

системы уравнений (6) найдено достаточное число моментов интенсивности. Тем самым метод может использоваться и при решении задач астрофизики.

Автор выражает благодарность Н.А. Рубцову за полезное обсуждение результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. — М.: Физматгиз, 1963.
2. Рубцов Н.А. Теплообмен излучением в сплошных средах. — Новосибирск: Наука, 1984.
3. Замураев В.П. Ламинарный пограничный слой в излучающе-поглощающем газе около плоской пластинки // ПМТФ. — 1964. — № 3.
4. Замураев В.П., Солоухин Р.И. Расчет состояния воздуха за сильными ударными волнами с учетом излучения // Аэрофизические исследования. Вып. 5. Вопросы газодинамики. — Новосибирск: ИТПМ СО АН СССР, 1975.
5. Замураев В.П., Масленникова И.И., Солоухин Р.И. Исследование радиационного теплообмена за ударными волнами в воздухе с помощью многогруппового метода осреднения // Тепло- и массоперенос при интенсивном лучистом и конвективном нагреве. — Минск: ИТМО АН БССР, 1977.
6. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. — М.: Наука, 1977.
7. Чарахчьян А.А. Об одной численной схеме для уравнения переноса на оптически грубой сетке // ЖВММФ. — 1975. — Т. 15, № 4.
8. Грынъ В.И. Схемы расчета переноса излучения // Динамика излучающего газа. — М.: ВЦ АН СССР, 1981.
9. Соболев В.В. Рассеяние света в атмосферах планет. — М.: Наука, 1972.
10. Чарахчьян А.А. Численная схема для эволюционных задач с нестационарным переносом излучения // ЖВММФ. — 1978. — Т. 18, № 2.
11. Замураев В.П. О погрешности приближения плоских слоев при описании излучения в пограничном слое серого газа // ПМТФ. — 1965. — № 1.
12. Замураев В.П. О расчете радиационно-кондуктивного теплообмена в плоском слое на сетке с произвольной оптической толщиной шага // Сиб. физ.-техн. журн. — 1991. — Вып. 2.
13. Замураев В.П. Учет анизотропного рассеяния при расчете комбинированного теплообмена в плоском слое на сетке с произвольной оптической толщиной шага // Сиб. физ.-техн. журн. — 1991. — Вып. 4.
14. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. — М.: Наука, 1978.

г. Новосибирск

Поступила 30/VIII 1993 г.

УДК 66.021.4

Н.А. Кузин, В.А. Кузьмин, А.В. Куликов, А.Б. Шигаров

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ДИСПЕРСНО-КАПЕЛЬНОГО ГАЗОЖИДКОСТНОГО ПОТОКА В ЗЕРНИСТОМ СЛОЕ

Введение. В некоторых процессах химической технологии, например при каталитическом разложении монотоплив, используются каталитические слои, разогретые до высоких температур, через которые протекает дисперсный газожидкостный поток. Лимитирующей стадией этого процесса может быть испарение капель, пары которых реагируют на катализаторе, разогревая катализатор до высоких температур. Количество испарившейся жидкости прямо пропорционально количеству тепла, переданного от катализатора к жидкости или через газовую фазу, или непосредственно к каплям. До сих пор процесс этот не изучен и неизвестны зависимости теплообмена от основных параметров процесса: расходонапряженности газа и жидкости,

© Н.А. Кузин, В.А. Кузьмин, А.В. Куликов, А.Б. Шигаров, 1994

температуры газа и катализатора, размера зерна и капель. Не разработана методика исследования.

Методика исследования. Основной трудностью эксперимента было подведение большой тепловой мощности в слой. Величина тепловой мощности не должна зависеть от самого процесса испарения, чтобы не усложнять анализ эксперимента.

Использование для этой цели электрического нагрева слоя не годится: во-первых, это технически трудно осуществить, во-вторых, принципиально невозможно обеспечить равномерность разогрева зернистого слоя, так как максимальный электроразогрев происходит в местах контакта зерен.

Для разогрева слоя можно использовать газ, несущий капли и заранее разогретый до высоких температур. Эта методика нами опробована, но забракована, так как в момент впрыска капель в поток и при прохождении ими расстояния от форсунки до слоя происходит теплообмен между каплями и разогретым потоком газа, что усложняет эксперимент и дает большие ошибки. Кроме того, из-за малой теплоемкости газа по сравнению с тепловой испарения жидкости этот способ можно использовать только для очень малых отношений расходов жидкость — газ.

В разработанной нами методике для нагрева слоя использовалась реакция окисления водорода кислородом воздуха на самом слое катализатора, протекающая во внешнедиффузионном режиме. Тепловыделение на слое могло варьироваться независимо — изменением концентрации водорода на входе в реактор или изменением расхода водородно-воздушной смеси с постоянной концентрацией. Использование инертной жидкости (воды), которая подавалась на слой в виде капель с помощью пневматической форсунки, практически исключало влияние теплообмена и испарения на процесс тепловыделения, а там, где это влияние было заметно, оно легко учитывалось по измерению количества прореагировавшего водорода.

“Тонкий” слой катализатора располагался в вертикальной кварцевой трубе с внутренним диаметром 23 мм. Спутный газожидкостный поток подавался на слой сверху вниз. Высота слоя подбиралась таким образом, чтобы, с одной стороны, не вся жидкость испарилась, а с другой — испарение было бы достаточно большим для измерения. В пределах варьирования диаметра зерна 0,7—3,2 мм высота слоя подбиралась в пределах 2,5—10 мм соответственно.

Для слоя использовался катализатор двух типов: гранулы из окиси алюминия и порометаллические зерна. В обоих случаях активным компонентом являлась нанесенная платина. Гранулы из окиси были близки к сферическим со средним диаметром 3,2 и 2,5 мм, дробленка из этих зерен имела диаметры 1,25 и 0,75 мм, порометаллические зерна — средний диаметр 2,5 мм.

При изменении исходной концентрации водорода в пределах 5—10 % (объемных) и удельном расходе газа 1,8—5,3 м³/м² (здесь и ниже расход газа дается при нормальных условиях) температура слоя изменялась в пределах 400—800 °С. Форсунка устанавливалась по оси трубы на таком расстоянии, чтобы при заданных расходах газа и жидкости диаметр факела распыла в месте расположения слоя соответствовал диаметру трубы. Изменением расхода воздуха через форсунку варьировался средний размер капель в пределах 50—200 мк.

Объемно-поверхностный диаметр капли определялся методом отпечатков на толстом слое сажи, нанесенной на стеклянную пластинку:

$$d = (\sum d_i^3 n_i) / (\sum d_i^2 n_i)$$

(n_i — количество капель с диаметром $d_i \pm 5$ мк, измеренных и подсчитанных с помощью инструментального микроскопа на пластине после ее экспозиции под факелом распыла). При использовании этого диаметра правильно определяется поверхность капель для заданного объема жидкости [1].

В стационарных условиях проводилось измерение расходов жидкости и газов, температур катализатора и газового потока, концентрации водорода на выходе из слоя. Температура газа измерялась гребенкой из шести термопар на расстоянии 10 мм от нижней поверхности слоя. Предварительные опыты, проведенные с термопарами, защищенными от попадания капель, и термопарами с «открытыми головками», не выявили существенной разницы в их показаниях. Концентрация водорода на входе в слой определялась по расходу водорода и воздуха, а на выходе из слоя — хроматографом.

Количество тепла q , переданное воде, находилось из балансового уравнения

$$(1) \quad Q_n y H = c_p Q (T - T_0) + q_1 + q,$$

где Q_n , Q — расход водорода на входе и парогазовой смеси на выходе из слоя; y — степень превращения водорода; H — тепловой эффект реакции образования воды; c_p — средняя теплоемкость газовой смеси при изменении температуры от T_0 до T ; $q_1 = \alpha_1 (T - T_0)$ — потери тепла в окружающую среду.

Для того чтобы уменьшить систематические ошибки, количество тепла, переданное воде, определялось по двум измерениям в стационарных условиях: с подачей воды на слой и без воды (при неизменных других параметрах). Коэффициент теплоотдачи с окружающей средой α может быть найден из уравнения, соответствующего случаю без подачи воды:

$$(2) \quad Q_n y_1 H = c_{p1} Q_1 (T_1 - T_0) + \alpha_1 (T_1 - T_0).$$

Его значение в эксперименте равно 0,07 Вт/град. Величины $c_{p1} Q_1$, $c_p Q$ мало отличаются из-за незначительной разницы в степени превращения и относительно небольшого изменения температуры газа на выходе. С учетом этих допущений из (1) и (2) получим

$$(3) \quad q = (c_p Q + \alpha) (T_1 - T) - Q_n H (y_1 - y).$$

Для оценки эффективности теплоотдачи к каплям в единице объема слоя рассчитывалась величина объемного коэффициента теплоотдачи

$$(4) \quad k = q / (V T), \text{ Вт/м}^3/\text{°C}$$

(V — объем слоя, T — температура газа на выходе из слоя).

Количество испарившейся воды рассчитывалось по формуле

$$G_1 = q / (h(T) - h(T_0))$$

($h(T)$ — энтальпия воды при соответствующих температурах). В этом расчете пренебрегали теплом, идущим на нагрев оставшейся жидкости, так как температура капель на выходе неизвестна. Если предположить, что оставшаяся вода прогревалась до 100 °C, то ошибка составила бы 20 %.

Обсуждение результатов. В таблице приведены результаты опытов с порометаллическим катализатором, где T_1 и T_2 — температура катализатора на входе и выходе слоя. В диапазоне исследованных параметров и в пределах ошибки эксперимента значение k мало зависит от размера капель и скорости газа. Но для малых размеров зерен все же заметна тенденция уменьшения k с увеличением расхода газа и размера капель. Для порометаллических зерен k в 2 раза выше, чем для керамических при прочих равных условиях.

На рисунке приведена зависимость k от d_3 . Здесь для керамического катализатора при $d = 0,1-0,2$ мм, $Q = 760-1100$ см³/с точки I и линии I отвечают $G = 0,02$ см³/с, 2 и II — $G = 0,04$ см³/с, линии I, II — расчету по формуле (5); для порометаллического катализатора при $d = 0,06-0,15$ мм, $Q = 990-2200$ см³/с точки 3 соответствуют $G = 0,049$ см³/с.

Q	$Qh, \text{см}^3/\text{с}$	T_1	T_2	T	$G \cdot 10^2, \text{см}^3/\text{с}$	$d, \text{мкм}$	$G_1 \cdot 10^2, \text{см}^3/\text{с}$	$k \cdot 10^{-4}, \text{Вт}/\text{м}^3/\text{°C}$
		°C						
990	90	744	723	550	0	—	—	—
990	90	605	605	473	4,6	57	2	7,5
1323	113	546	547	451	4,9	57	2,9	10,9
2190	190	572	583	462	4,9	57	2,8	10,1
2190	190	627	627	479	4,9	100	2,7	9,5
2190	190	—	—	462	4,9	150	3	11

Из рисунка видна значительная зависимость объемного коэффициента теплообмена от расхода жидкости G и от размера зерна катализатора d_3 , которую можно представить в виде

$$(5) \quad k = AG/d_3,$$

где A -коэффициент пропорциональности, подобранный при $k = 13 \cdot 10^4 \text{ Вт}/\text{м}^3/\text{°C}$, $G = 0,04 \text{ см}^3/\text{с}$, $d_3 = 1 \text{ мм}$.

Для выяснения механизма теплообмена капель в слое проведем расчет коэффициента k для двух случаев: 1) капли движутся через слой со скоростью газа; 2) капли тормозятся при столкновениях с зернами, затем разгоняются газом.

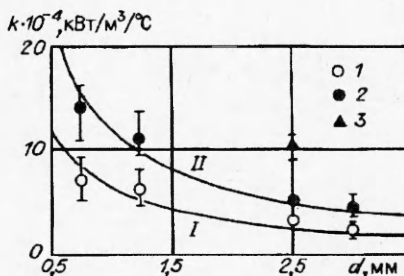
Для первого случая коэффициент теплообмена капли с потоком $\alpha = \text{Nu}\lambda/d$ ($\text{Nu} = 2$, λ — теплопроводность газа). Количество капель, втекающих в слой, $n = 6G/(\pi d^3)$. Время пребывания их в объеме слоя $\tau = V\epsilon / Q_3$ ($Q_3 = Q(T + 273)/273$). Количество тепла, переданное каплям, $q = \pi d^2 \alpha n \tau (T - T_0)$. Пренебрегая T_0 по сравнению с T и используя (4), получим

$$(6) \quad k = 12\lambda\epsilon G/(d^2 Q_3).$$

Вычисление этой величины при параметрах, соответствующих эксперименту ($T = 500 \text{ °C}$, $d = 0,1 \text{ мм}$, $Q = 10^3 \text{ см}^3/\text{с}$, $G = 4 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3/\text{с}$, $\epsilon = 0,4$ — порозность слоя), дает значение $k = 400 \text{ Вт}/\text{м}^3/\text{°C}$, которое в 260 раз меньше найденного в эксперименте для керамического зерна с диаметром 1,25 мм и в 128 раз — с диаметром 3,2 мм. Для порометаллического зерна это различие будет еще больше.

Сравнение экспериментально полученной зависимости (5) с теоретической (6) указывает на качественное и количественное несоответствие. Для обеспечения такого большого теплообмена между каплями и газом необходимо, чтобы капли раздробились или чтобы их скорость движения через слой была много медленнее скорости газа. Измерения размеров капель после слоя показали, что их средний диаметр меняется мало и практически соответствует уменьшению за счет испарения капли (средний диаметр изменился от 57 до 42 мк). Кроме того, число Вебера, рассчитанное для условий эксперимента, меньше 1, что говорит об устойчивости капель к дроблению.

Сделаем оценки для второго случая при $d_3 = 1 \text{ мм}$ и при следующих допущениях: количество столкновений капли в единице объема слоя $n_1 = (6(1 - \epsilon) / \pi)^{1/3} / d_3$, расстояние между столкновениями на единице длины слоя $l = 1 / n_1$, время t_1 пролета капли расстояния



Р и с. 1

$x = l$ найдем из уравнения движения капли:

$$m\delta^2 x / \delta t^2 = F \text{ при } t = 0, x = 0, \delta x / \delta t = 0.$$

Сила, действующая на каплю, $F = c\rho(u - w)^2 \pi d^2 / 8$ ($c = f(\text{Re})$, $\text{Re} = (u - w)d/\nu$, u, ρ, ν — скорость, плотность, кинематическая вязкость газа в слое). Масса капли $m = \rho_2 \pi d^3 / 6$ (ρ_2 — плотность жидкости). Время пребывания капли в единице объема слоя $\tau = t_1 n_1$.

Из анализа решения при указанных выше параметрах потока и слоя получаем $u \gg w$, $t_1 \sim (2lm/F)^{0.5}$, в этом случае $c \approx 24/\text{Re}$, $\text{Nu} \approx 0,8\text{Re}^{0.5}$ [2, с. 25, 149]. Объемный коэффициент теплообмена капли с газом в слое

$$(7) \quad k = \tau n \pi d^2 \approx 1,7 \lambda u_2 [\rho_2 (1 - \varepsilon)^{1/3} / (d d_3 \rho)]^{0.5} / \nu$$

(u_2 — удельный расход жидкости).

Формула (7) количественно и качественно лучше соответствует эксперименту, чем (6). Сделанные по этой модели расчеты показывают, что при приведенных выше параметрах слоя и потока неподвижная капля испытывала бы ускорение со стороны газа порядка 1000 м/с^2 , но при этом коэффициент теплообмена возрастает всего в 2 раза, а время пребывания в слое увеличивается в 20 раз по сравнению с каплей, замороженной в поток. Эти оценки дают увеличение объемного коэффициента в 40 раз ($k = 1,6 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^3/\text{°C}$), что явно недостаточно для соответствия эксперименту, где $k = 10,5 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^3/\text{°C}$.

По-видимому, основным механизмом теплообмена капли в зернистом слое является механизм взаимодействия капель с разогретой поверхностью катализатора. В этом случае объемный коэффициент теплообмена k должен быть пропорционален: безразмерной величине $P \sim d/d_3$ — вероятности столкновения капли в слое, которая пропорциональна поверхности единицы объема слоя $1/d_3$ и диаметру капли d ; $n \sim u_2/d^3$ — количеству капель, втекающих в единицу объема; $s \sim d^2$ — поверхности капли, т.е. $k = Pns \sim u_2/d_3$, что отвечает экспериментально полученной формуле (5).

В пользу последней модели говорит и экспериментально найденное увеличение объемного коэффициента теплообмена при росте теплоемкости и теплопроводности зерна катализатора. Для порометаллических зерен эти параметры выше, чем для керамических. При взаимодействии капли с поверхностью количество переданного тепла должно зависеть от тепловых свойств материала этой поверхности, т.е. от зерна катализатора, как это было в наших опытах.

Выводы. Разработана экспериментальная методика физического моделирования разложения монотоплива в каталитическом пакете при лимитирующей стадии процесса — при испарении жидкости в капельном режиме. Проведены исследования теплообмена капель жидкости в разогретом до высоких температур слое катализатора. Получена экспериментальная зависимость объемного коэффициента теплообмена от диаметра зерна, расхода жидкости и материала катализатора. Показано, что в пределах варьирования параметров этот коэффициент практически не зависит от скорости газа и диаметра капли. Обсуждены и сделаны оценки механизма испарения капель в разогретом зернистом слое.

Для более детального выяснения механизма взаимодействия капель со слоем катализатора необходимо дальнейшее экспериментальное исследование в более широком диапазоне изменения основных параметров процесса и использование при анализе экспериментальных данных математического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пажи Д.Г., Галустов В.С. Распылители жидкости. — М.: Химия, 1979.
2. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы. — Л.: Химия, 1979.

г. Новосибирск

Поступила 24/ VIII 1993 г.

УДК 536.24:532.72

В.И. Елисеев, Ю.П. Совит

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В ПУЧКАХ НИТЕЙ С ИСПАРЕНИЕМ ЖИДКОСТИ НА ИХ ПОВЕРХНОСТЯХ

В ряде технологических процессов формования и обработки синтетических нитей тепломассообмен сопровождается газовойделением с поверхностей волокон. Как правило, оно возникает либо в результате химических реакций, например горения, либо в результате разложения полимера с выделением низкомолекулярных соединений (НМС), либо при испарении жидкости. Во всех этих случаях на тепломассообмен оказывают влияние теплота реакций или тепло фазового перехода. Важное место теплообмен с фазовым переходом жидкости занимает в процессе сушки волокнистых материалов и пучков волокон. Среди разнообразных технологических схем сушка движущихся пучков нитей может рассматриваться в отдельных случаях как некоторое побочное звено в общей технологической цепи, но тем не менее имеющее практический интерес. Сюда можно отнести такие стадии, как выход пучка из осадительной ванны после мокрого формования, движение пучков после замасливания. Существенную же роль сушка движущихся пучков нитей играет в процессе сухого формования, при котором с поверхностей волокон испаряется растворитель полимера. Поскольку на начальном этапе в волокне содержится значительно больше растворителя, чем полимера, испарение жидкости качественно проходит в соответствии с законами сушки пористых влагонасыщенных материалов [1—3]. Такой процесс характеризуется несколькими стадиями, первая из которых сопровождается изменением температуры волокон и интенсивным испарением, а во второй сохраняется интенсивное газовойделение при равенстве тепловых потоков, поступающих из среды и идущих на фазовый переход, в результате чего температура филаментов практически не меняется. Одновременно с уносом растворителя происходит структурирование полимера и формирование свойств волокон. В связи с этим разработка математических моделей сопряженного тепломассообмена при фазовых переходах в пучках движущихся волокон и применение их в расчетах реальных схем формования представляются достаточно актуальными.

1. Постановка задачи. Положим, что каждое волокно в пучке покрыто тонкой пленкой воды, толщина которой задана. Процесс испарения примем равновесным, т.е. концентрация насыщения в газе у поверхности пленки однозначно связана с давлением и температурой в этой же области. Кроме того, скорость пленки и температуру жидкости будем считать равными скорости и температуре нити. В [4] в рамках фильтрационной модели течения и модели пограничного слоя выведены уравнения движения и теплообмена пучка движущихся нитей. В [5] система уравнений была дополнена уравнениями диффузии, но массообмен и теплообмен рассматривались отдельно друг от друга. В случае сопряженного тепломассообмена