

## СКОРОСТЬ ГОРЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Б. Г. Попов, В. И. Горшков, Н. Н. Гурьянова  
(Москва)

Горение жидкости в условиях естественной конвекции представляет собой сложный физический процесс, протекающий при взаимном влиянии тепловых, кинетических и гидродинамических явлений. Он включает в себя испарение жидкости и формирование над ее поверхностью потока пара, а также смешение и реагирование пара с содержащимся в окружающей среде окислителем. За последние годы выполнено большое количество работ, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию скорости выгорания горючих жидкостей [1—12]. Все элементарные теории, в основу которых положен баланс тепла на границе раздела фаз, в основном повторяют модель расчета скорости горения, предложенную В. И. Блиновым и Г. Н. Худяковым. Отличие состоит в методах определения потока тепла, воспринимаемого жидкостью от пламени. Несмотря на простоту полученных при этом решений, они не пригодны для практического применения, так как согласие между расчетом и экспериментом достигается путем подбора численных коэффициентов, являющихся константами для ограниченного круга веществ.

Теории, базирующиеся на приближении пограничного слоя, требуют проведения сложной аналитической обработки на ЭВМ. Громоздкость и трудоемкость вычислительных операций, а также возможность их приложения только к узкому диапазону изменения режима горения существенно ограничивают область применения получаемых при этом результатов.

Цель данной работы — определение эмпирических зависимостей, связывающих величину скорости выгорания с параметрами подобия, полученными на основании анализа математической модели процесса. Такой анализ проведен в работе [2], и найдены критерии подобия, определяющие скорость выгорания жидкости. При этом связь безразмерной скорости выгорания с критериями подобия записывается в виде

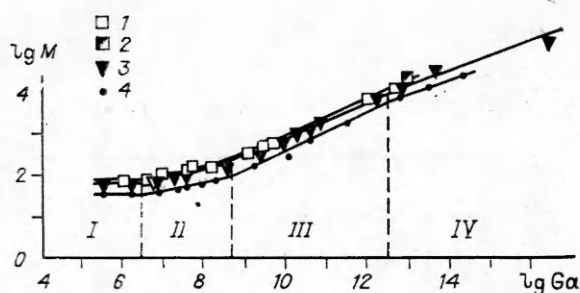
$$M = F(B, S, Ga), \quad (1)$$

где  $M = md/\mu$  — скорость выгорания;  $B = \frac{x_0 Q - C(T_K - T_0)}{H + C_l(T_K - T_0)}$  — параметр массопереноса;  $Ga = gd^3/\nu^2$  — критерий Галилея;  $S = M_o/M_F r$  — модифицированное стехиометрическое соотношение;  $m$  — массовая скорость выгорания жидкости;  $d$  — характерный размер;  $r$  — масса кислорода, необходимая для полного сгорания 1 г топлива;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $Q$  — низшая теплота сгорания;  $C, C_l$  — теплоемкость пара и жидкости соответственно;  $H$  — теплота парообразования жидкости;  $T_K, T_0$  — температуры кипения жидкости и окружающей среды;  $M_o, M_F$  — молекулярные массы кислорода и топлива;  $\mu, \nu$  — динамическая и кинематическая вязкость паров топлива;  $x_0$  — относительная массовая концентрация кислорода в окружающей атмосфере.

Основой для поиска вида функции  $F$  в уравнении (1) послужили экспериментальные данные [3—8], а также результаты наших опытов, полученные на горелках из нержавеющей стали диаметром от 20 до 100 мм и в резервуаре диаметром 1,6 м. Лабораторная установка, описанная в [9], позволяла автоматически поддерживать уровень жидкости на верхнем срезе горелки и непрерывно записывать изменения массы выгоревшего топлива во времени. На горелке каждого диаметра проводилось три опыта и вычислялось среднее арифметическое значение из получаемых результатов. При этом относительная погрешность измерений не превышала 5%. На установке исследованы 26 жидкостей (индивидуальные вещества, относящиеся к различным гомологическим рядам и многокомпонентные смеси). С учетом данных других авторов это дало

Рис. 1. Зависимость скорости выгорания от критерия Галилея.

1 — ксилол (данные авторов); 2 — ксилол [6]; 3 — бензин [3]; 4 — нефть Биби-Эйбатская [3].



возможность включить в обработку более 200 экспериментальных точек, относящихся к 33 горючим жидкостям. Необходимые для расчетов параметры  $\mu$  и  $\nu$  определялись при температуре кипения жидкостей по методикам, рекомендованным в работе [10], или брались из [11, 12]. При вычислении теплофизических констант в качестве определяющей температуры использовалось среднее значение между температурой кипения и окружающей средой.

Имеющиеся в литературе экспериментальные данные по горению жидких топлив в горелках и резервуарах размером от 3,3 мм до 22,9 м [1, 3] позволили определить вид зависимости скорости выгорания от критерия Галилея. На рис. 1 представлена такая зависимость для бензина, нефти и ксилола. Для других веществ эта зависимость имеет аналогичный характер.

Обращает на себя внимание наличие трех характерных зон, определяемых углами наклона участков этой кривой к оси абсцисс. Для горелок диаметром менее 20 мм реализуется ламинарный режим горения (I). В этой области безразмерная скорость выгорания не зависит от величины  $Ga$ . Зона IV соответствует турбулентному режиму в резервуарах диаметром более 1 м. Угол наклона прямой, аппроксимирующей экспериментальные данные на этом участке, близок к  $1/3$ . Последнее обстоятельство находится в полном соответствии с известным фактом [4], согласно которому массовая скорость выгорания в резервуаре диаметром более 1 м не зависит от его размера.

Находящуюся между ними область промежуточного режима горения удобно разбить на два участка, для каждого из которых существуют свои аппроксимирующие прямые с различными углами наклона. При этом в область II укладываются опытные данные, полученные в лабораторных условиях на горелках диаметром от 20 до 100 мм, а в зону III — для горелок диаметром до 1 м. Однако такое разделение на участки в зависимости от диаметра горелок и резервуаров носит условный, ориентировочный характер, так как величиной, определяющей режим горения, является число  $Ga$ .

Анализ режимов горения, проведенный для веществ различных классов, позволил определить интервалы чисел  $Ga$ , соответствующие каждой зоне. Так, ламинарный режим горения наблюдается при  $Ga < 3 \cdot 10^8$ , а турбулентный — при  $Ga \geq 3 \cdot 10^{12}$ . В области  $3 \cdot 10^8 \leq Ga < 4,8 \cdot 10^8$ , а в III  $4,8 \cdot 10^8 \leq Ga < 3 \cdot 10^{12}$ .

Таким образом, удалось установить, что режим горения жидкостей, характерный для каждого участка, может быть удовлетворительно описан степенной функцией от критерия  $Ga$ .

Для выяснения влияния параметра массопереноса  $B$  на величину  $M$  провели серию опытов по определению скорости выгорания в горелках диаметром 20 мм при различном содержании кислорода в окружающей атмосфере. Горелку с жидкостью помещали в цилиндрическую камеру, через которую непрерывно подавали смесь азота с кислородом. При изменении содержания окислителя в газовой смеси от 17 до 73% значение  $B$  увеличивалось более чем в 5 раз. Оказалось, что для всех исследованных веществ безразмерная скорость выгорания есть линейная функция параметра  $B$ .

С учетом степенной зависимости скорости выгорания от критерия Галилея и прямой пропорциональности от параметра массопереноса

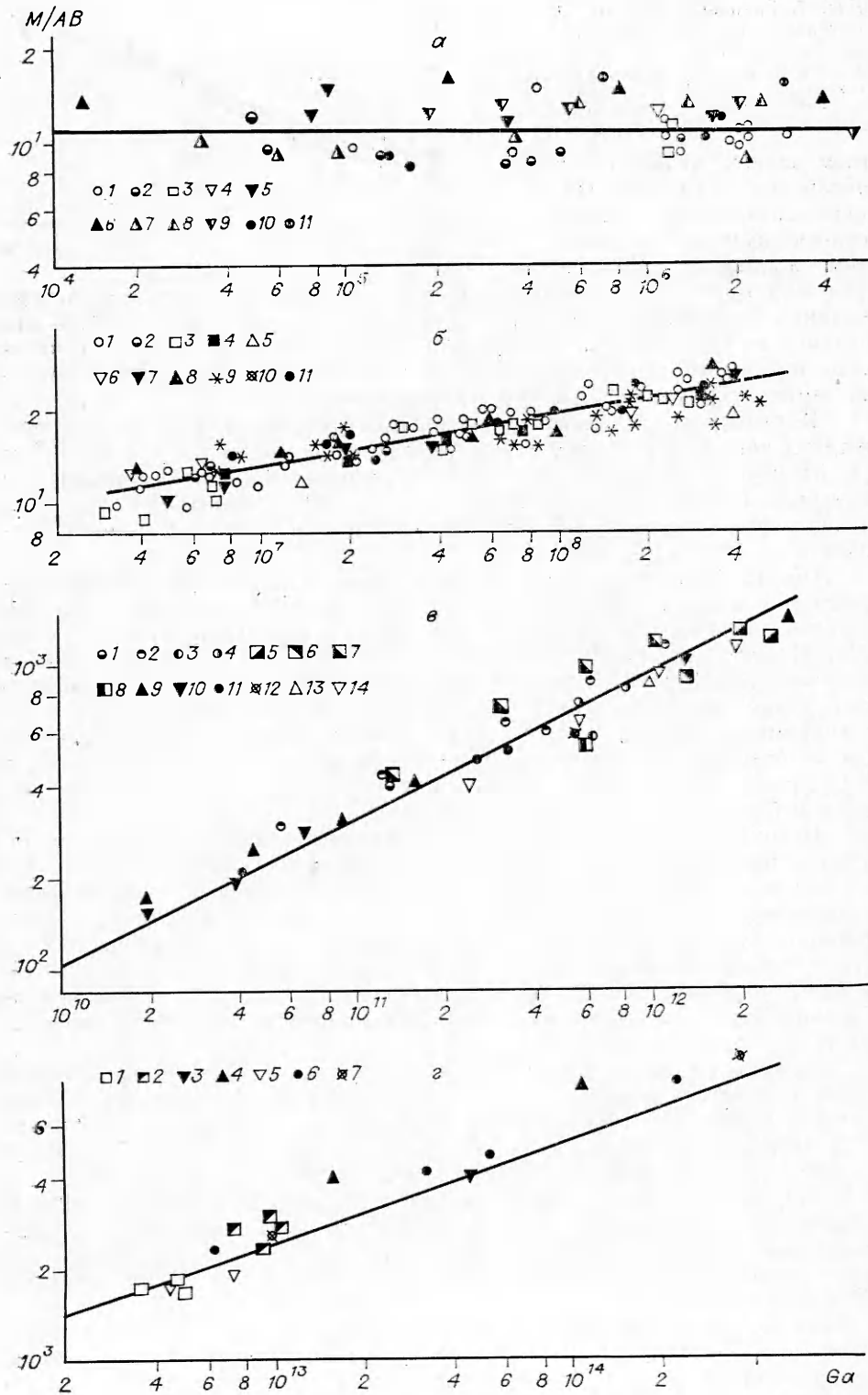


Рис. 2. Корреляция расчетных и экспериментальных данных по скорости выгорания.

уравнение (1) может быть приведено к виду

$$M = \gamma A(S) (\beta + B) Ga^\alpha, \quad (2)$$

где функция  $A(S)$  и константы  $\gamma$ ,  $\beta$  и  $\alpha$  подлежат определению при анализе экспериментальных данных.

На основе имеющихся экспериментальных данных с помощью ЭВМ ЕС-1033 найдены оптимальные значения параметров, входящих в уравнение (2). В качестве критерия оптимизации принимали минимум суммы квадратов относительных отклонений. Установлено, что для всех режимов горения можно принять  $\beta = 0$ , а значения  $\alpha$  для участков I—IV (см. рис. 1) соответственно равны 0; 0,160; 0,480; 0,333. Для всех горючих веществ  $A = 0,570 + 0,773S$ . Исключение составляют ароматические углеводороды, для которых при  $Ga < 4,8 \cdot 10^8$  лучшее соответствие расчетных и опытных данных достигается, если функцию  $A$  определять по следующим соотношениям:  $A = 1,45$  при  $S \leq 0,9$ ;  $A = 3,40S - 1,56$  при  $S > 0,9$ .

Последнее обстоятельство, вероятно, связано с неполнотой горения ароматических углеводородов. Сильно коптящие пламена этих жидкостей нагревают стенки горелок излучением в большей степени, чем другие вещества. Это, в свою очередь, интенсифицирует процесс горения путем передачи тепла от стенок горелки к жидкости. Косвенно это предположение подтверждает тот факт, что с ростом  $Ga$  горение ароматических углеводородов подчиняется общему правилу, так как относительный вклад передачи тепла от стенок к жидкости уменьшается. После определения вида функции  $A$  нетрудно рассчитать числовые коэффициенты  $\gamma$  для каждой области горения. Для участков I—IV они оказались соответственно равными 10,87; 1,00;  $1,670 \cdot 10^{-3}$  и 0,114.

Анализ и обработка экспериментальных данных, относящихся к скорости выгорания различных жидкостей, позволили определить вид уравнений для каждого режима горения:

турбулентная область ( $Ga \geq 3 \cdot 10^{12}$ )

$$M = 0,114ABGa^{1/3},$$

переходная область

$$4,8 \cdot 10^8 \leq Ga < 3 \cdot 10^{12}, \quad M = 1,670 \cdot 10^{-3}ABGa^{0,48},$$

$$3 \cdot 10^6 \leq Ga < 4,8 \cdot 10^8, \quad M = ABGa^{0,16},$$

ламинарная область ( $Ga < 3 \cdot 10^6$ )

$$M = 10,87 \cdot AB.$$

Получаемое при этом соответствие между данными, рассчитанными по приведенным уравнениям, и экспериментом иллюстрирует рис. 2. Видно, что большинство экспериментальных точек не выходит за предел интервала ошибок шириной  $\pm 10\%$ . Анализ точности результатов показал, что при доверительной вероятности 0,95 относительная ошибка расчета не превышает 21%.

октиловый (данные авторов); 2 — спирты: бутиловый, изоамиловый [1]; 3 — бензол, толуол, ксилол, этилбензол, хлорбензол (данные авторов); 4 — ацетон (данные авторов); 5 — уксусная кислота (данные авторов); 6 — этилацетат (данные авторов); 7 — бензин (данные авторов); 8 — керосин (данные авторов); 9 — гексан, гептан, октан, нонан, декан (данные авторов); 10 — нефть Карачухурская [3]; 11 — нефть Биби-Эйбатская [3]. б)  $4,8 \cdot 10^8 < Ga < 3 \cdot 10^{12}$ : 1 — спирт этиловый [4]; 2 — спирты: этиловый, бутиловый [5]; 3 — спирты: этиловый, бутиловый [8]; 4 — спирт изопропиловый [4]; 5 — бензол, толуол, ксилол [4]; 6 — ацетон [4]; 7 — ацетон [5]; 8 — ацетон [8]; 9 — керосин [3]; 10 — бензин [3]; 11 — нефть Биби-Эйбатская [3]; 12 — нефть Карачухурская [3]; 13 — кислота уксусная (данные авторов); 14 — этилацетат [15]. в)  $Ga \geq 3 \cdot 10^{12}$ : 1 — бензол, толуол, ксилол (данные авторов); 2 — бензол, толуол, ксилол, этилбензол [6]; 3 — бензин [3]; 4 — керосин [3]; 5 — этилацетат (данные авторов); 6 — нефть Биби-Эйбатская [3]; 7 — нефть Карачухурская [3].

Удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных позволяет рекомендовать полученные уравнения для инженерных приложений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Блинов, Г. Н. Худяков. Диффузионное горение жидкостей. М.: Изд-во АН СССР, 1961.
2. В. И. Горшков, Н. Н. Гурьянова, Б. Г. Попов и др.— В кн.: Пожарная профилактика. М.: ВНИИПО, 1984.
3. П. П. Павлов.— В кн.: Вопросы горения и пожарной профилактики. М., 1957.
4. В. Т. Монахов, В. М. Ройко. Исследование скорости выгорания жидкостей. Экспресс-информ. Сер. 1, вып. 57. М.: ВНИИПО, 1973.
5. В. М. Кучер, В. А. Козлов.— В кн.: Проблемы горения и тушения пожаров. М.: ВНИИПО, 1975.
6. Г. Е. Титов, П. С. Попов, В. С. Гришин.— В кн.: Пожарная защита объектов газоперерабатывающих и нефтехимических производств. М.: ВНИИПО, 1977.
7. В. М. Ройко, В. Г. Михайлов. Регистрация скорости выгорания в полигонных условиях. Экспресс-информ. Сер. 1, вып. 1(82). М.: ВНИИПО, 1977.
8. Т. Юмото, К. Сато, Х. Косэки. Хайкан гидзюцу кэнкю кекайся, 1982, 22, 12, 13.
9. Н. И. Авдонин, Н. Н. Гурьянова, С. А. Попов и др.— В кн.: Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. М.: ВНИИПО, 1982.
10. В. В. Федоров, Ю. Н. Бочаров, Р. Л. Барашков и др. Методы расчета теплофизических свойств газов и жидкостей. М.: Химия, 1974.
11. Н. Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука, 1972.
12. Справочник химика. Т. I. М.—Л.: Госхимиздат, 1962.

*Поступила в редакцию 8/VII 1985,  
после доработки — 5/XI 1985*

### ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ И МЕХАНИЗМА ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ В ПЛАМЕНИ ГЕКСОГЕНА

*Н. Е. Ермолин, О. П. Коробейничев, Л. В. Куйбида, В. М. Фомин  
(Новосибирск)*

Горение конденсированных веществ — сложный многостадийный процесс, включающий в себя физические (теплопроводность, диффузию, фазовые переходы) и химические процессы, протекающие в основных зонах горения — в конденсированной и газовой фазах. Если физическая сторона процесса горения конденсированных веществ изучалась достаточно широко, то химический механизм его практически не изучен, поскольку до недавнего времени не существовало соответствующих экспериментальных методов исследования. Разработанный в последние годы масс-спектрометрический метод зондирования пламен конденсированных веществ [1] позволяет получить данные по их химической структуре — измерить распределение концентраций реагирующих компонентов в пламени и в результате ответить на основные вопросы, касающиеся химического механизма горения конденсированных веществ: как идет газификация вещества в реакционном слое к-фазы в волне горения (испарение, разложение, их соотношение), какие конечные и богатые энергией промежуточные продукты при этом образуются и какова последовательность химических превращений в пламени, какие промежуточные и конечные продукты при этом образуются.

Данные о составе продуктов газификации в волне горения могут быть в дальнейшем использованы для моделирования кинетики и механизма процессов в пламенах конденсированных систем на уровне элементарных стадий.

Горение нитрамина — гексогена и октогена — исследовалось в [2—6]. При этом изучались главным образом скорость горения и ее зависимость от внешних условий (давление и др.), температура горения. Сделаны попытки применить к расчету скорости горения гексогена теорию го-