

Однако при измерении двойным зондом эти величины отличаются не более чем в 2—3 раза (кривые 1' и 2'). Такое же соотношение дают и измерения, выполненные при помощи одиночного зонда, но при наличии на нем отрицательного потенциала (см. рис. 6, темные точки и треугольники).

Здесь уместно отметить, что методически эти результаты аналогичны полученным в работе [13] при измерении электронной температуры. Вероятно, имеется одна общая причина, которая приводит к различным результатам измерений при помощи одиночного и двойного зондов,— при больших электронных токах на зонд трудно обеспечить эффективное заземление пламени. Это особенно существенно при измерениях в ламинарной зоне горения, поскольку толщина охлажденного пограничного слоя у опорного электрода, пропорциональная  $\frac{1}{\sqrt{Re}}$ , в этом случае значительно превышает ее значение в турбулентном пламени. Поэтому обнаруживаемое при помощи метода одиночного зонда многократное увеличение скорости ионообразования при турбулизации пламени углеводородов нельзя считать достаточно обоснованным.

Поступила в редакцию  
3/1 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. Peeters et. al. Oxidation and Combustion Reviews. Elsevier, 1969, 4, 1.
2. Е. С. Семенов, А. С. Соколик. ЖТФ, 1962, 32, 9.
3. William J. Miller. Oxidation and Combustion Reviews, Elsevier, 1968, 3, 2.
4. H. F. Calcote, I. R. King. 5-th Symposium International on Combustion. N. Y., 1955, 423.
5. Ф. А. Вильямс. Теория горения. М., «Наука», 1971.
6. Е. Хомяк, Ю. Ярославский. ФГВ, 1970, 6, 3.
7. R. M. Clements, P. R. Smy. Brit. J. Appl. Phys. (J. Phys. D), 1964, 2, 12.
8. Р. Халдстоун, С. Ленард. Диагностика плазмы. М., «Мир», 1967.
9. P. W. Carlson et. al. Physica, 1964, 30, 182.
10. D. Lyddon Thomas. Phys. Fluids, 1960, 12, 2.
11. В. И. Твердохлебов. Докт. дисс., ИХФ АН СССР, 1969.
12. А. С. Соколик, Е. С. Семенов. ЖФХ, 1964, 7.
13. Harry Silla, Thomas J. Dougherty. Combustion and Flame, 1972, 14, 1.

УДК 536.46

### О СУЩЕСТВОВАНИИ МИНИМАЛЬНОГО ДРОБЛЕНИЯ КАПЕЛЬ В ПОТОКЕ ГАЗОВОГО ОКИСЛИТЕЛЯ, НЕОБХОДИМОГО ДЛЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ

А. Вежба

(Варшава)

Возникновение детонационного горения двухфазных смесей за фронтом ударной волны было впервые описано в [1]. Затем в работе [2] было установлено, что скорость испарения капель топлива, необходимая для поддержания и усиления ударной волны, требует, чтобы величина поверхности топлива на порядок и больше превышала первоначальную в данных опытах. Это наблюдение привело к выводу, что за фронтом ударной волны имеет место механическое дробление капель, приводящее к сильному росту суммарной поверхности топлива. Основ-

ная трудность в однозначной интерпретации результатов этой работы обусловлена впрыскиванием топлива в ударную трубу при помощи форсунок, что приводило к существованию довольно большого количества мелких капелек топлива еще до начала характерного дробления капель за фронтом ударной волны.

Основательные исследования детонационного горения двухфазных систем, в которых применялись довольно крупные однородные капли топлива ( $d_0 = 300 \div 2600$  мк), были проведены в работах [3—5]. Было установлено, что индукционный период детонации находится в хорошем соответствии с периодом дробления капель. Одним из основных результатов этих работ было утверждение, что главным фактором, контролирующим развитие детонационного горения в двухфазной смеси, является дробление капель топлива в газовом потоке за фронтом ударной волны. Эта гипотеза была затем проверена в работе [6], в которой было получено хорошее совпадение периода образования волны сжатия с временем дробления капель, определяемым из соотношения  $\tau = \frac{2d}{u} \sqrt{\rho_{ж}/\rho}$ .

В связи с отмеченной ролью дробления капель в ряде работ исследован механизм дробления и зажигания капель топлива за фронтом ударной волны в условиях, подобных существующим при возникновении детонационного горения [7—10]. Эти исследования были продолжением большого количества ранее проведенных работ над дроблением капель и струй жидкости в газовом потоке, например [11, 12]. В работах [8—10] довольно подробно изучен механизм дробления и зажигания одиночных капель в окислительной среде за фронтом ударной волны. Определенное в [8] время задержки воспламенения капель составляло 0,7 времени их дробления для первоначального диаметра капель  $d_0 = 1,52$  мм и 0,8 времени дробления при  $d_0 = 0,932$  мм. Момент зажигания определялся при этом по возникновению в горячей среде волн сжатия, а время дробления капель определялось по ускорению капли до 0,6 скорости газового потока за ударной волной.

Несмотря на полученную в указанных выше работах связь между периодом образования волны сжатия и временем дробления капель в газовом потоке, необходимо отметить, что дробление не является единственным процессом, контролирующим возникновение детонационного горения. Несомненно существенную роль играют также испарение мелких капелек, слетающих в процессе дробления с поверхности исходной капли (особенно в условиях большой концентрации этих капелек), испарение исходной капли и процессы диффузии и химической кинетики. В связи с этим возникает обоснованный вопрос, какая должна быть степень дробления капли, необходимая для возникновения детонационного горения всей массы топлива данной капли.

### Методика эксперимента

Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Ее основной частью является горизонтально расположенная ударная труба с камерой низкого давления прямоугольного сечения. На верхней боковой стенке камеры вблизи отражающей торцевой стенки находился генератор капель, создающий вертикальный ряд однородных капель топлива, свободно падающих в расположенный с противоположной стороны уловитель. Камера низкого давления оснащена тремя пьезоэлектрическими датчиками давления. Первый и второй датчик расположены на боковой стенке камеры низкого давления соответственно на расстоянии 0,677 м от генератора капель. Третий датчик установлен в торцевой стенке. Схема опытной установки и метод проведения опытов более подробно описаны в [13, 14]. Опыты проводились с использова-

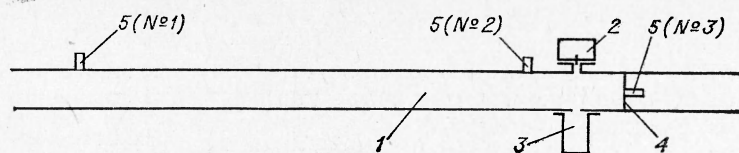


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — камера низкого давления ударной трубы; 2 — генератор капель; 3 — уловитель капель; 4 — торцевая отражающая стенка; 5 — пьезоэлектрические датчики давления.

нием падающей и отраженной ударных волн. Падающая ударная волна приводила в движение газ, находящийся в камере низкого давления, и предварительно повышала давление и температуру этого газа. Прохождение этой ударной волны через каплю было началом ее обтекания газовым потоком. Необходимо отметить, что сам по себе процесс перехода ударной волны через каплю не вызывал ее дробления или деформации. Отраженная ударная волна приводила газ в состояние покоя, приостанавливая, таким образом, механическое дробление капель, и одновременно увеличивала его давление и температуру до величины, необходимой для самовоспламенения горячей смеси. Таким образом, период времени между прохождением падающей и отраженной ударных волн через каплю был временем ее обтекания газовым потоком. При прочих неизменных условиях опытов масса топлива, снимаемая в виде мелких капелек с поверхности исходной капли (степень дробления капли), пропорциональна времени ее обтекания газовым потоком. Время в данных опытах варьировалось путем изменения расстояния  $L$  между каплями и отражающей торцевой стенкой камеры низкого давления, которое изменялось скачкообразно интервалами по 1,6 мм.

Опыты проводились в кислороде при довольно больших числах Рейнольдса и Вебера ( $Re_2 = 5,7 \cdot 10^4 \div 8,6 \cdot 10^4$ ;  $We_2 = 3,0 \cdot 10^4 \div 4,9 \cdot 10^4$ ). Это означает, что дробление капель происходило по механизму сдирания поверхностного слоя. В качестве топлива был выбран диэтилциклогексан, так как с этим топливом проведено большинство известных работ по детонационному горению двухфазных систем, а его свойства очень близки к свойствам керосина, также широко применяемого в этих работах. Первоначальный диаметр капель топлива  $d_0 = 1,48$  мм. Опыты проводились при числах Маха проходящей ударной волны  $M_s = 2,1$ ; 2,25; 2,42 и 2,65, чему соответствовало изменение температуры газа за отраженной ударной волной в пределах от 800 ( $M_s = 2,1$ ) до 1150° К ( $M_s = 2,65$ ).

Из ранее проведенных опытов [8] следует, что минимальное значение  $M_s$ , необходимое для воспламенения капель диэтилциклогексана в кислороде за падающей ударной волной, равно 3,3. Это означает, что в описываемых опытах воспламенение капель было возможно только за отраженной ударной волной. С целью уменьшения влияния химической кинетики начальное давление в камере низкого давления подбиралось таким образом, что для всех чисел  $M_s$  давление газа за отраженной ударной волной было равно  $18,6 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>.

### Результаты опытов

В зависимости от степени дробления наблюдались два разных режима воспламенения и горения капель за отраженной ударной волной. Первый режим, имеющий место при достаточно большой степени дробления, представлен на рис. 2 в виде развертки, полученной шпирен-методом. Необходимо при этом отметить, что при съемке свет, вызванный горением капли, не пропускался на пленку. На рис. 3 представлены



Рис. 2. Развертка процесса воспламенения и горения капли топлива за отраженной ударной волной.  
 $M_s = 2,65$ ;  $L = 4,8$  мм.

1 — волна сжатия; 2 — отраженная ударная волна; 3 — падающая ударная волна; 4 — отметка на смотровом окне; 5 — капля; 6 — отражающая торцевая стенка камеры низкого давления.

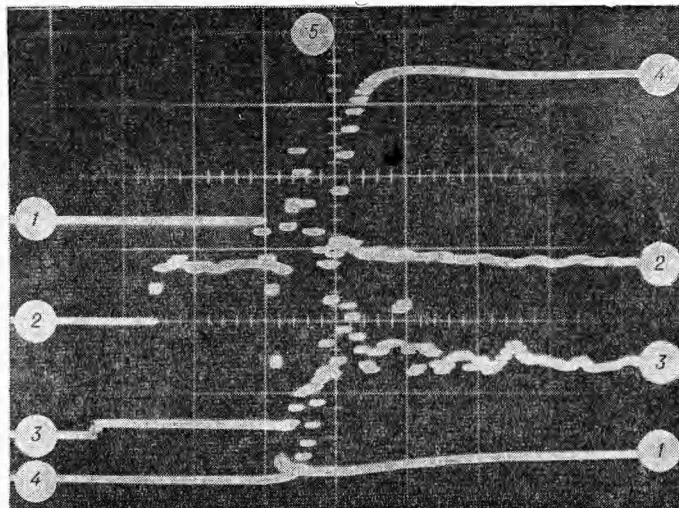


Рис. 3. Осциллограммы давлений и свечения при воспламенении и горении капле топлива за отраженной ударной волной.

$M_s = 2,42$ ;  $L = 4,8$  мм; масштаб времени 100 мкс/дел.

1, 4 — записи свечения; 2 — давление, регистрируемое датчиком № 3; 3 — давление, регистрируемое датчиком № 2; 5 — волна сжатия.

осциллограммы давлений, полученные от датчиков № 2 и 3, и осциллограммы свечения для этого процесса. Первая стадия — за падающей ударной волной — аналогична начальной стадии воспламенения капле за падающей ударной волной. Главной особенностью этого процесса является сдирание с поверхности капли, принимающей при этом вид эллипсоида с большой осью, перпендикулярной направлению потока, маленьких капелек, которые, ускоряясь газовым потоком, быстрее, чем исходная капля, располагаются и испаряются в ее аэродинамическом следе. Этот процесс происходит непрерывно вплоть до момента воспламенения, которое наступает в аэродинамическом следе капли и сопровождается образованием волн сжатия.

В случае воспламенения капли за отраженной ударной волной описанный процесс приостанавливается в момент перехода этой волны через каплю. Начиная с этого момента решающую роль играют процессы испарения и диффузии частично раздробленной капли. При этом время испарения всей массы топлива исходной капли за отраженной ударной волной уменьшается при увеличении времени обтекания капли газовым потоком за падающей ударной волной. Как видно из рис. 2 и 3, воспламенение и горение капле за отраженной ударной волной сопровождается образованием сильной волны сжатия, которая способствует окончательному дроблению оставшейся части исходной капли и быстрому завершению процесса горения. Прирост давления в этих волнах сжатия, как правило, выше суммарного прироста давления за отраженной ударной волной (см. рис. 3). Точнее говоря, получается система волн сжатия, в которой первая волна самая мощная.

Второй режим воспламенения и горения капле связан с относительно небольшой степенью дробления капле в газовом потоке за падающей ударной волной. В этом случае картина процесса за отраженной ударной волной несколько другая. Пример развертки такого процесса, полученной шпирен-методом, представлен на рис. 4. Как видно из этого рисунка, после некоторого времени задержки образуется промежуточная волна сжатия, которая не завершает процесса, как было видно на рис. 2. Это, по-видимому, означает, что количество горючей

(взрывчатой) смеси, образовавшейся из исходной капли до этого момента (или же количество энергии, выделившейся при ее горении), недостаточно для быстрого завершения горения всей массы топлива исходной капли. Из рис. 4 видно, что в отличие от ранее описанного этот процесс многоступенчатый и после промежуточной волны сжатия испарение и диффузия исходной капли продолжается до следующего взрыва. При таком режиме воспламенения и горения капли в зависимости от условий проведения опыта образуются одна или больше промежуточных волн сжатия, а спустя некоторое время — мощная волна сжатия, завершающая процесс. На рис. 5 дана осциллограмма давлений и свечения второго режима воспламенения и горения каплей. Масштаб давлений в этом случае вдвое больше, чем на рис. 3. Промежуточная волна сжатия гораздо слабее завершающей. Свечение газа в области горения нарастает с заметным опозданием по отношению к промежуточной волне сжатия. В случае  $L=1,6$  мм (времена обтекания каплей газовым потоком составляют 6,1 мкс при  $M_s=2,65$  и 7 мкс при  $M_s=2,1$ ) при всех числах Маха наблюдался второй режим воспламенения и горения каплей. Это означает, что степень дробления каплей была недостаточной для развития и быстрого завершения детонационного горения всей массы топлива данной капли. При  $L=3,2$  мм, когда время обтекания каплей газовым потоком примерно вдвое больше, чем в первом случае, при  $M_s=2,1$  и  $M_s=2,25$  наблюдается второй режим а при  $M_s=2,42$  и  $M_s=2,65$  — первый режим воспламенения и горения каплей. При  $L \geq 4,8$  мм для всех значений  $M_s$  имел место первый режим воспламенения и горения каплей.

Из приведенных результатов следует, что существует минимальная степень дробления каплей топлива в потоке газового окислителя, необходимая для возникновения детонационного горения всей массы топлива исходной капли, зависящая в данных условиях проведения экспериментов от числа Маха падающей ударной волны. Теневые снимки степени дробления каплей, полученные для указанных величин  $L$  при  $M_s=2,1$ , представлены на рис. 6, б, в, г. Все снимки были сделаны в момент набегания на частично раздробленную каплю отраженной ударной волны, которая видна с правой стороны аэродинамического следа ка-

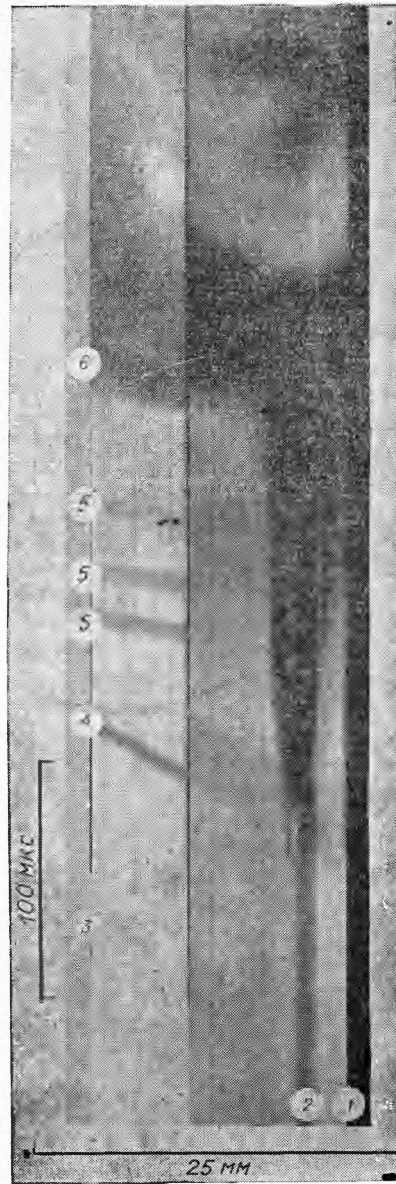


Рис. 4. Развертка процесса воспламенения и горения капли топлива за отраженной ударной волной.  $M_s=2,25$ ;  $L=3,2$  мм;

1 — торцевая отражающая стенка; 2 — капля; 3 — падающая ударная волна; 4 — отраженная ударная волна; 5 — промежуточные волны сжатия; 6 — волна сжатия.

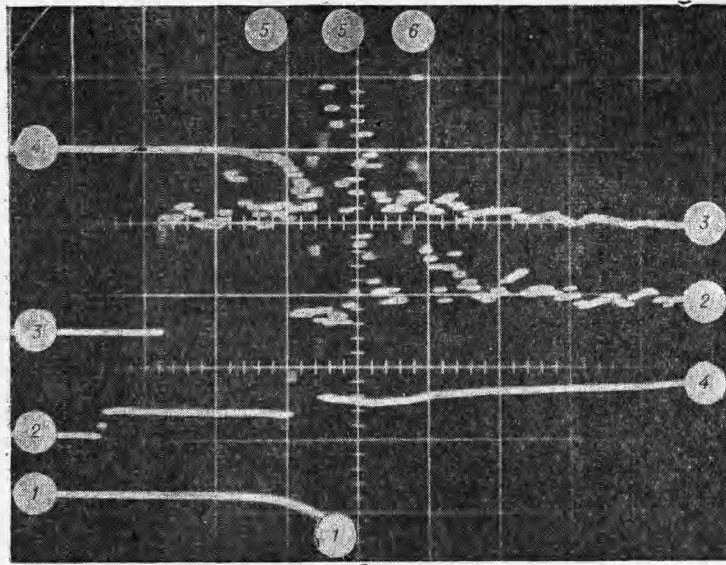


Рис. 5. Осциллограммы давлений и свечения при воспламенении и горении каплей топлива за отраженной ударной волной.  
 $M_s = 2,42$ ;  $L = 1,6$  мм; масштаб времени 100 мкс/дел.

1, 4 — записи свечения; 2 — давление, регистрируемое датчиком № 2; 3 — давление, регистрируемое датчиком № 3; 5 — предварительная волна сжатия; 6 — волна сжатия.

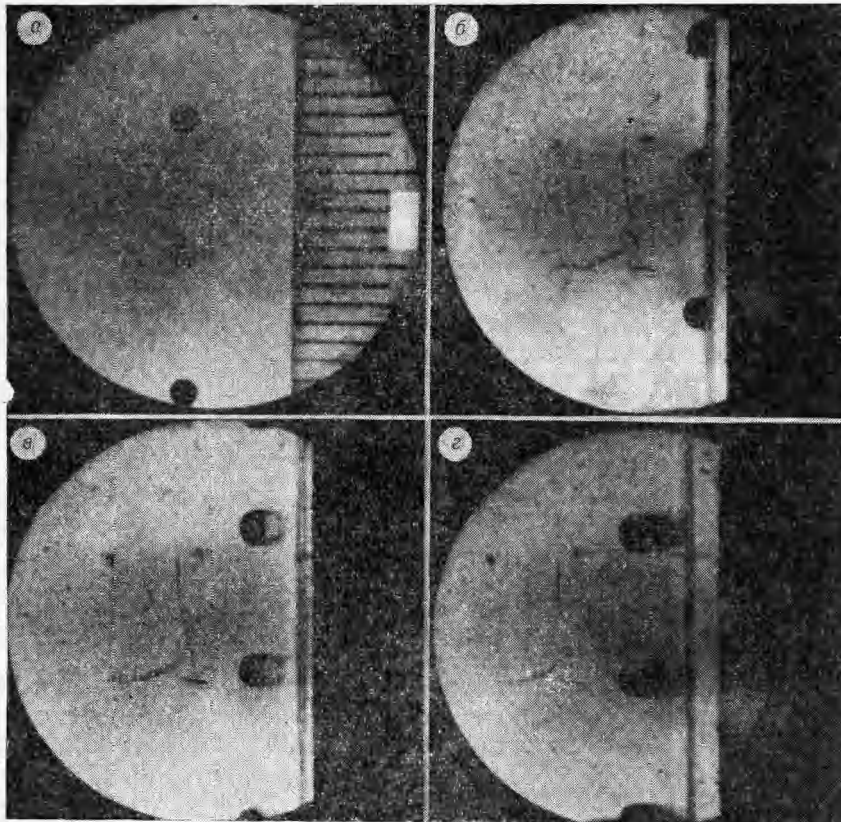
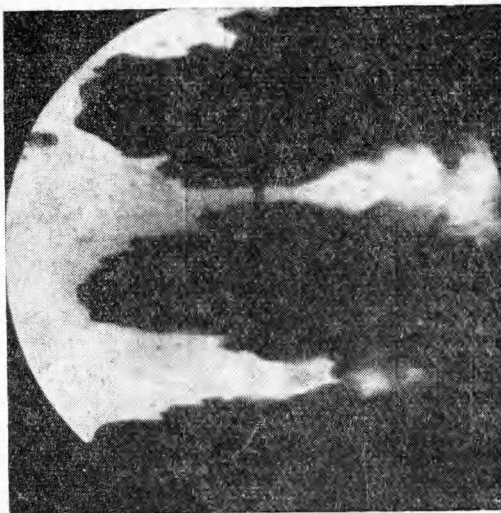


Рис. 6. Теневые снимки исходной и частично раздробленных капель топлива

а) исходная капля; б)  $L = 1,6$  мм; в)  $L = 3,2$  мм; г)  $L = 4,8$  мм.

пель и перемещается справа налево. В заключении необходимо подчеркнуть, что время обтекания капли газовым потоком, в течение которого дробление капли достигает степени, достаточной для возникновения детонационного горения всей массы топлива исходной капли, существенно меньше времени дробления капля  $\tau$ . Из соотношения  $\tau = \frac{2d}{u} \sqrt{\rho_{ж}/\rho}$  следует, что в случае  $M_s = 2,1$   $\tau = 98$  мкс. Как видно из рис. 7, исходная капля превращается за это время в облако аэровзвеси.



Поступила в редакцию  
6/II 1974

Рис. 7. Теневой снимок капли при  $\tau \approx 100$  мкс.  
 $M_s = 2,1$ ;  $d_0 = 1,48$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. W. T. Weber. Eighth International Symposium on Combustion, 1962.
2. F. B. Cramer. Ninth International Symposium on Combustion, 1963.
3. E. K. Dabora, K. A. Ragland, J. A. Nicholls. *Astronautica Acta*, 1966, 12, 9.
4. K. W. Ragland, E. K. Dabora, J. A. Nicholls. *Physics of Fluids*, 1968, 11, 2377.
5. E. K. Dabora, K. A. Ragland, J. A. Nicholls. Twelfth International Symposium on Combustion, 1969.
6. А. А. Борисов, Б. Е. Гельфанд и др. Докл. АН СССР, 1970, 190, 3.
7. A. A. Ranger, J. A. Nicholls. *AIAA J.*, 1969, 7, 2.
8. C. W. Kauffman, J. A. Nicholls. *AIAA J.*, 1971, 9, 5.
9. C. W. Kauffman, J. A. Nicholls, K. A. Olzmann. *Combustion Science and Technology*, 1971, 3.
10. S. Wójcicki. *Archiwum Procesow Spalania*, 1970, 1, 2.
11. O. G. Engel. *J. of Res. Nat. Bur. Standards*, 1958, 60, 3.
12. А. А. Бузуков. ПМТФ, 1963, 2.
13. A. Wierzba, S. Wójcicki. *Archiwum Procesow Spalania*, 1972, 3, 4.
14. A. Wierzba. *Analiza procesu samozapłonu kropek ciekłego paliwa za odbitą falą uderzeniową*. Praca doktorska, Politechnika Warszawska, 1973.

УДК 536.46 : 533.6

### ТЕПЛОТДАЧА ИЗЛУЧЕНИЕМ ОТ ДИФфуЗИОННОГО ФАКЕЛА ВОДОРОДА ПРИ $M=1$

М. Г. Кталхерман, И. А. Могильный, Я. И. Харитоновна,  
В. С. Холявин, В. А. Ясаков

(Новосибирск)

Методы расчета интенсивности излучения селективного излучающего газа в неоднородной среде сложны и недостаточно надежны [1, 2]. В том случае, когда речь идет об излучении турбулентного факела, возникают дополнительные трудности, связанные с расчетом полей концентраций и температур. Эти поля можно определить весьма прибли-