроения структуры топливо-воздушного потока, как представляется, является важным фактором, влияющим на весь процесс формирования заряда.

Многочисленные наблюдения показывают, что при впрыске в среду с избыточным давлением свыше 3 атм образование конусообразных часто расположенных сгустков, а следовательно, и волн сжатия является закономерным. Однако повышение общей плотности среды приводит к снижению скорости продвижения как факела в целом, так и отдельных образований в его теле. Это, например, хорошо видно из фиг. 2, где все рентгенограммы выполнены в один и тот же момент времени, и поэтому с повышением давления в объеме факел оказывается все более коротким. Снижение скорости движения элементов струи ведет к тому, что сгустки располагаются более часто, а угол конусности в их шлейфовой части увеличивается. Поэтому факел становится с увеличением давления в среде все более широким и оснащается по бокам образованиями, являющимися заготовками так называемой «елочки» [4]. Кроме того, в большой степени в этих условиях проявляется тенденция к «соскальзыванию» отдельных уплотнений с оси факела и к еще большему уширению его головной части. При избыточных давлениях в среде до 10 атм факел все еще пересекает рабочий объем достаточно быстро и не записывает в нем, но внутренняя структура факела оказывается более сложной, чем при впрыске без противодействия, и топливный компонент оказывается распределенным в нем крайне неоднородно не только в продольном, но и в поперечном сечении. Существенным здесь является образование близко расположенных сгустков топливо-воздушной смеси, имеющих конусообразную форму, благодаря чему тело факела приобретает чешуйчатую или волокнистую структуру с непрерывным ее перестроением. Особенно четко эта структура просматривается на более поздних стадиях развития факела и при более высоких давлениях в среде.

Приведенные выше результаты наблюдений поднимают вопрос о причинах разного характера развития неоднородностей при впрыске в среду с разным избыточным давлением. Если при впрыске в воздух под атмосферным давлением сгустки топливо-воздушной смеси начинают образовываться на расстоянии 40—60 мм от среза сопла форсунки и их появление не коррелируется с пульсациями давления в топливной системе, то образование конусообразных близко следующих друг за другом уплотнений в теле факела, развивающегося в среде с повышенным давлением, носит другую природу. Как следует из результатов исследования [2], образование неоднородностей в струе, продвигающейся в среде без противодействия и имеющей положительный продольный градиент скорости, является следствием развития гидродинамической неустойчивости такого потока, что приводит к появлению своеобразной продольной порционности струи. В этом случае возмущения, развивающиеся вблизи сопла форсунки, не развиваются в более крупные, так как скорость распространения волн сжатия в струе, переносящих информацию о возможности концентрации компонента в том или ином сечении струи, оказывается меньше скорости относительного движения ее элементов. Кроме того, в этих условиях струя оказывается узкой и должно наблюдаться значительное рассеивание сигнала в стороны от оси струи. При повышении же избыточного давления в объеме до 3—5 атм скорость продвижения головной

части струи уменьшается в 2—3 раза, что, по-видимому, оказывается достаточным для того, чтобы вдоль струи появилась возможность распространения сигналов и взаимодействия отдельных ее элементов между собой. Поэтому весь топливный факел в этом случае начинает представлять собой единую систему, вдоль которой устанавливается взаимосвязь элементов, и он приобретает свойство продольной упругости. При впрыске же в среду с противодавлением до 2 атм отдельные секции струи, рассеченные неоднородностями, практически не взаимодействуют между собой и каждый последующий участок струи не оказывает влияния на продвижение предыдущего. Поэтому динамика движения головной части струи не связана с поведением остальных, а следовательно, и с характером изменения давления в топливной системе, за исключением самой начальной стадии процесса.

При более высоких давлениях в среде (7—10 атм и более) передача информации вдоль струи становится надежной и на продвижение головной части струи начинают оперативно влиять тыловые. В этом смысле и использован термин «свойство продольной упругости». Следует заметить также, что при давлениях в среде свыше 5—7 атм развитие крупномасштабных неоднородностей, разбивающих струю на секции, не наблюдается.

Поступила 14 I 1980

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Баев В. К., Бажайкин А. И. и др. Начальная стадия развития топливного факела, выброшенного из форсунки под большим давлением.— ФГВ, 1979, № 1.
2. Баев В. К., Бажайкин А. И. и др. Рентгеноимпульсный метод изучения внутренней структуры топливного факела.— ПМТФ, 1980, № 1.
3. Трусов В. И., Иванов Л. Л. Некоторые предпосылки к формированию физической модели распыленной струи при впрыске топлива в дизеле.— В кн.: Двигатели внутреннего сгорания. Вып. 2. Ярославль, изд. Яросл. политехн. ин-та, 1975.
4. Трусов В. И., Иванов Л. Л. Расчетно-экспериментальное исследование некоторых параметров сред, образующихся при распылении топлива в дизелях.— В кн.: Топливная аппаратура дизелей. Вып. 3. Ярославль, изд. Яросл. политехн. ин-та, 1975.
5. Кузнецов В. В., Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р. Жидкость с пузырьками газа как пример среды Кортвега—де Вриза—Бюргерса.— Письма в ЖЭТФ, 1976, т. 23, № 4.
6. De Krasinski J. S., Khosla A., Ramesh V. Dispersion of shock waves in liquid foams of high dryness fraction.— Arch. mech. stosow., 1978, t. 30, z. 4—5.
7. Pierce T. H. Blast wave propagation in a spray.— J. Fluid Mech., 1978, vol. 88, pt 4.

УДК 536.24

### ЛОКАЛИЗОВАННАЯ ТЕПЛОВАЯ СТРУКТУРА В СРЕДЕ С ОБЪЕМНЫМ ПОГЛОЩЕНИЕМ ТЕПЛА

*Л. К. Мартинсон*

(Москва)

Исследования нелинейных процессов диффузионного типа [1—6] обнаружили ряд качественно новых особенностей характера протекания таких процессов по сравнению с линейными процессами.

В частности, в процессах теплопроводности нелинейность может обуславливать такое необычное свойство, как свойство инерции тепла. В широком смысле свойство тепловой инерции означает конечную скорость распространения тепловых возмущений, когда возмущения распространяются в нелинейной среде в виде тепловых волн с конечной скоростью перемещения фронта.