Доклады Академии Наук СССР
1954. Том XCIX, № 5

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Л. Ф. ВЕРЕЩАГИН и Я. А. КАЛАШНИКОВ

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ВНУТРИ СТАЛЬНОГО СОСУДА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

(Представлено академиком С. А. Христиановичем 1 IX 1954)

В исследованиях, проводимых при высоких давлениях и температурах, обычно для достижения высоких температур либо стальной сосуд высокого давления нагревается извне, либо внутрь него помещается специальное нагревательное устройство (чаще всего печь сопротивления). Вследствие экспериментальных трудностей, возникающих при внутреннем обогреве, число работ, выполненных по этому методу, невелико.

Для решения важнейших вопросов, связанных с применением сверхвысоких давления и температуры, необходимо знание абсолютного значения температуры внутри сосуда высокого давления.

Интересно отметить, что все исследователи, применявшие внутренний нагрев, отмечали необходимость повышения мощности печи с ростом давления внутри сосуда. Так например, в работе ([1]) приводятся следующие данные о мощности печи в зависимости от давления для поддержания постоянной температуры, равной 600° в среде азота и водорода (см. табл. 1). Нагревательным элементом в этой работе служила платиновая спираль, и температура измерялась по изменению сопротивления самой рабочей проволоки, которая предварительно калибровалась. Несовершенство такого измерения очевидно. Падение температуры при постоянной мощности печи приписывалось увеличению теплопроводности газов под давлением.

Таблица 1

	Давление в кГ/см²						
	1	500	1000	2000	3000	5000	6000
	Мощность, вт						
Азот . .	44	82	110	145	165	192	200
Водород	54	143	183	235	265	308	325

Смит и Адамс ([2]), изучая плавление твердых веществ под давлением, применили внутренний обогрев, а в качестве среды, передающей давление, использовали CO_2. Температура измерялась термопарой, введенной внутрь бомбы, а нагрев осуществлялся платиновой спиралью. Эти авторы отметили любопытный факт, что при повышении давления зона высокой температуры находится в верхней части бомбы, а внизу температура много ниже. Горансон ([3]), продолжая работу Адамса при 1000° и 4000 атм., кроме того, нашел, что показания температур в таких условиях не остаются постоянными, а колеблются на десятки градусов около определенного среднего значения. Он приписал это конвективным потокам газа, но дальнейшего исследования не провел.

Эти явления не привлекли внимания последующих исследователей и не учитывались при работах с высокими давлениями и температурами. Понижение температуры с давлением при внутреннем обогреве объяснялось увеличением теплопроводности среды. Работы, проведенные в позднейшее время Столяровым, Ипатьевым и др. ([4, 5]), показали, что теплопроводность газов слабо зависит от давления, особенно при высоких температурах. Таким образом, приписать падение температуры с давлением

увеличению теплопроводности нельзя. Итак, до настоящего времени не было работ, в которых был бы рассмотрен вопрос о поле температур внутри стального сосуда, находящегося под высоким давлением.

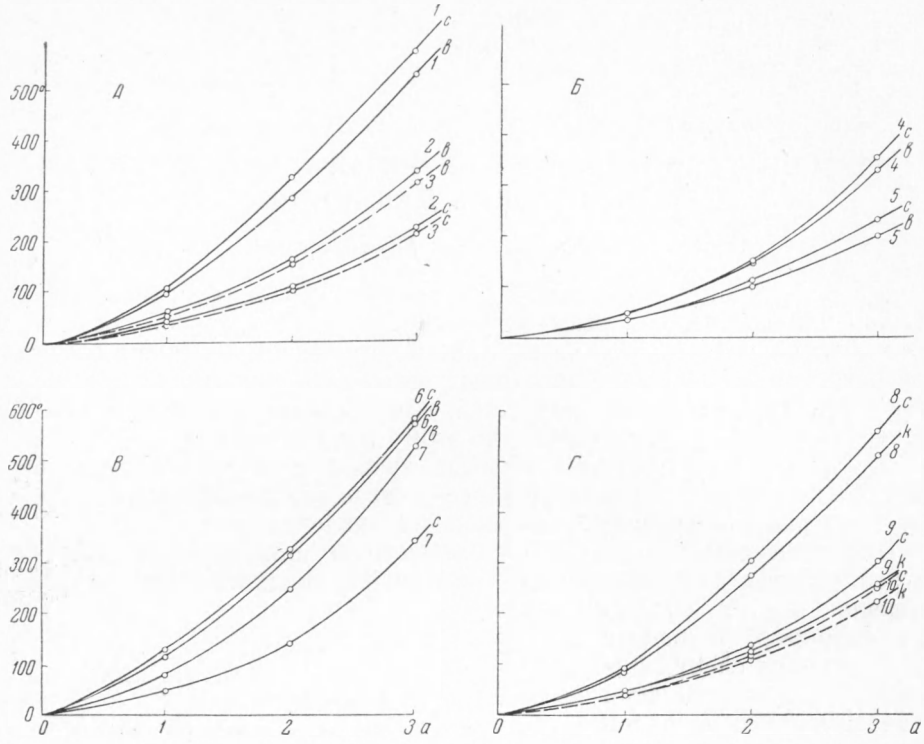


Рис. 1. Распределение температуры внутри сосуда в зависимости от давления и силы тока. *А* — среда азот, *Б* — среда водород, *В* — среда аргон, *Г* — среда азот. *с* — середина, *в* — верх, *к* — край. *1* — *P* = 1 кГ/см², *2* — 550 кГ/см², *3* — 1000 кГ/см², *4* — 1 кГ/см², *5* — 580 кГ/см², *6* — 1 кГ/см², *7* — 520 кГ/см², *8* — 1 кГ/см², *9* — 570 кГ/см², *10* — 1150 кГ/см²

Наша установка представляла трубчатую печь диаметром 8 мм с намоткой из проволоки из сплава № 2 диаметром 0,5 мм. Печь обмазывалась белой глиной и вставлялась в кварцевую трубку, которая входила в стальную бомбу высокого давления с зазором по отношению к внутренней поверхности бомбы около 0,15 мм. Давление создавалось одноступенчатым газовым компрессором сверхвысокого давления; ток подавался на печь через электроввод. Измерение температуры осуществлялось термопарами, введенными через специальный электроввод. Данные наших опытов, проводившихся при вертикальном и горизонтальном расположении стального сосуда, приведены ниже.

I. Сосуд в вертикальном положении

При заданной мощности измерялась температура в середине печи; температура наружной стенки равна 100°; средой в бомбе служил азот; сила тока 3 а.

P, кГ/см²	1	600	1300	2100
Т-ра, °С	692	483	447	418

Наиболее сильное падение температуры (более 200°) происходит при повышении давления с 1 до 600 кГ/см². При дальнейшем повышении давления до 2100 кГ/см² температура понижается всего на 65°.

В дальнейших опытах были введены две термопары: одна немного ниже верхнего конца нагревательной спирали, а другая в середине печи

(на 125 мм ниже верхней). Температура наружной стенки бомбы всегда поддерживалась $+6°$.

Среда — азот. Из рис. 1, *А* видно, что температуры разнятся по вертикали при $P = 550$ кГ/см², причем разность растет с увеличением абсолютной температуры и зона более высокой температуры переходит кверху. При $P = 1000$ кГ/см² немного понижаются абсолютные температуры, а показания верхней термопары становятся непостоянными. Необходимо заметить, что при силе тока $I = 2$ а температура непрерывно колеблется в пределах $\pm 5°$, при $I = 3$ а — в пределах $\pm 10°$; среда — водород (см. рис. 1, *Б*).

При $P = 600$ кГ/см² разность температур имеет ход, обратный ходу для азота (середина имеет более высокую температуру, чем верх), и сравнительно невелика. При $P = 600$ кГ/см² температура вверху непрерывно колеблется: для $I = 2$ а в пределах $\pm 7°$; для $I = 3$ а — в пределах $\pm 12°$. Средой служила смесь 24% $N_2 + 76\%$ H_2 (см. табл. 2).

Таблица 2

P, кГ/см²	I, а	Т-ра в °С		P, кГ/см²	I, а	Т-ра в °С	
		верх	серед.			верх	серед.
1	1	57	53	580	1	40	39
	2	170	174		2	123	117
	3	362	387		3	262	250

Для смеси $3H_2 + N_2$ разность температур имеет ход, характерный для азота, но абсолютное значение — как для водорода. При $P = 580$ кГ/см² температура вверху колеблется для $I = 2$ а в пределах $\pm 7°$; для $I = 3$ а в пределах $\pm 15°$. Средой в бомбе служил аргон (см. рис. 1, *В*). Опыты с аргоном проводились на печи с более частыми витками; термопары те же. Разница температур на аргоне еще больше, чем на азоте (опыты на азоте также проводились на данной печи, но в статье не приводятся из-за краткости сообщения).

II. Сосуд в горизонтальном положении

Печь и термопары были те же, что и при вертикальном положении. Температура наружной стенки бомбы поддерживалась $+6°$. Верхняя термопара в данном положении называется крайней.

Среда — азот (см. рис. 1, *Г*). Колебаний температуры ни в середине печи, ни на краю нет, разность температур обусловлена неравномерностью намотки.

Среда — водород (см. табл. 3). Колебаний температуры нет.

Таблица 3

P, кГ/см²	I, а	Т-ра в °С		P, кГ/см²	I, а	Т-ра в °С	
		край	серед.			край	серед.
1	1	44	42	590	1	35	35
	2	146	147		2	90	101
	3	315	343		3	182	224

Среда — смесь $3H_2 + N_2$ (см. табл. 4). Колебаний температуры нет.

Обсуждение результатов

Полученные результаты можно, повидимому, объяснить тем, что падение температуры в газовой среде с давлением при внутреннем обогреве и градиент ее по вертикали связаны с конвекцией.

Таблица 4

P, кГ/см²	l, а	Т-ра в °С		P, к Г/см²	l, а	Т-ра в °С	
		край	серед.			край	серед.
1	1	54	54	600	1	40	39
	2	162	169		2	102	115
	3	340	371		3	208	263

Как известно, характер температурного поля при наличии свободной конвекции предопределяется произведением критерия Грасгофа на критерий Прандтля ([6]).

Gr	Pr	Характер температурного поля
от 0,001 до	500	Ламинарный
от $5 \cdot 10^2$ до	$2 \cdot 10^7$	Локонообразный
от $2 \cdot 10^7$ до	$1 \cdot 10^{13}$	Вихревой

Критерий Прандтля для газов приблизительно равен единице и мало изменяется с давлением ([7]), так что с достаточно хорошим приближением можно считать, что изменение режима с давлением определяется лишь критерием Грасгофа $\mathrm{Gr} = \frac{gl^3\beta\Delta T\rho^2}{\eta^2}$, где g — ускорение силы тяжести; l — линейный размер (в данном случае диаметр трубки); β — коэффициент объемного расширения; T — разность температур в зоне нагрева; ρ — плотность среды; η — вязкость среды.

Здесь все величины, кроме ρ и η либо не зависят от давления либо очень слабо от него зависят. Для газов вязкость при достаточно высоких температурах слабо изменяется с давлением ([6], [8]). Таким образом, из всех величин, входящих в Gr, давление (для газов) существенно влияет только на плотность, которая увеличивается при повышении давления с 1 до 500 кГ/см² в сотни раз. Так как Gr пропорционально квадрату плотности, то при таком увеличении давления он меняется в десятки тысяч раз, и тепловой поток переходит от ламинарного к турбулентному различной интенсивности. Отсюда ясно, что при вертикальном положении печи тепло перемещается конвекционными потоками вверх. Колебания показаний верхней термопары можно объяснить тем, что она находится в области с очень резким градиентом температур (конец нагревательной спирали) и поэтому здесь при определенном для каждого газа давлении наступает вихревой режим раньше, чем во всей области нагрева.

Попытки объяснить «аномальное» по сравнению с аргоном, азотом и азото-водородной смесью поведение водорода результатами проведенных опытов встречают затруднения. Необходимо в дальнейшем измерить плотности газов и интенсивность конвекционных потоков.

В работе принимали участие В. Я. Володин и А. Ю. Кухарский, которым мы пользуемся случаем принести благодарность.

Московский государственный университет
им. М. В Ломоносова и
Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского
Академии наук СССР

Поступило
26 III 1954

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] J. Basset, C. R., **203**, 1338 (1936). [2] L. B. Smyth, L. H. Adams, J. Am. Chem. Soc., **45**, 1167 (1923). [3] R. W. Goranson, Am. J. Sci., **22**, 481 (1931). [4] Е. А. Столяров, В. В. Ипатьев, В. П. Теодорович, ЖФХ, **24**, 166 (1950). [5] Справочная книжка азотчика, 1944. [6] Справочник химика, **3**, 1952. [7] Е. А. Столяров, ЖФХ, **24**, 279 (1950). [8] И. Ф. Голубев, ЖТФ, **8**, 1932 (1938).