

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Э. Н. Дубровина, В. П. Скрипов, Н. А. Шуравенко, К вопросу о псевдокипении при свободной конвекции в дву-
окиси углерода, *ТВТ*, 1969, том 7, выпуск 4, 730–735

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.238.202.29

11 ноября 2024 г., 18:16:28



УДК 536.423.1:536.4

К ВОПРОСУ О ПСЕВДОКИПЕНИИ ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ В ДВУОКСИ УГЛЕРОДА

Э. И. Дубровина, В. И. Скрипов, Н. А. Шураченко

Излагаются результаты экспериментальных исследований теплообмена в области так называемого псевдокипения. Изучался теплообмен в условиях свободной конвекции от тонкой платиновой проволоочки к двуокиси углерода. Фотографии и измерения не подтверждают сходства с кипением.

Явление псевдокипения наблюдается в однофазном состоянии при давлении, значительно превышающем критическое. Другие условия его возникновения состоят в следующем. Температура греющей поверхности должна быть больше температуры, соответствующей максимуму теплоемкости, а температура жидкости существенно ниже критической. Псевдокипение возникает при больших плотностях теплового потока и сопровождается улучшением теплоотдачи, пульсациями давления, характерным шумом, а также малым изменением температуры стенки с увеличением теплового потока, характерным для процесса пузырькового кипения.

Впервые псевдокипение наблюдал при вынужденной конвекции Гольдмен [1], затем Хайнес и Вольф [2], Аладьев с сотрудниками [3, 4], Каффенгауз [5, 6] и др. В условиях свободной конвекции псевдокипение изучалось Саберским с сотрудниками [7, 8].

Нами проводились исследования теплообмена в области псевдокипения двуокиси углерода при свободной конвекции, фотографировались потоки, возникающие при этом у нагретой стенки. В качестве поверхности нагрева и термометра сопротивления применялась горизонтальная платиновая проволоочка диаметром 100 мк и длиной 80 мм. Она помещалась в толстостенную камеру по оси цилиндрического канала диаметром 40 мм. Подробное описание установки и методики измерений содержится в [9].

Двуокись углерода, используемая в опытах, тщательно очищалась от примесей методом вымораживания. Анализ по поглощению щелочью показал чистоту CO_2 не хуже 99,9%.

Проведены измерения коэффициента теплоотдачи и удельного теплового потока при давлениях 75, 80, 85 и 90 бар в зависимости от температуры проволоочки. Камера находилась при 0°C . Температура платиновой проволоочки изменялась от 0 до 300°C . Результаты этих измерений представлены на рис. 1. Из графика видно, что при некоторой температуре проволоочки коэффициент теплоотдачи имеет размытый максимум. Чем выше давление, тем при большей температуре проволоочки он наблюдается. Удельный тепловой поток с повышением температуры проволоочки t_c растет, как показано на рис. 2. При некоторой величине t_c на кривой $q(t_c)$ имеется точка перегиба. Нами не наблюдались осциллирующие, переходные режимы, замеченные Кеннемом и Саберским [8].

Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры проволоочки, полученная в наших опытах, качественно объясняется поведением теплофизических свойств CO_2 в закритической области: теплоемкости c_p , ко-

$p = 75 \text{ бар}$				$p = 90 \text{ бар}$			
$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кдж/кг}\cdot\text{град}$	$\beta, \text{град}^{-1}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кдж/кг}\cdot\text{град}$	$\beta, \text{град}^{-1}$
0	957	2,01	0,006	0	967	1,95	0,0053
10	897	2,33	0,008	10	911	2,20	0,0067
20	818	2,95	0,012	20	843	2,62	0,0093
30	672	6,90	0,042	30	745	3,65	0,0168
30,5	657	8,05	0,051	32	718	4,12	0,0205
31,0	638	10,10	0,067	39	540	12,30	0,0915
31,5	412	139,0	1,280	39,5	513	13,60	0,104
32,0	339	16,3	0,146	40,0	487	14,0	0,1102
32,5	319	11,0	0,097	40,5	461	13,3	0,106
40	233	3,26	0,024	41,0	438	12,0	0,0967
50	195	2,19	0,014	50	287	3,63	0,0257
100	130	1,31	0,005	100	164	1,44	0,0060
200	90	1,12	0,0036	200	109	1,15	0,0036
300	71	1,12	0,0036	300	85	1,15	0,0036

* Этот расчет по нашей просьбе выполнил ст. научн. сотр. МЭИ Г. А. Спиридонов.

коэффициента термического расширения β , теплопроводности и вязкости. В таблице приведены некоторые свойства CO₂ в исследованном районе. Для расчета этой таблицы было использовано уравнение состояния CO₂, полученное в [10]. Это уравнение хорошо описывает экспериментальные данные разных авторов. Расчет данных таблицы сделан на ЭЦВМ М-20*. Из таблицы видно, что теплоемкость и коэффициент термического расширения β сначала сильно возрастают с температурой, проходят через мак-

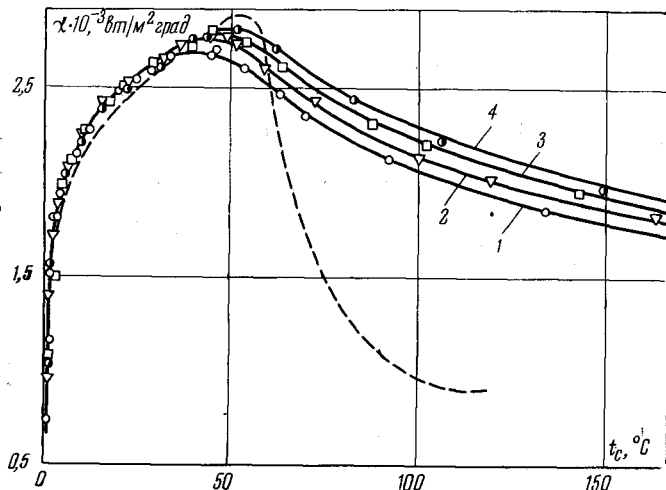


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры проволоки по различным изобарам, бар:

1 — 75; 2 — 80; 3 — 85; 4 — 90

симум, а затем быстро уменьшаются. Плотность ρ меняется монотонно. Наибольшее ее изменение происходит при температурах, соответствующих максимальным значениям c_p и β . Теплопроводность и вязкость также изменяются монотонно [11, 12].

Параллельно с тепловыми измерениями проводилось фотографирование конвективных потоков у нагретой нити. Использовался обычный те-

новой метод. Осветителем служил точечный источник мощностью 20 вт. Снимки получены на высокочувствительной пленке ВЧ фотоаппаратом «Старт» и объективом «Юпитер-9», время экспозиции 1 мсек.

На рис. 3 представлены фотографии процесса кипения двуокиси углерода вблизи критической точки ($t = 29^\circ \text{C}$, $p = 70,5 \text{ бар}$), диаметр проволоочки в этом случае 30 мк. Типичное пузырьковое кипение показано на рис. 3, а. Диаметр пузырьков очень мал. С увеличением удельного теп-

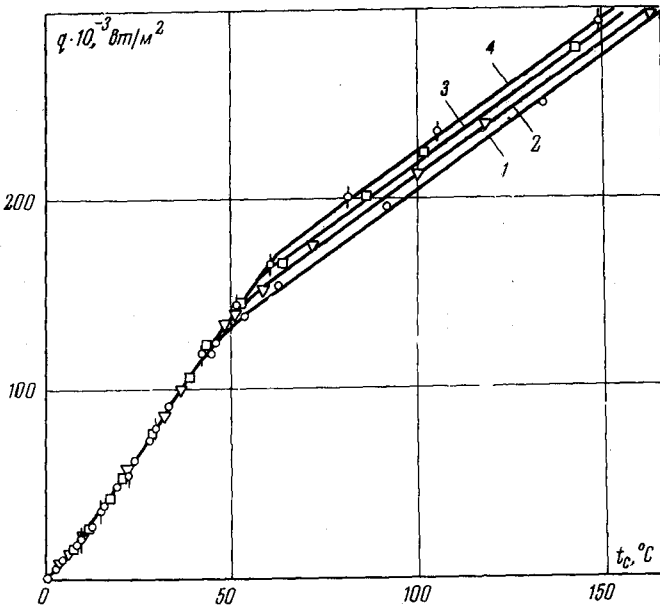


Рис. 2. Зависимость удельного теплового потока от температуры проволоочки по изобарам, бар:

1 — 75; 2 — 80; 3 — 85; 4 — 90

лового потока наступает кризис кипения (пузырьковое кипение переходит в пленочное), что иллюстрируется фотографиями 3, б и 3, в. На рис. 3, г видно образование пленки пара в момент подачи напряжения на проволоочку. Подобные снимки пузырькового и пленочного кипения в сжатой двуокиси углерода были получены Григуллем [13] на проволочке диаметром 100 мк. Эта серия фотографий сделана нами для последующего сравнения с фотоснимками в сверхкритической однофазной области. На рис. 4, а и 4, б представлены типичные снимки конвективных потоков в области однофазных состояний. Температура жидкости 0°C , давление 90 бар, температура проволоочки ~ 300 и 500°C . Эти условия аналогичны тем, при которых в работах [8, 14] наблюдались процессы, называемые их авторами псевдокипением. Совершенно аналогичные картины получаются на изобарах 75, 80 и 85 бар. Видно, что никакого сходства с пузырьковым или пленочным кипением не наблюдается.

Обсуждение результатов. Наши экспериментальные данные показывают, что немонотонный ход коэффициента теплоотдачи при закритических давлениях связан с особенностями свободно-конвективного теплообмена около нагретой проволоочки. Они обусловлены наличием на изобарах $p > p_k$ максимумов теплоемкости, коэффициента термического расширения и сжимаемости. С увеличением температуры проволоочки при неизменной температуре ядра жидкости растет эффективная средняя температура жидкости в тепловом пограничном слое.

Попытаемся описать экспериментальные результаты уравнением

$$\text{Nu} = 1,18(\text{Gr} \cdot \text{Pr})^{1/8}, \quad (1)$$

структура которого типична для процессов теплообмена при свободной конвекции. Введем в рассмотрение тепловой пограничный слой толщины δ . Примем степенной закон изменения температуры в пограничном слое:

$$t(x) = [t_c - bx^n] = t_c[1 - (x/\delta)^n]. \quad (2)$$

Здесь x — расстояние от поверхности проволоочки в радиальном направлении.

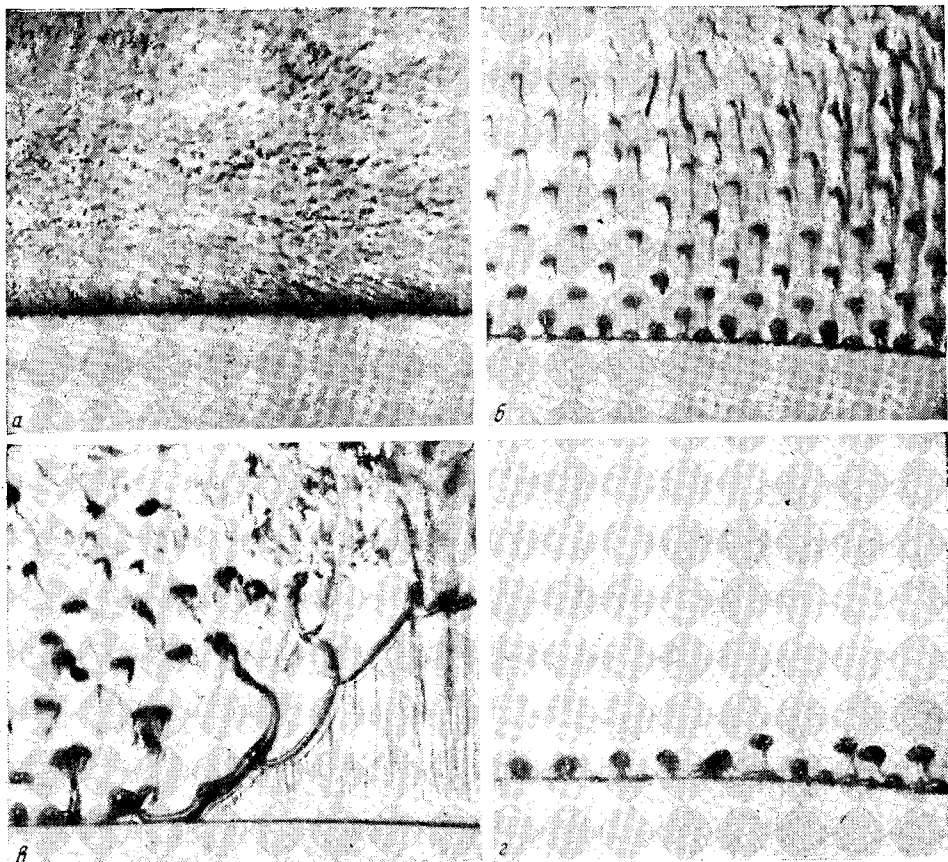


Рис. 3. Кипение в двуокиси углерода вблизи критической точки:

a — пузырьковое кипение; *б, в* — пленочное кипение; *г* — образование пленки пара у проволоочки в момент включения тока

Выражению (2) соответствует следующая среднеинтегральная температура вещества в пограничном слое:

$$\bar{t} = nt_c / (n + 1). \quad (3)$$

Для определения n предположим, что максимум коэффициента теплоотдачи имеет место при средней температуре в пограничном слое, совпадающей с температурой, при которой достигает максимума теплоемкость.

Рассмотрим в качестве примера изобару $p = 90$ бар. Для нее максимум α приходится на температуру $t_c = 52^\circ \text{C}$, а c_p достигает максимума при 40°C . При сделанном допущении имеем $\bar{t} = 40^\circ \text{C}$, тогда из (3) находим $n = 3$, $\bar{t} = 3/4t_c$.

На рис. 1 штриховой линией показаны результаты расчета по уравнению (1) для изобары 90 бар. Удовлетворительное согласие с опытом по-

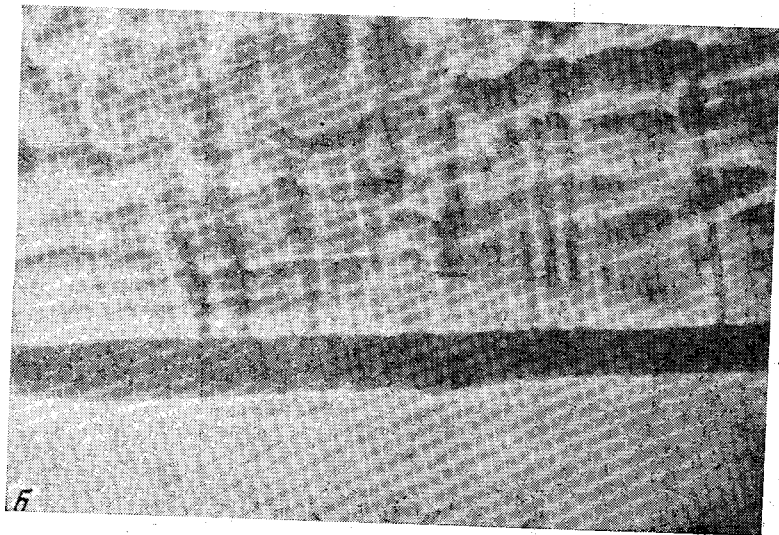
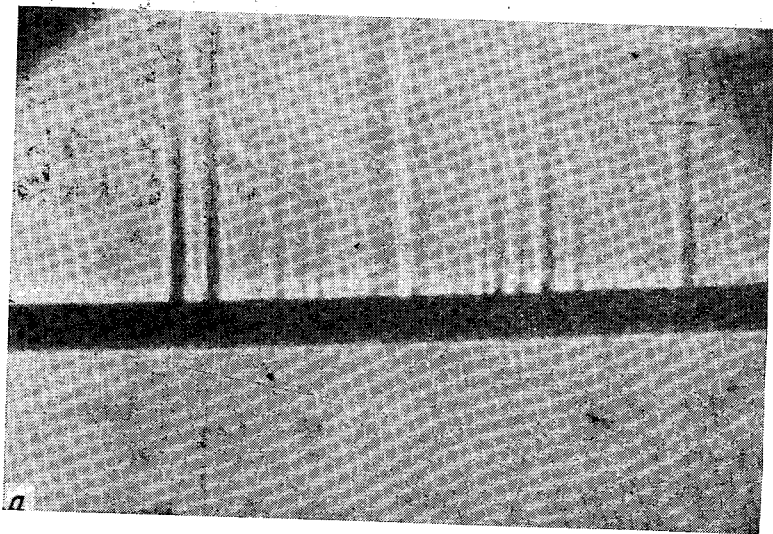


Рис. 4. Конвективные потоки в двуокиси углерода в области ожидаемого псевдокипения, °С:
а — $\Delta t \approx 300$; б — $\Delta t \approx 500$

лучается только для левой ветви кривой. После прохождения максимума рассчитанные значения проходят значительно ниже экспериментальных. Это несоответствие можно объяснить следующим образом. Для $t_c > 52^\circ\text{C}$ определяющая температура оказывается выше температуры максимума ρ и β . На интервале t_c , \bar{t} свойства вещества изменяются немонотонно. Внутри указанного интервала оказывается слой, способствующий интенсификации теплообмена, но уравнением (1) влияние этого слоя не учитывается. Здесь мы сталкиваемся с необходимостью видоизменить уравнение, однако пока неясно, каким образом это сделать.

Из фотографий также видно, что вблизи проволоочки существуют ламинарные или турбулентные конвективные потоки. Контрастность этих потоков зависит от разности температур проволоочки и ядра жидкости и от близости к критической точке.

Термин «псевдокипение» нельзя признать удачным, так как он предполагает существование двухфазной системы, невозможное при давлениях выше критического. Некоторые авторы [2, 5] обходят эту трудность, допуская существование в потоке больших турбулентных пульсаций давления. При вынужденной конвекции могут возбуждаться интенсивные колебания в ячейке на некоторых собственных частотах. В наших опытах не происходило заметных пульсаций давления. Чтобы при 90 бар могло возникнуть кипение (появление на короткое время пузырьков пара), величина пульсаций давления должна быть около 20 бар.

Наблюдаемое в опытах изменение свободно-конвективного теплообмена при $p > p_k$ происходит так, как это можно ожидать из обычных представлений. Нужно только учитывать немонотонный характер зависимости теплофизических свойств вещества в закритической области. При движении в трубах, по-видимому, возникают дополнительные явления, которые усложняют зависимость коэффициента теплоотдачи от температуры стенки [15].

Авторы благодарят Б. С. Петухова, Е. А. Краснощекова, М. Е. Шицмана и П. А. Павлова за полезное обсуждение результатов.

Уральский филиал
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
2 I 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Goldman. Trans. ASME, 76, 84, 1954.
2. Хайнес, Вольф. Ракетная техника, № 3, 1962.
3. И. Т. Аладьев, Л. И. Малкина, П. И. Поварнин, Инж.-физ. ж., № 10, 1963.
4. И. Т. Аладьев, П. И. Поварнин, Л. И. Малкина, Е. Ю. Меркель. Тепло- и массоперенос, 1. «Наука и техника», Минск, 1965, стр. 59.
5. Н. Л. Кафенгауз. Докл. III Всес. совещ. по тепло- и массообмену. Минск, 1968.
6. Н. Л. Кафенгауз. Инж.-физ. ж., № 5, 1968.
7. J. D. Griffith, R. H. Sabersky. ARS J., № 30, 289, 1960.
8. K. K. Knapp, R. H. Sabersky. Int. J. Heat Mass Transfer, 9, 41, 1966.
9. Э. Н. Дубровина, В. П. Скрипов. Тепло- и массоперенос, 1. «Наука и техника», Минск, 1965, стр. 40.
10. М. П. Вукалович, В. В. Алтунин, Г. А. Спиридонов. Теплофизика высоких температур, 3, № 2, 1967.
11. Н. В. Цедерберг. Теплопроводность газов и жидкостей. Госэнергоиздат, 1963.
12. Н. Ф. Голубев. Вязкость газов и газовых смесей. Физматгиз, 1959.
13. У. Григулль. Тепло- и массоперенос, 3. «Наука и техника», Минск, 1965, стр. 343.
14. Гольдштейн, Вин Онг. Теплопередача, № 1, 1968.
15. М. Е. Шицман. Теплоэнергетика, № 5, 1968.