

обработки по уравнению (5) (переводной множитель $M = 3.0 \text{ кал/г}\cdot\text{мм}$); 4 — предельное значение, к которому стремится кривая 3; 5 — средняя температура T в основном нагреве; 6 — средняя температура в холостом нагреве; 7 — изменение давления в основном нагреве по записи вольфрамового вакуумметра в мм отклонения на осциллограмме.

Величина теплового эффекта, полученная в этом опыте, $\sim 160 \text{ кал/г}$. Это приблизительно в 1.5—2 раза больше приведенного в [9]. Скорость тепловыделения при глубине разложения $\eta = 0.25$ (точка 1 на фиг. 3) равна $\sim 70 \text{ кал/г}\cdot\text{сек}$. Температура в этот момент была 254°C . Для сравнения укажем, что скорость тепловыделения при 250°C , полученная с помощью методик зажигания, равна 30 и 80 $\text{кал/г}\cdot\text{сек}$ [5].

Авторы благодарны И. Л. Котляревскому и А. С. Заниной за любезное представление полимеров.

Поступила 2 IV 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., Гостехиздат, 1952, стр. 127, 139.
2. Аристова З. И., Лейпунский О. И. О прогреве поверхности горящего пороха. Ж. физ. хим., 1946, т. 20, вып. 11, стр. 1391.
3. Чиркин В. С. Теплопроводность промышленных материалов, М., Машгиз, 1962, стр. 179.
4. Справочник по электротехническим материалам. М.—Л., Госэнергоиздат, 1960, т. 2.
5. Григорьев Ю. М., Лисицкий В. И., Мержанов А. Г. О воспламенении конденсированных веществ в нагретом газе. Физика горения и взрыва, 1967, т. 3, № 4, стр. 512.
6. Александров В. В., Морозов В. Г. Применение расплавляющихся проволочек для нагрева проводников за короткий интервал времени. Ж. физ. хим., 1968, т. 42, вып. 8, стр. 2128.
7. Темников Ф. Е., Харченко Р. Р. Электрические измерения неэлектрических величин. М., Госэнергоиздат, 1948, стр. 72.
8. Шкурин Г. П. Справочник по новым электроизмерительным приборам. М., Воениздат. МО СССР, 1964, стр. 206.
9. Похил П. Ф. О механизме горения бездымных порохов. Сб. «Физика взрыва», М., Изд-во АН СССР, 1953, № 2, стр. 181.

СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН С ШЕСТИФТОРИСТОЙ СЕРОЙ В ЗАКРИТИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ

Э. Н. Дубровина, В. П. Скрипов

(Свердловск)

Приведены опытные данные по коэффициенту теплообмена платиновой проволоки с шестифтористой серой в закритической области. На изотермах, близких к критической, при температурном напоре 0.5° коэффициент теплообмена увеличивается в несколько раз и проходит через максимум.

Вблизи критической точки жидкость-пар, как известно, теплообмен происходит при резко изменяющихся свойствах вещества. Влиянию особенностей поведения вещества на теплообмен в этой области посвящено большое число работ (обзор которых здесь опускается).

Ниже исследуется теплообмен с шестифтористой серой в закритической области. По химическим свойствам SF_6 близка к инертным газам, обладает большой электрической прочностью. Критические параметры SF_6 по данным [1] равны $t_* = 45.56^\circ \text{C}$, $p_* = 37.6 \text{ бар}$.

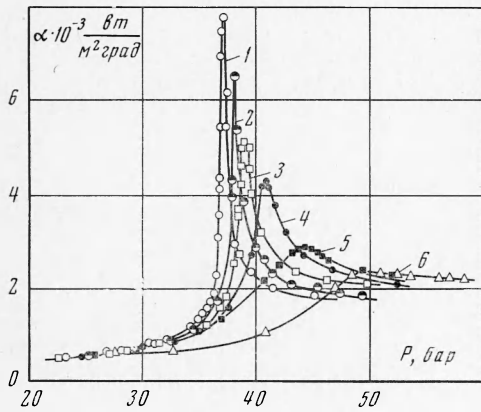
В опытах использована экспериментальная установка, описанная в работе [2]. Нагревателем и термометром сопротивления служит тонкая платиновая нить диаметром 29 мм , помещенная по оси вертикального и горизонтального цилиндрических каналов. Камера, заполненная SF_6 , помещалась в термостат, температура которого поддерживалась с точностью $\pm 0.01^\circ \text{C}$. Перед заполнением шестифтористая сера очищалась от примесей методом вымораживания.

Изучалось поведение коэффициента теплообмена α в зависимости от давления p при постоянном температурном напоре, $\Delta t = 0.5^\circ$ по изотермам.

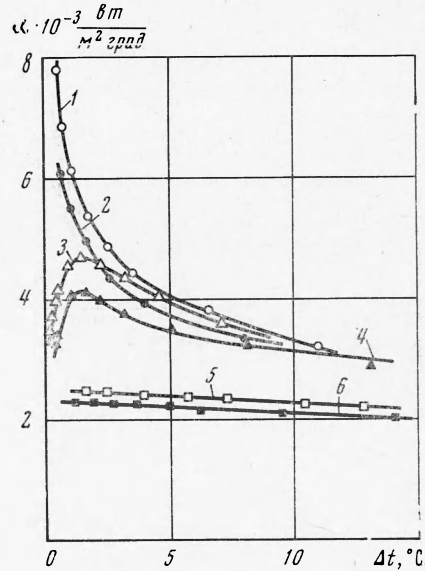
На фиг. 1 приведены шесть изотерм 1, 2, 3, 4, 5, 6, соответствующих температурам 46.05, 47.20, 48.20, 50.20, 54.00, 60.00° С, полученных в результате опытов с горизонтальной нитью. Серия изотерм для вертикальной нити была снята при температурах 46.05, 48.20, 50.20, 54.00 и 60.00° С.

Зависимость коэффициента теплообмена α от температурного напора по изобарам приведена на фиг. 2, где кривые 1, 3, 5 — опыты с горизонтальными нитями, кривые 2, 4, 6 — с вертикальными нитями, причем для кривых 1, 2 $p = 38.6$, $t = 46.05^\circ$, для кривых 3, 4 $p = 40.5$, $t = 48.20^\circ$ для кривых 5, 6 $p = 38.0$ бар, $t = 46.05^\circ$ С.

Как видно из фиг. 1 коэффициент теплообмена проходит через максимум. Чем больше температура камеры превышает критическую, тем ниже этот максимум и тем при более



Фиг. 1



Фиг. 2

высоких давлениях он наблюдается. На изотерме 46.05° С, т. е. на 0.5° выше критической температуры, величина α в восемь раз превышает то значение, которое имел бы коэффициент теплообмена при плавном и монотонном изменении с давлением. При удалении от критической точки на 15° величина α при таком сравнении отличается уже только в 1.5 раза.

Для вертикальной проволоки зависимость α от давления и температуры та же, что и для горизонтальной, но соответствующие максимальные величины примерно на 20% ниже. Максимальные значения коэффициента теплообмена для горизонтальных и вертикальных нитей приведены в табл. 1.

В координатах $p-t$ линия максимумов α соответствует продолжению за критическую точку кривой сосуществования жидкость-пар [3]. Можно наблюдать максимум коэффициента теплообмена и при изобарическом изменении состояния вещества. Опыты проведены при переменном температурном напоре по изобарам. При постоянном давлении определялась зависимость α от Δt . Оказалось, что при этом существенное

Таблица 1

$t, ^\circ\text{C}$	$\tau = \frac{T}{T_*}$	$P^*, \text{ бар}$		$\alpha \cdot 10^{-3} \text{ wt/m}^2\text{град}$	
		гор.	верт.	гор.	верт.
46.05	1.001	38.6	38.6	8.0	6.2
46.35	1.002	33.8	—	7.4	—
47.20	1.005	39.5	—	6.6	—
48.20	1.008	40.3	40.4	5.2	3.9
50.20	1.014	42.1	42.1	4.3	3.2
54.00	1.026	45.8	45.9	2.9	2.5
60.00	1.045	51.3	50.9	2.4	2.0

влияние оказывает выбор давления. Так, при давлении p^* , соответствующем максимуму α на кривой $\alpha(p)$ при данной температуре камеры, коэффициент теплообмена резко убывает с увеличением Δt (кривые 1 и 2 на фиг. 2). Если давление немного превышает p^* , на кривой $\alpha(\Delta t)$ имеется хорошо выраженный максимум (кривые 3 и 4 на фиг. 2). При более низком давлении, $p < p^*$, α изменяется с увеличением Δt слабо (кривые 5 и 6 на фиг. 2). Критериальная зависимость для свободной конвекции, как известно, имеет вид $N = C(R)^n$. Здесь N — число Нуссельта, R — число Рэлея, G — число Грасгофа, P — число Прандтля, C и n — эмпирические коэффициенты

$$R = GP = \frac{g\beta l^3 \rho^2 c_p \Delta t}{\eta \lambda}$$

Из этой зависимости видно, что коэффициент теплообмена пропорционален теплоемкости и коэффициенту термического расширения β . Экстремальное поведение c_p и β при критических переходах и вызывает усиление свободно-конвективного теплообмена. Сильная турбулентная конвекция вблизи критической точки наблюдалась в шестифтористой сере визуальными и фотографировалась. Картинки конвективных потоков похожи на фотографии, полученные в работе [4].

Резкое убывание α на изобарах (кривые 1, 2 на фиг. 2) происходит из-за того, что с ростом Δt растет определяющая температура, к которой следует отнести значения β и c_p . Они находятся при этой температуре уже на ниспадающей ветви изобары [5].

Таблица 2

p , мм Hg	Δt , °C	$Q_0 \cdot 10^{-3}$, вт	$Q \cdot 10^{-3}$, вт	ϵ_*	$\lg \epsilon_*$	R	$\lg R$
Вертикальная нить							
755	8.7	11.8	9.05	1.30	0.11	$3.6 \cdot 10^5$	5.56
	23.4	34.5	25.7	1.34	0.13	$8.3 \cdot 10^5$	5.92
	44.7	71.7	51.9	1.38	0.14	$13.7 \cdot 10^5$	6.14
202.5	9.9	11.8	10.5	1.13	0.05	$2.8 \cdot 10^4$	4.45
	26.7	34.6	29.5	1.17	0.07	$8.7 \cdot 10^4$	4.94
	50.8	71.7	60.4	1.19	0.08	$10.6 \cdot 10^4$	5.03
123	10.3	11.7	10.9	1.07	0.03	$1.08 \cdot 10^4$	4.03
	27.8	34.6	30.5	1.12	0.05	$2.56 \cdot 10^4$	4.40
	52.9	71.6	62.9	1.14	0.06	$4.03 \cdot 10^4$	4.60
63.0	10.7	11.7	11.4	1.03	0.02	$2.9 \cdot 10^3$	3.50
	29.6	34.6	33.0	1.05	0.02	$7.0 \cdot 10^3$	3.80
	56.3	72.0	67.4	1.07	0.03	$11.1 \cdot 10^3$	4.04
32.0	10.9	11.7	11.65	1.006	0.00	$0.8 \cdot 10^3$	2.90
	30.8	34.6	34.5	1.00	0.00	$1.9 \cdot 10^3$	3.28
	59.4	72.0	71.9	1.00	0.00	$2.9 \cdot 10^3$	3.46
Горизонтальная нить							
755	12.5	21.2	13.1	1.62	0.21	$3.2 \cdot 10^5$	5.50
	26.7	49.7	28.8	1.72	0.24	$9.5 \cdot 10^5$	5.98
	35.8	69.5	39.1	1.78	0.25	$12.0 \cdot 10^5$	6.08
203.0	15.0	21.3	15.9	1.34	0.13	$4.10 \cdot 10^4$	4.61
	32.3	50.2	36.7	1.37	0.15	$7.8 \cdot 10^4$	4.90
	42.2	68.3	48.4	1.41	0.15	$9.2 \cdot 10^4$	4.96
123	16.1	21.2	17.0	1.25	0.10	$1.60 \cdot 10^4$	4.21
	34.5	50.2	38.6	1.30	0.11	$3.00 \cdot 10^4$	4.48
	45.0	68.7	51.9	1.32	0.12	$3.63 \cdot 10^4$	4.60
63	18.00	21.7	19.3	1.11	0.05	$1.28 \cdot 10^3$	3.70
	38.0	51.5	43.9	1.17	0.07	$2.4 \cdot 10^3$	3.90
	50.0	71.6	65.0	1.20	0.08	$2.8 \cdot 10^3$	4.00
32	10.9	11.7	11.4	1.02	0.012	$0.77 \cdot 10^3$	2.89
	29.8	34.2	33.0	1.04	0.015	$1.82 \cdot 10^3$	3.26
	42.4	50.9	48.7	1.05	0.021	$2.35 \cdot 10^3$	3.37

Для критериальной обработки результатов опытов по теплообмену в SF_6 вблизи критической точки необходимо иметь сведения о теплофизических свойствах. Так как подобных данных почти нет, расчет по теории подобия был проведен только вдали от критической точки. Рассмотрены также условия, при которых в шестифтористой сере на данной установке возникает конвекция.

В данном случае исследуемый процесс можно рассматривать как передачу тепла в зазоре между коаксиальными цилиндрами. Поэтому за определяющий размер l взят радиус канала, равный 2 см. При отношении диаметров цилиндров $D/d = 1380$ критериальную обработку можно проводить так только при небольших давлениях. При давлении в 1 бар и ниже шестифтористую серу можно считать идеальным газом. Для расчета свойств можно воспользоваться уравнениями, справедливыми для идеального газа. За определяющую температуру брали среднеарифметическую по зазору. Коэффициент теплопроводности рассчитывается по формуле для сферических, неполярных молекул с применением потенциала Леннарда — Джонса [9]

$$\lambda_{10^7} = 1939 \frac{\sqrt{T/M}}{\sigma^2 \Omega^{(2.2)^*}(T^*)} \left(\frac{4}{15} \frac{c_v}{R^*} + \frac{3}{5} \right) \frac{\text{ккал}}{\text{см сек } ^\circ\text{К}}$$

Для определения коэффициента конвекции ε_* , равного λ_{eff}/λ , необходимо найти эффективный коэффициент теплопроводности λ_{eff} . В случае, если все тепло в зазоре между цилиндрами передавалось бы только посредством теплопроводности, имеем для теплового потока

$$Q = \frac{2\pi L \lambda \Delta t}{\ln(D/d)}$$

По аналогии с этим выражением для случая конвекции имеем

$$Q_0 = \frac{2\pi L \lambda_{eff} \Delta t}{\ln(D/d)}$$

Следовательно, $\lambda_{eff} = \lambda Q_0/Q$. Тепловой поток Q_0 и температурный напор Δt определяются из опытов, остальные величины будут параметрами установки.

Опытные значения коэффициентов конвекции, а также значения числа Рэлея R , в шестифтористой сере при атмосферном и более низких давлениях и $t = 26^\circ\text{C}$ приведены в табл. 2. Из результатов таблицы можно сделать несколько выводов. При данных параметрах установки конвекция в SF_6 существует вплоть до давления 30 мм рт.ст. Начинает сказываться конвекция при значениях числа Рэлея $R \geq 1000$, что согласуется с оценками этой величины другими авторами [7,8].

При одинаковом давлении и перепаде температуры коэффициент конвекции для вертикальной нити меньше, чем для горизонтальной. Полученные кривые $\lg \varepsilon_*$ ($\lg R$) не совпадают с кривой Михеева — Крауссольда, а идут значительно ниже. Подобный результат получен также и в некоторых других работах [9] и, как известно авторам, Р. В. Шингаревым в его кандидатской диссертации.

Поступила 23 IV 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаревич Л. А., Соколова Е. С., Сорина Г. А. Критические параметры шестифтористой серы. *Ж. Физ. хим.*, 1968, т. 42, № 1.
2. Дубровина Э. Н., Скрипов В. П. Конвективный теплообмен в закритической области углекислоты. Тепло- и массоперенос, Минск, «Наука и техника», 1965, т. 1.
3. Николаев Г. П., Скрипов В. П. Кризис кипения шестифтористой серы с приближением к критическому давлению. Атомная и молекулярная физика. Тр. Уральск. политехн. ин-та им. С. М. Кирова, Сб. 143, Свердловск, 1965.
4. Дубровина Э. Н., Скрипов В. П. Конвекция и теплообмен вблизи критической точки углекислоты. ПМТФ, 1965, № 1.
5. Скрипов В. П., Поташев П. П. Теплообмен с углекислотой вдоль закритических изотерм при свободной конвекции. *Инж. физ. ж.*, 1962, т. 5, № 2.
6. Гиршфельдер Дж., Кертис П., Бэрд Р. Молекулярная теория газа и жидкостей. М., Изд-во иностр. лит., 1961.
7. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М.—Л., Госэнергоиздат, 1949.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М., Гостехиздат, 1949.
9. Беркенгейм А. А. Исследование естественной конвекции в цилиндрических слоях жидкости. *Инж. физ. ж.*, 1966, т. 10, № 4.