

**О ЗАДЕРЖКАХ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ
ГОРЮЧИХ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

В. Л. Зимонт, Ю. М. Трушин

(Москва)

При решении ряда практических вопросов, связанных с процессами горения углеводородных горючих, возникает необходимость в определении времени задержки воспламенения (времени индукции) при известных параметрах горючей смеси (состав, температура и т. д.) при температурах 1000—2000° К и выше. Однако имеющиеся в литературе немногочисленные экспериментальные данные по замерам времени индукции при высоких температурах не позволяют удовлетворительно решить этот вопрос. Это вызвано тем, что имеющиеся экспериментальные данные относятся к различным углеводородам и получены при разных температурах, давлениях и концентрациях, что делает сопоставление этих экспериментальных данных затруднительным.

В настоящей статье приводятся экспериментальные данные по времени индукции газифицированных углеводородных горючих (керосина Т-1 и бензина Б-70) и пропана при температурах 900—1100° К, полученным методом впрыскивания горючего в поток подогретого воздуха, и показывается, что в одинаковых условиях эти три горючих имеют близкие времена индукции.

В предположении независимости в одинаковых условиях времени индукции от вида углеводородного горючего проводится сравнение полученных экспериментальных данных с результатами других авторов, полученными для различных углеводородов разными методами: путем впрыскивания в поток подогретого воздуха жидкого [1] или газообразного [2] горючего, путем воспламенения горючей смеси отраженной ударной волной в ударных трубах [3, 4] и при исследовании воспламенения в плоской детонационной волне [5]. При сравнении экспериментальных данных для всех углеводородных горючих принималась одинаковая зависимость времени индукции от концентраций углеводородов, кислорода, паров воды и углекислого газа и давления, соответствующая имеющимся экспериментальным данным.

После анализа результатов всех указанных экспериментов был сделан вывод, что полученные в них времена индукции, будучи пересчитанными к одинаковым концентрациям и давлению, хорошо согласуются между собой. На основании этого для времени индукции предлагается эмпирическая формула, удовлетворительно описывающая результаты всех рассматриваемых экспериментов в интервале температур 900—2400° К.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАДЕРЖКИ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ТОПЛИВ
В СКОРОСТНОМ ПОТОКЕ¹**

Схема установки показана на рис. 1. Воздух от компрессора проходил мерную шайбу 7 и поступал в электроподогреватель 10, снабженный терморегулятором 8 для поддержания постоянной температуры воздуха ($T=200^{\circ}\text{C}$). Далее воздух поступал в камеру сгорания 13 типа ВК-1, где за счет сжигания бензина температура повышалась до необ-

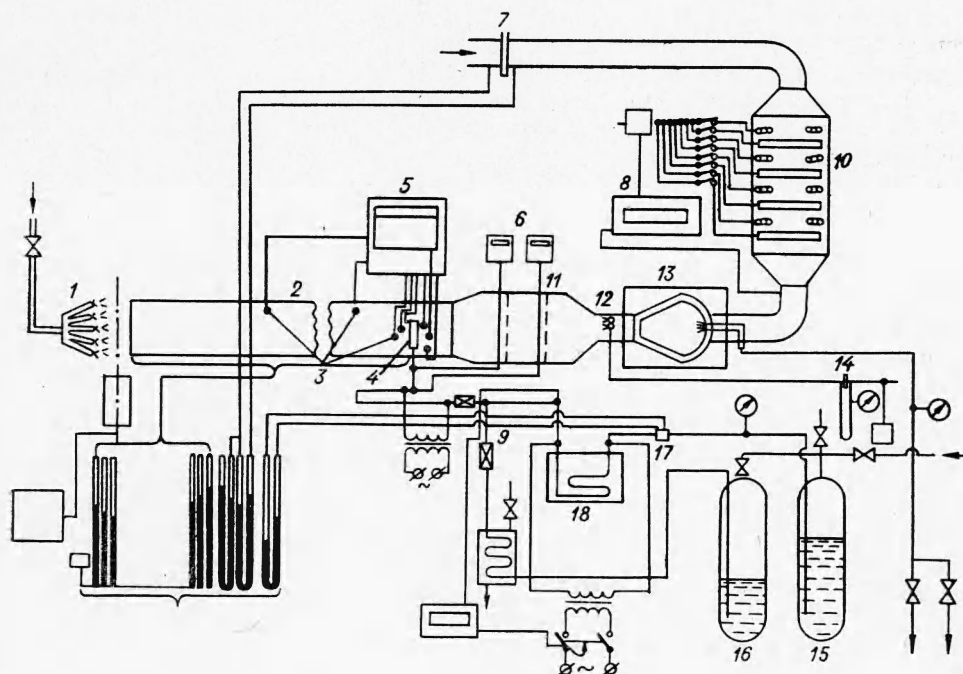


Рис. 1. Схема установки.

ходимой величины, но не более 1100°C . Коэффициент полноты сгорания был равен 0,97. Объемные концентрации углекислого газа и паров воды в нагретом воздухе примерно одинаковы и равны 0,017. За камерой сгорания располагалась форсунка 12 для подачи кислорода, расход которого контролировался мерной шайбой 14. После этого воздух попадал в ресивер 11, где были установлены две турбулизирующие решетки. Ресивер оканчивался соплом Виташинского, в конце которого располагался топливный коллектор 4, а перед коллектором и после него устанавливались хромель-алюмелевые термпары с головкой диаметром 0,3 мм. Коллектор представлял собой набор плоскопараллельных трубочек, расположенных друг от друга на расстоянии 6 мм, в которых в шахматном порядке с шагом 6 мм под углом к потоку в 30° расположено 400 отверстий диаметром 0,4 мм. Через этот коллектор подавалось испаренное топливо.

Система испарения топлива состояла из испарителя 18, нагреваемого электрическим током, и двух топливных баллонов: основного 15 и сливного 16. Из основного баллона топливо выдавливалось сжатым воздухом, проходило мерную шайбу 17 и попадало в испаритель 18.

¹ Эксперименты были проведены Ю. М. Трушиным в 1959 г.

Температура испаренного топлива поддерживалась постоянной с помощью терморегулятора, связанного с термопарой, стоящей на выходе испарителя. После испарителя была расположена система кранов 9, позволяющая перепускать топливо либо в камеру сгорания, либо через холодильник в сливной баллон.

За коллектором устанавливалась цилиндрическая камера сгорания 2. Фиксирование показаний термопар 3 производилось с помощью электронного печатающего потенциометра 5 ЭПП-09 и гальванометра 6, статические давления вдоль камеры сгорания измерялись с помощью батарейного манометра. На расстоянии 50 мм от среза цилиндрической камеры устанавливался коллектор центробежных форсунок 1, создающих плотную водяную завесу, гасящую пламя.

Параметры установки были следующие. Расход воздуха мог изменяться в пределах 0,15—0,6 кг/сек. Диаметр трубы, где устанавливался основной коллектор, был равен 100 мм, коэффициент загромождения сечения коллектором около 50%. Расход топлива менялся в пределах 3—30 г/сек, расход кислорода в пределах 0—40 г/сек.

Поскольку время смещения струй топлива с окислителем могло сказаться на определяемом времени индукции, были проведены расчеты, согласно которым поля средних по времени концентраций должны выравниваться уже на расстоянии 80—100 мм от коллектора, что подтверждается проведенными экспериментами.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Порядок проведения экспериментов был следующим. Предварительно испаренное топливо подавалось через коллектор в поток нагретого воздуха, имеющего температуру 650—750°С и заданную концентрацию кислорода. После этого температура потока повышалась до тех пор, пока между срезом трубы и водяным коллектором не происходила вспышка. Момент вспышки фиксировался либо визуально, либо с помощью фотоумножителя, при этом разницы в измерениях не наблюдалось. В момент вспышки фиксировались расходы воздуха, топлива, идущего в камеру сгорания подогревателя и основной коллектор, температуры топлива и воздуха, статическое давление в камере и расход кислорода. По полученным данным определялось время пребывания смеси в камере, равное периоду задержки воспламенения:

$$\tau = 0,84 \frac{L p F}{\sum GRT}, \quad (1)$$

где $\sum G$ — суммарный расход воздуха и топлива; T — температура смеси в момент вспышки; p — статическое давление; L — расстояние от топливного до водяного коллектора; F — площадь камеры; 0,84 — коэффициент, учитывающий уменьшение времени пребывания за счет турбулентного профиля скорости в камере, так как воспламенение происходило на оси потока.

Погрешность определения τ определялась точностью измерения величин, входящих в формулу (1). При измерении температуры ошибка достигала 10%. Ошибка в измерении расходов по дроссельным устройствам составляла 3%, суммарная ошибка измерения периода индукции достигала 15%. Максимальная ошибка измерения концентраций кислорода и топлива составляла 6%.

Эксперименты проводились с техническими топливами: бензином марки Б-70, керосином марки Т-1 и пропаном. На рис. 2 приведена зависимость логарифма периода задержки воспламенения от обратной температуры смеси керосина Т-1 с воздухом. Период задержки воспламенения изменялся от 0,05 до 0,002 сек, т. е. в 25 раз. Это достигалось путем изменения расхода воздуха от 0,15 до 0,6 кг/сек и изменения длины камеры от 0,6 до 4,2 м. При таком изменении периода индукции температура, при которой в опытах имело место воспламенение, менялась в пределах 200°. На рис. 2 нанесены результаты измерений, проведенных при различных концентрациях топлива, но при постоянной концентрации кислорода, равной приблизительно 0,17. Снижение концентрации кислорода относительно воздуха происходило за счет предварительного сжигания в нем бензина для получения необходимой температуры. Разброс в основном определялся точностью измерения температуры в момент вспышки. На том же графике приведены результаты измерений τ при впрыскивании жидкого топлива, значения которых оказались выше, чем для испаренного топлива, приближаясь к данным Маллинса [1]. Аналогичные данные были получены для испаренного бензина и для пропана.

Результаты для всех перечисленных топлив при одинаковой концентрации кислорода оказались близкими. Сравнение периода индукции при одинаковых концентрациях кислорода и разных концентрациях топлива правомерно, поскольку в экспериментах было обнаружено, что период индукции практически не зависит от концентрации горючего. Это можно видеть на рис. 3, где приведены температуры, при которых имело место воспламенение в зависимости от расхода топлива, концентрация которого менялась от 0,002 до 0,012, что соответствовало коэффициенту избытка воздуха $\alpha=0,7-4,7$. Одновременно можно видеть сильное влияние концентрации кислорода, которая менялась в данном случае всего от 0,13 до 0,3. Величины задержек воспламенения в экспериментах, приведенных на рис. 3, близки и равны примерно 0,02 сек.

В этом случае формулу для времени задержки воспламенения можно записать следующим образом:

$$\tau = f(C_0) e^{\frac{E}{RT}},$$

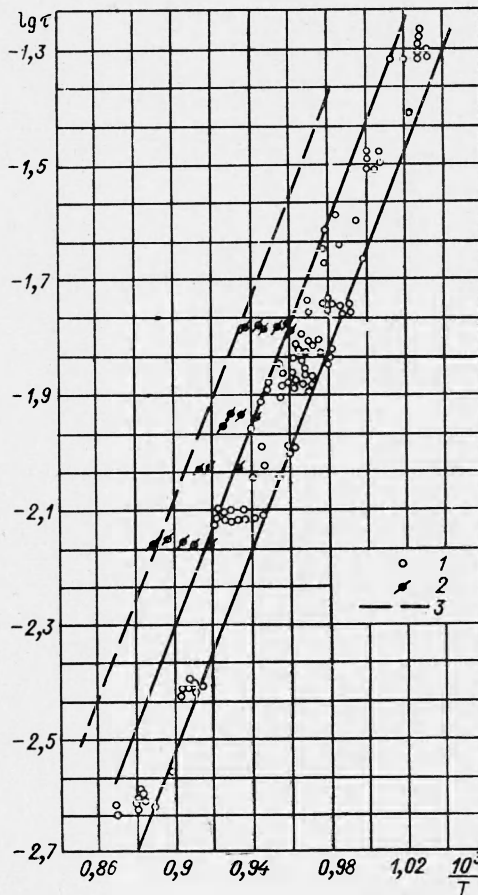


Рис. 2. Зависимость периода задержки воспламенения от температуры керосино-воздушной смеси.

1 — Т=1 — пар; 2 — Т=1 — жидкость; 3 — по Маллинсу.

где C_0 — объемная концентрация кислорода в горючей смеси. Данные рис. 3 соответствуют формуле

$$\tau = f(C_0) e^{\frac{20150}{T}} \quad (2)$$

Для нахождения зависимости времени задержки воспламенения от концентрации кислорода на рис. 4 нанесены значения $f(C_0)$, посчитан-

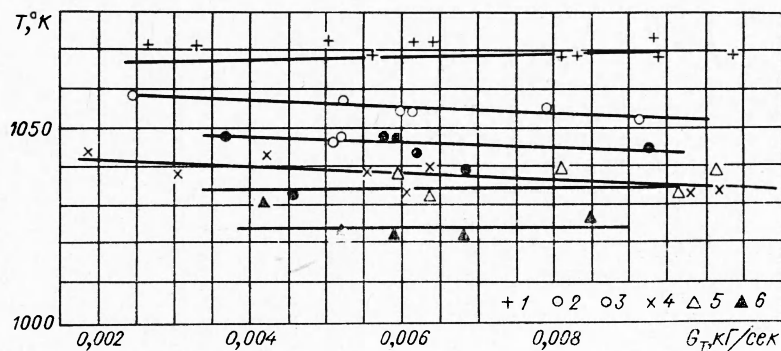


Рис. 3. Зависимость температуры воспламенения керосино-воздушной смеси от расхода керосина G_T при различных добавках кислорода.

(ΔG_{O_2}) кг/сек: 1 — 0; 2 — 0,0042; 3 — 0,013; 4 — 0,023; 5 — 0,026; 6 — 0,042).

Длина камеры 1,49 м, расход воздуха 0,165 кг/сек.

ные по формуле (2) при известных из эксперимента τ , C_0 и T . Приведенные на рис. 3 и 4 точки соответствуют одним и тем же экспериментам. Как видно из рис. 4, функция $f(C_0)$ хорошо аппроксимируется следующей формулой:

$$f(C_0) = \frac{6,2 \cdot 10^{-12}}{C_0^{1,3}} \quad (3)$$

изображенной на графике сплошной линией.

Полученная в экспериментах зависимость времени индукции от концентрации горючего и кислорода близка к данным работы [2] для городского газа, в которой время индукции не зависит от концентрации горючего и обратно пропорционально концентрации кислорода.

Итак, окончательная формула для времени задержки воспламенения керосино-воздушной смеси при атмосферном давлении в диапазоне температур 900—1100° К принимает вид

$$\tau [\text{сек}] = \frac{6,2 \cdot 10^{-12}}{C_0^{1,3}} e^{\frac{20150}{T}}$$

СОПОСТАВЛЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ С ДАННЫМИ ДРУГИХ АВТОРОВ

Тот факт, что задержки воспламенения для разных углеводородов (бензин, керосин, пропан) в одинаковых условиях оказались близкими, делает интересным сравнение полученных данных с результатами по времени индукции, имеющимися в литературе для различных углеводородов.

На рис. 5 приведены результаты разных авторов, построенные для соответствующих интервалов температур:

- a, б, в* — наши данные соответственно для бензина, пропана и керосина при атмосферном давлении и концентрации кислорода $C_0=0,17$;
- г* — данные Маллинса [1] для жидкого керосина;
- д* — данные Миллера [2], построенные по формуле

$$\tau [\text{сек}] = \frac{8.5a + 1}{C_0} 4,88 \cdot 10^{-16} e^{\frac{32100}{T}}$$

при $C_0=0,17$, $a=0$ (a — концентрация трехатомных молекул: углекислого газа и паров воды). Эта формула была получена при исследовании воспламенения при атмосферном давлении городского газа, подаваемого в поток горячего воздуха, в который добавлялись пары воды и азот;

e — данные Когарко и Борисова [3] по воспламенению смеси 2% C_7H_{16} — 98% воздуха, в ударной трубе за отраженной ударной волной, построенные по формуле

$$\tau = 19^{-9} e^{\frac{13900}{T}}$$

В этих экспериментах начальное давление смеси в трубе подбиралось

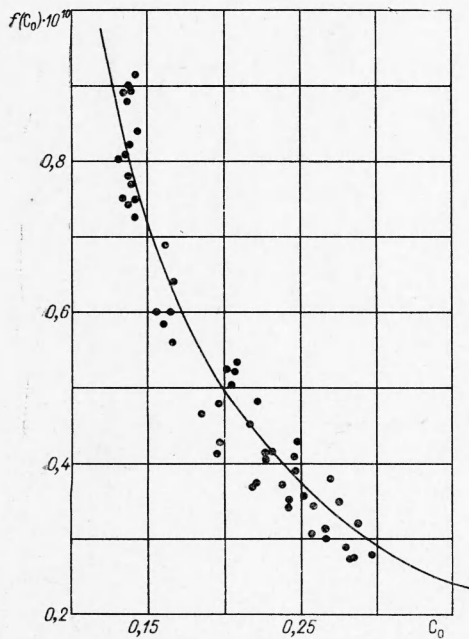


Рис. 4. График для нахождения зависимости времени индукции от концентрации кислорода.

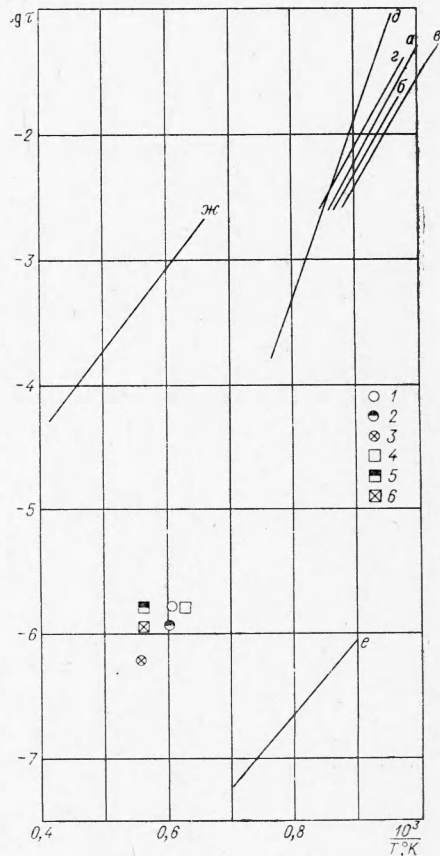


Рис. 5. Задержки воспламенения по данным разных авторов.

таким, чтобы за отраженной волной давление было постоянным и равным 55 бар;

\mathcal{J} — данные Борисова [4], построенные по формуле

$$\tau = 10^{-7} p^{-1,8} e^{\frac{15100}{T}} \quad (4)$$

при $p = 1$ бар. Формула (4) получена при обработке экспериментов, проведенных на ударной трубе для смеси 97% Ar+3% (1/12 C₇H₁₆+ $\frac{11}{12}$ O₂).

Значками обозначены данные Вагнера [5], полученные в плоской детонационной волне для смеси C₆H₁₄ и кислорода. Время индукции относится к следующим параметрам смеси:

- 1 — C₀ = 0,94, T = 1655° K, p = 3,6 бар;
- 2 — C₀ = 0,94, T = 1662° K, p = 5,4 бар;
- 3 — C₀ = 0,84, T = 1793° K, p = 5,9 бар;
- 4 — C₀ = 0,80, T = 1600° K, p = 5,2 бар;
- 5 — C₀ = 0,84, T = 1768° K, p = 2,9 бар;
- 6 — C₀ = 0,84, T = 1778° K, p = 3,9 бар.

Поскольку в работе [5] давления за ударной волной, при которых имели место замеренные задержки воспламенения, не указываются, они рассчитывались по формуле

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{p_2}{p_1} \frac{(\gamma + 1) + (\gamma - 1) \frac{p_2}{p_1}}{(\gamma - 1) + (\gamma + 1) \frac{p_2}{p_1}},$$

позволяющей по известному отношению температур найти отношение давлений в ударной волне [6]. Параметры с индексами 1 относятся к состоянию перед скачком, с индексом 2 — после скачка. В расчетах принималось, что $\gamma = 1,4$ и $T_1 = 300^\circ$ K.

Из рассмотрения рис. 5 видно несоответствие этих экспериментальных данных. Для одинаковых температур отличие времени индукции по разным экспериментам достигает трех порядков. С другой стороны, приводимые эксперименты относятся к различным концентрациям и давлениям. Если предположить, что при одинаковых концентрациях, давлениях и температурах различные углеводороды имеют одинаковые времена индукции и что зависимость от концентраций и давления для всех углеводородов имеет вид

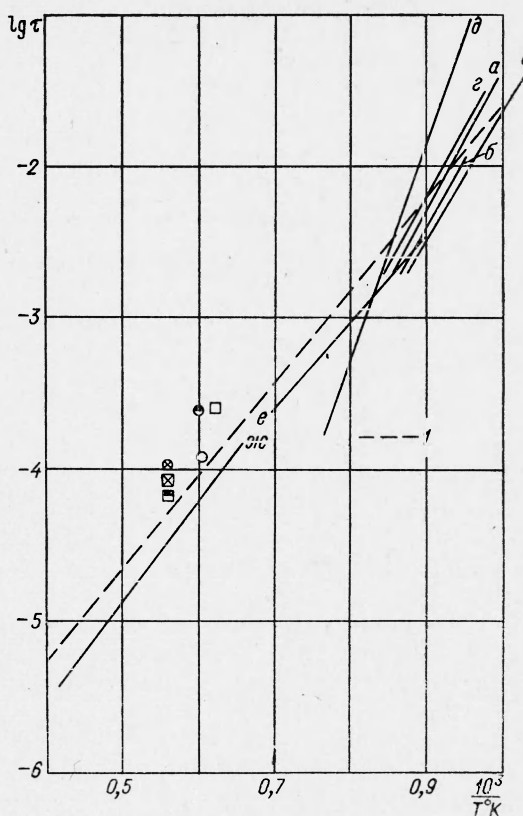
$$\tau \sim \frac{8,5 a + 1}{C_0^{1,3} p^2}, \quad (5)$$

то данные разных авторов, приведенные к одинаковым условиям, хорошо соответствуют друг другу (рис. 6). Исключение составляет городской газ, состоящий в основном из метана, у которого получена значительно большая энергия активации. На рисунке нанесена аппроксимирующая кривая, имеющая формулу

$$\tau = \frac{8,5 a + 1}{C_0^{1,3} p^2} \cdot 2 \cdot 10^{-9} e^{\frac{14000}{T}}. \quad (6)$$

Зависимость времени индукции от давления и концентраций была выбрана из следующих соображений: по нашим результатам и данным Миллера [2], $\tau \sim \frac{1}{C_0^m}$, где, по нашим данным, $m=1,3$, а у Миллера $m=1$. Кроме того, по данным Миллера, $\tau \sim (8,5a+1)$. Борисов [4] получил зависимость времени индукции от давления $\tau \sim p^{-n}$, где $n=1,8$. Объединяя эти результаты и принимая $m=1,3$ и $n=2$, получаем формулу (5). Использование $n=2$ вместо $n=1,8$ дает несколько лучшее соответствие экспериментальных результатов.

Рис. 6. Задержки воспламенения по результатам разных авторов, пересчитанные к одинаковым условиям ($p=1$ бар, $C_0=0,17$, $a=0$).
1 — расчет по аппроксимирующей формуле [6].



Из метода получения формулы (6) видно, что она удовлетворительно описывает экспериментальные данные разных авторов при соответствующих значениях входящих в нее параметров, и поэтому до проведения более детальных исследований ее можно рекомендовать для оценки времени индукции углеводородных топлив в интервале температур 900—2400°K.

Поступила в редакцию
9/IV 1966

ЛИТЕРАТУРА

1. F. P. Millins. Fuel, 1953, VI, 32, 2; VII, 32, 2.
2. R. E. Miller. Seventh Symposium (International) on Combustion, 1959, 417.
3. С. М. Когарко, А. А. Борисов. Изв. АН СССР, ОХН, 1960, 8, 1348.
4. А. А. Борисов. ПМТФ, 1960, 3.
5. H. G. G. Wagner. Ninth Symposium (International) on Combustion, 1963, p. 454.
6. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Механика сплошных сред, М., Гостехиздат, 1953.