

Рис. 2. Динамика изменения фронта фазового перехода при регенеративном теплообмене в основании холодильника:
1 — расчетные данные; 2 — данные натуральных испытаний.

Следует отметить некоторое запаздывание изменения положения фронта фазового перехода при смене цикла охлаждения на обогрев, что объясняется тепломи инерцией подстилающего слоя.

Проведенные натурные испытания подтверждают эффективность использования регенеративных теплообменных процессов, что позволяет в период устойчивых морозов отключаться от побочных энергетических источников и тем самым сократить затраты тепловой энергии. В условиях проведенного эксперимента экономия тепловой энергии составила 21% от общего годового потребления энергии на обогрев грунта. Для районов средней полосы и северных эта экономия будет, естественно, выше.

Сравнимость экспериментальных и расчетных данных свидетельствует о возможности применения разработанной методики для расчета регенеративных теплообменных процессов в системах защиты грунта в основании зданий холодильников при периодической утилизации тепла холодильных установок.

УДК 660.42.01+661.97.001

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ВЫМОРАЖИВАНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ИЗ ГАЗОВОЙ СМЕСИ НА ТОЛЩИНУ И ПЛОТНОСТЬ ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ СЛОЯ

Канд. техн. наук В. Н. ЩЕЛКУНОВ,
Н. З. РУДЕНКО

Необходимость в оценке влияния тех или иных факторов на процесс вымораживания CO_2 из газовой смеси $\text{N}_2 - \text{CO}_2$, в частности, на такие характеристики

образующегося слоя вымороженного CO_2 , как толщина и плотность, а также на динамику их изменения вызвана потребностью оптимизации различных вымораживающих устройств.

Несмотря на актуальность данной проблемы, подробных исследований в этом направлении не проводилось. В работе [5] в довольно узком диапазоне рассмотрено влияние скорости газового потока, объемного содержания CO_2 в смеси и переохлаждения охлаждаемой поверхности экспериментальной пластины на плотность слоя вымороженного CO_2 . Исследования, посвященные вымораживанию влаги из воздушной среды [3, 7, 9, 10], дают лишь общие предположения о влиянии температуры вымораживающей поверхности, влажности и скорости воздушного потока на процесс вымораживания. Приведенные в [1, 2, 8] эмпирические зависимости позволяют оценивать толщину и плотность инея только в оребренных воздухоохладителях.

Цель настоящей работы — определить влияние таких параметров, как давление газовой смеси $p_{г.г}$, объемное содержание CO_2 в ней $C_{г.г}$, скорость газового потока $v_{г.г}$, переохлаждение поверхности пластины $T_s - T_d$ и перегрев газового потока $T_{г.г} - T_s$ по отношению к равновесной температуре фазового перехода диоксида углерода T_k , на толщину δ и плотность ρ вымороженного слоя CO_2 и установить соотношения, описывающие их в зависимости от времени и условий вымораживания.

Данные исследования являются продолжением проведенного ранее анализа характеристик процесса вымораживания CO_2 из потоков газовых смесей на горизонтально расположенной охлаждаемой медной пластине размером $56 \times 56 \times 4,5$ мм [6]. При этом экспериментальная установка и методика проведения опытов были те же.

Определяющие параметры изменяли в пределах: $0,1 \leq p_{г.г} \leq 0,7$ МПа; $0,26 \leq C_{г.г} \leq 8,8\%$; $0,5 \leq v_{г.г} \leq 7$ м/с; $4,7 \leq T_s - T_d \leq 83,9$ К; $10,3 \leq T_{г.г} - T_s \leq 106,3$ К.

Влияние того или иного параметра на рассматриваемые характеристики определяли при прочих фиксированных. Результаты опытов сравнивали по осредненным по поверхности пластины значениям толщины δ и плотности ρ слоя вымороженного CO_2 . Кривые, отражающие изменение их значений для различных моментов времени в зависимости от одного из определяющих параметров, приведены на рис. 1—5. Здесь же для удобства анализа показаны соответствующие изменения плотно-

стей теплового q и массового m потоков CO_2 , поступающих к поверхности слоя.

Кроме того, в таблице для момента времени $\tau=0,5$ ч представлены значения величин, необходимых при анализе: температуры поверхности вымороженного слоя T_s ; ее переохлаждения $T_k - T_s$; градиента парциальных давлений CO_2 в вымороженном слое $(p'_{\text{CO}_2} - p_{\text{CO}_2})/\delta$ (p_{CO_2} и p'_{CO_2} — давления насыщенных паров CO_2 соответственно при температурах T_s и T_k); перепада парциальных давлений CO_2 газового потока и поверхности слоя $p_{\text{CO}_2} - p'_{\text{CO}_2}$; а также величины $D\text{Re}^{0,5}$, пропорциональной коэффициенту массообмена β , и величины $D\text{Re}^{0,5} (p'_{\text{CO}_2} - p_{\text{CO}_2})$, пропорциональной плотности массового потока m к поверхности слоя (D — коэффициент взаимной диффузии газовой смеси; Re — число Рейнольдса).

В качестве первого определяющего параметра рассмотрена температура газового потока $T_{г.п.}$. Как следует из рис. 1, с увеличением перепада температур $T_{г.п.} - T_k$ толщина слоя уменьшается, а его плотность растет.

Механизм воздействия температуры газового потока на процесс вымораживания CO_2 представляется следующим образом. Повышение $T_{г.п.}$ приводит к возрастанию

q , увеличивая скорость повышения T_s во времени. Более высоким значениям T_k для одного и того же момента времени соответствуют, естественно, меньшие перепады парциальных давлений $p_{\text{CO}_2} - p'_{\text{CO}_2}$ над слоем и большие $p_{\text{CO}_2} - p'_{\text{CO}_2}$ внутри пористой структуры вымороженного диоксида углерода (см. таблицу). В связи с тем что коэффициент β с ростом $T_{г.п.}$ изменяется незначительно, первый фактор приводит к снижению плотности массового потока m , следовательно, толщины слоя δ , а второй — к интенсификации процесса перекристаллизации молекул CO_2 в глубь вымороженного слоя, т. е. к росту его плотности ρ .

В ходе наблюдений установлено, что повышение температуры газового потока оказывает существенное влияние на структуру слоя вымороженного CO_2 . С возрастанием $T_{г.п.}$ размеры кристаллов уменьшались, а плотность их укладки возрастала.

Анализ динамики значений δ и ρ показал наибольшие их изменения в первые 30 мин процесса вымораживания. После 2 ч, когда $T_s \approx T_k$, перепады давлений $p_{\text{CO}_2} - p'_{\text{CO}_2}$ и $p_{\text{CO}_2} - p'_{\text{CO}_2}$ изменяются незначительно, происходит мойотонный рост толщины и плотности слоя (см. [6]).

Определяющий параметр	$T_{г.п.}, \text{K}$	T_s, K	$T_k - T_s, \text{K}$	$(p_{\text{CO}_2} - p'_{\text{CO}_2})/\delta$ кПа/мм	$p_{\text{CO}_2} - p'_{\text{CO}_2}$ кПа	$\beta \sim D\text{Re}^{0,5}$	$m \sim D\text{Re}^{0,5} (p'_{\text{CO}_2} - p_{\text{CO}_2})$
$T_{г.п.} - T_k, \text{K}$	10,3	156,5	6,2	0,55	2,34	8,84	20,69
	30,3	158,4	4,3	0,95	1,75	9,46	16,56
	55,3	159,8	2,9	1,76	1,35	10,15	13,70
	80,3	160,9	1,8	2,48	0,85	10,70	9,10
$p_{г.п.}, \text{МПа}$	0,1	158,4	4,3	0,95	1,75	9,46	16,56
	0,3	159,5	2,6	1,75	1,17	5,45	6,37
	0,5	159,8	1,9	2,7	0,88	4,2	3,71
	0,7	160,0	1,3	3,91	0,61	3,53	2,15
$C_{\text{CO}_2}, \%$	0,87	145,1	5,1	0,43	0,35	8,75	3,06
	4,35	158,4	4,3	0,95	1,75	9,46	16,56
	6,15	161,7	4,0	1,30	2,28	9,69	22,10
	8,76	165,0	3,8	1,66	3,08	9,78	30,14
$v_{г.п.}, \text{м/с}$	1	155,8	6,9	0,74	2,52	5,44	13,71
	3	158,4	4,3	0,95	1,75	9,46	16,56
	5	159,7	3,0	1,22	1,31	12,25	16,05
	7	160,7	2,0	1,56	0,81	14,51	11,75
$T_k - T_{г.п.}, \text{K}$	4,7	162,0	0,7	2,58	0,36	9,63	3,47
	17,7	158,4	4,3	0,95	1,75	9,46	16,56
	44,7	153,5	9,2	0,36	2,99	9,23	27,60
	83,9	145,5	17,2	0,096	3,91	9,12	35,67

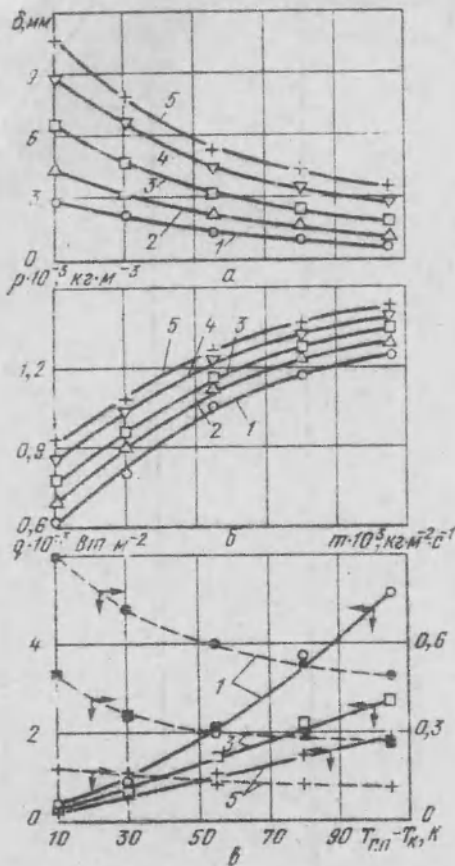


Рис. 1. Зависимость толщины (а) и плотности (б) слоя вымороженного CO_2 , плотностей теплового и массового потоков (в) от перегрева газовой смеси при $v_{г.п} = 3$ м/с, $p_{г.п} = 0,1$ МПа, $C_{\text{CO}_2} = 4,35\%$, $T_{п} = 145$ К:

1 — $t = 0,5$ ч, 2 — $t = 1$ ч, 3 — $t = 2$ ч, 4 — $t = 4$ ч, 5 — $t = 6$ ч

Сходящийся характер кривых $q = f(T_{г.п} - T_k)$ и $m = f(T_{г.п} - T_k)$ является следствием различной интенсивности роста температуры поверхности слоя во времени.

Аналогичное $T_{г.п}$ влияние на рассматриваемые характеристики оказывает увеличение давления газовой смеси (рис. 2). В первую очередь это обусловлено повышением интенсивности роста T_s (см. таблицу) в результате увеличения q . Кроме того, с повышением $p_{г.п}$ снижается β (из-за падения коэффициента взаимной диффузии смеси D), что, со своей стороны, приводит к уменьшению массопереноса CO_2 к вымораживаемому слою. Так, при повышении $p_{г.п}$ от 0,1 до 0,7 МПа толщина слоя (для одинаковых моментов времени) уменьшает-

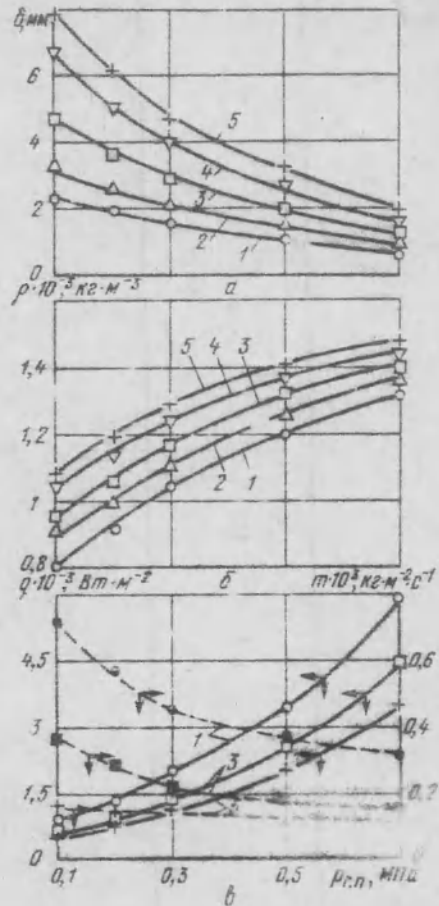


Рис. 2. Зависимость толщины (а) и плотности (б) слоя вымороженного CO_2 , плотностей теплового и массового потоков (в) от давления газовой смеси при $v_{г.п} = 3$ м/с, $p_{\text{CO}_2} = 4,35$ кПа, $T_{п} = 145$ К, $T_{г.п} = 193$ К (обозначение кривых см. на рис. 1)

ся в 3—4 раза, а его плотность возрастает на 30—60%, приближаясь к плотности сухого льда (рис. 2, а, б). С повышением давления смеси размеры кристаллов CO_2 уменьшались, а плотность их укладки возрастала.

В ходе опытов отмечена зависимость равновесной температуры фазового перехода CO_2 от давления смеси [2]. Так, при $p_{г.п} = 0,1$ МПа для $p_{\text{CO}_2} = 4,35$ кПа она составляла 162,7 К, а при $p_{г.п} = 0,7$ МПа для тех же значений p_{CO_2} — 161,3 К.

Повышение объемного содержания CO_2 в смеси при одновременном поддержании постоянства перепадов температур $T_{г.п} - T_k$ и $T_k - T_{г.п}$, как показывает анализ экспериментальных данных (см. таблицу), вызы-

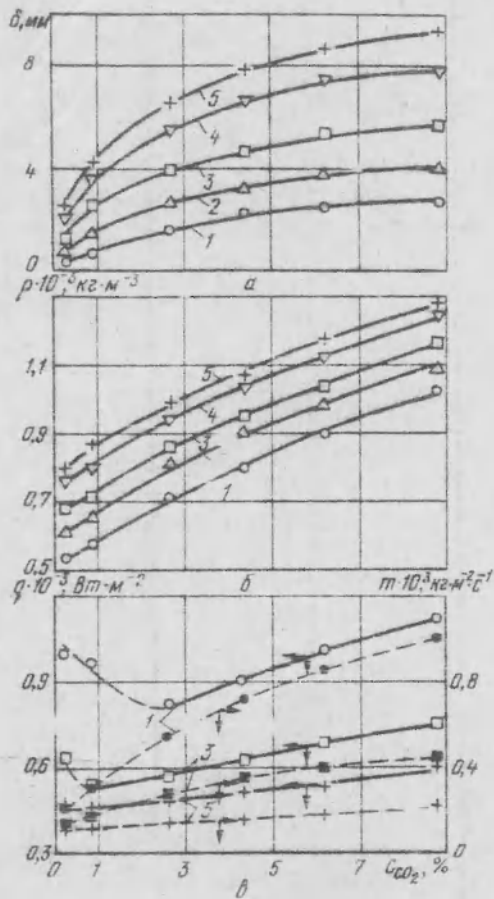


Рис. 3. Зависимость толщины (а) и плотности (б) слоя вымороженного CO_2 , плотностей теплового и массового потоков (в) от объемного содержания CO_2 в газовой смеси при $v_{r,n} = 3$ м/с, $p_{r,n} = 0,1$ МПа, $T_k - T_n = 17,7$ К, $T_{r,n} - T_k = 30,3$ К (обозначение кривых см. на рис. 1)

вает увеличение разности парциальных давлений CO_2 над слоем вымороженного CO_2 и внутри него. Возрастающие в связи с этим плотность массового потока m и переконденсация молекул CO_2 в глубь слоя приводят к росту как его толщины, так и плотности (рис. 3).

Постоянство перепадов температур $T_{r,n} - T_k$ и $T_k - T_n$ в случае линейной зависимости давления насыщенных паров CO_2 $p_{CO_2}^*$ от температуры означало бы постоянство плотности массового потока и, как следствие, отсутствие эффекта от увеличения значений C_{CO_2} . Однако в связи с тем что зависимость $p_{CO_2}^* = f(T)$ в рассматриваемом диапазоне температур отличается значительной крутизной, перепад парциаль-

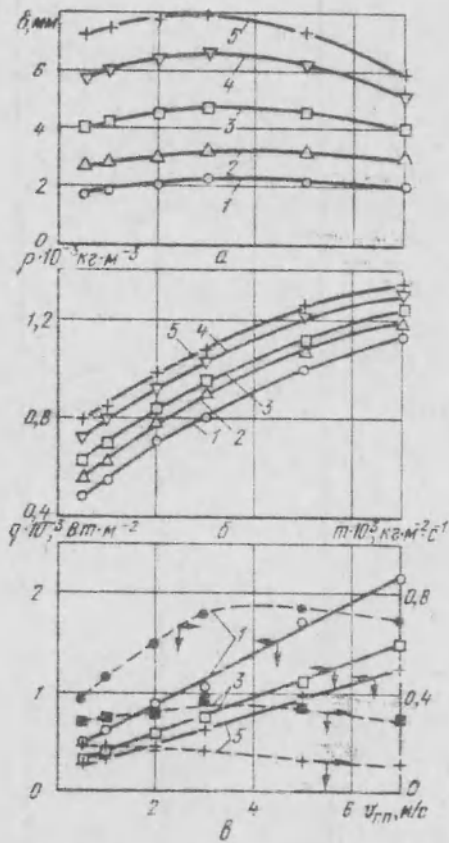


Рис. 4. Зависимость толщины (а) и плотности (б) слоя вымороженного CO_2 , плотностей теплового и массового потоков (в) от скорости газового потока при $p_{r,n} = 0,1$ МПа, $C_{CO_2} = 4,35$ %, $T_n = 145$ К, $T_{r,n} = 193$ К (обозначение кривых см. на рис. 1)

ных давлений p_{CO_2} — p'_{CO_2} и соответственно плотность массового потока m с увеличением C_{CO_2} возрастают.

Плотность теплового потока q в силу постоянства перепадов температур $T_{r,n} - T_k$ и $T_k - T_n$ варьирует во всем исследованном диапазоне значений C_{CO_2} незначительно (рис. 3, в), что, в свою очередь, приводит к невысокой скорости роста T_n при повышении C_{CO_2} , о чем свидетельствует малое изменение $T_k - T_n$ (см. таблицу).

Повышение q в опытах с небольшим объемным содержанием CO_2 (кривые 1, 3) не сказалось на интенсивности роста T_n во времени. Так как данный эффект характерен для опытов, в которых слой вымороженного CO_2 не был сплошным (в слое

имелись сквозные поры), то, очевидно, он связан с образованием вихрей в полостях, приводящим к возрастанию доли конвективной составляющей в суммарном тепловом потоке, по водимом к пластине.

Монотонное снижение скорости роста толщины δ при $C_{CO_2} > 2,6\%$ обусловлено, с одной стороны, соответствующим характером изменения плотности массового потока, а с другой — увеличением плотности слоя.

С повышением значения C_{CO_2} наблюдалось увеличение размеров кристаллов. Если при $C_{CO_2} = 0,26\%$ их размеры не превышали $0,1$ мм, то при $C_{CO_2} = 8,8\%$ они составляли $0,7 - 0,8$ мм.

Кривые рис. 4 иллюстрируют зависимость рассматриваемых характеристик от скорости газового потока $v_{г.п.}$

Особый интерес представляет влияние $v_{г.п.}$ на массоперенос и связанное с ним изменение толщины слоя вымороженного CO_2 . Как следует из анализа данных, приведенных в таблице, увеличение $v_{г.п.}$ приводит, с одной стороны, к повышению коэффициента массообмена β , а с другой — к более высоким значениям T_s вследствие роста q и, следовательно, к снижению перепада парциальных давлений $p_{CO_2} - p'_{CO_2}$. В интервале $0 < v_{г.п.} < 3$ м/с с ростом скорости уменьшение $p_{CO_2} - p'_{CO_2}$ компенсируется повышением β так, что плотность массового потока m возрастает. При значениях $v_{г.п.} > 3$ м/с увеличение β не компенсирует убывающий перепад парциальных давлений $p_{CO_2} - p'_{CO_2}$ и значения m падают с ростом скорости газового потока. Таким образом, максимальные значения δ и m при $v_{г.п.}$ около 3 м/с являются результатом различия интенсивности изменения с ростом $v_{г.п.}$ значений β и $p_{CO_2} - p'_{CO_2}$.

Срыва кристаллов с поверхности вымороженного слоя при $v_{г.п.} > 3$ м/с, с чем в работе [1] связывается уменьшение его толщины, не наблюдалось. Специальными исследованиями, проведенными авторами, установлено, что данное явление происходит только при скачкообразном повышении скорости газового потока. При этом толщина слоя сначала уменьшается, а затем снова возрастает.

Повышение плотности слоя с увеличением $v_{г.п.}$ (рис. 4, б) обусловлено, как и в предыдущих случаях непрерывным ростом градиента парциальных давлений CO_2 внутри замороженного слоя (см. таблицу).

Увеличение плотности вымороженного слоя при повышении $v_{г.п.}$ отмечали многие исследователи [3, 5, 7, 8, 10]. Как показали наблюдения, изменение скоростного режи-

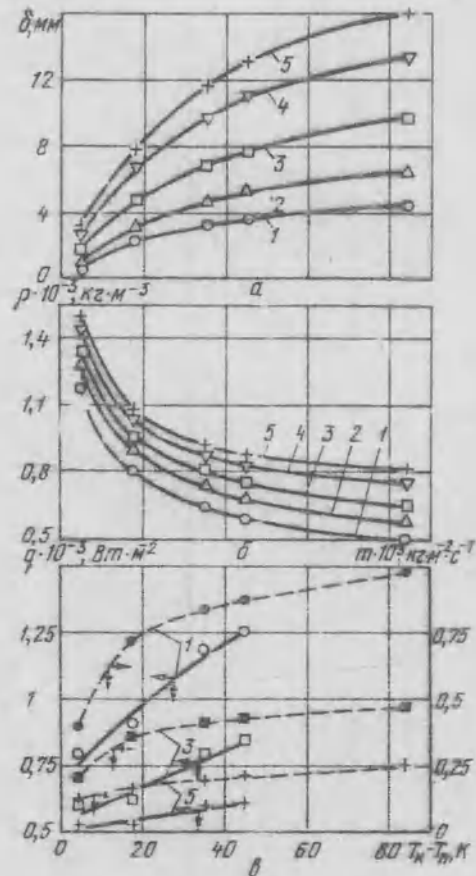


Рис. 5. Зависимость толщины (а) и плотности (б) слоя вымороженного CO_2 , плотностей теплового и массового потоков (в) от переохлаждения пластины при $v_{г.п.} = 3$ м/с, $p_{г.п.} = 0,1$ МПа, $C_{CO_2} = 4,35\%$, $T_{г.п.} = 193$ К (обозначение кривых см. на рис. 1)

ма оказывает большое влияние на структуру вымороженного CO_2 . Например, если при $v_{г.п.} = 0,5$ м/с образовывался рыхлый слой, состоящий из крупных кристаллов размерами $1 - 1,3$ мм, между которыми были видны сквозные поры, то при $v_{г.п.} = 7$ м/с размеры кристаллов не превышали $0,2 - 0,3$ мм, визуально различимые поры исчезали через 15 мин и поверхность слоя становилась гладкой.

Переохлаждение поверхности пластины $T_k - T_n$ оказывает по сравнению с остальными определяющими параметрами наибольшее влияние на значения δ и q (см. рис. 5).

Снижение температуры вымораживающей поверхности приводит к увеличению перепада парциальных давлений $p_{CO_2} - p'_{CO_2}$, что обуславливает рост плотности мас-

сового потока m и, следовательно, толщины слоя δ . Одновременное увеличение плотности теплового потока q определяет более высокую скорость повышения температуры T_x во времени, которая, в свою очередь, задает темп изменению перепадов парциальных давлений $p_{CO_2} - p'_{CO_2}$ и $p'_{CO_2} - p''_{CO_2}$.

Обратившись к таблице, нетрудно заметить, что с увеличением $T_x - T_n$ интенсивность роста $p_{CO_2} - p'_{CO_2}$ замедляется. Если при повышении $T_x - T_n$ с 4,7 до 44,7 К значения $p_{CO_2} - p'_{CO_2}$ возрастают в 8,3 раза, то с 44,7 до 83,9 К — только в 1,3 раза. При практически постоянном коэффициенте массообмена β это означает соответствующий характер изменения плотности массового потока. Причем по мере переохлаждения пограничного слоя увеличивается возможность объемной кристаллизации CO_2 . Ввиду того что часть образовавшихся здесь кристаллов уносится газовым потоком, это также приводит к некоторому снижению интенсивности массообмена.

С понижением температуры поверхности пластины наблюдается уменьшение градиента парциальных давлений CO_2 внутри слоя (см. таблицу). Падение интенсивности перекристаллизации CO_2 в глубь слоя приводит к образованию слоя вымороженного CO_2 меньшей плотности.

Снижение плотности слоя вымороженного CO_2 при повышении переохлаждения вымораживающей поверхности отмечено во многих работах [3, 5, 10]. Но в отличие от результатов [5] характер полученной авторами зависимости $q = f(T_x - T_n)$ оказался нелинейным.

Основными факторами, определяющими уменьшение темпа изменения градиента парциальных давлений $(p'_{CO_2} - p''_{CO_2})/\delta$, а, следовательно, и значений q , при $T_x - T_n > 35$ К являются, с одной стороны, снижение скорости роста толщины слоя, а с другой — слабая зависимость давления насыщенных паров CO_2 от их температуры (при $T < 130$ К) [4].

С понижением температуры поверхности пластины размеры кристаллов увеличивались. При этом наибольший их рост наблюдался в диапазоне $T_x - T_n < 35$ К. При большем переохлаждении поверхности пластины процесс укрупнения кристаллов заметно замедлялся из-за наложения новых.

Обработка результатов опытов с помощью ЭВМ дала возможность получить эмпирические соотношения для расчета толщины и плотности слоя вымороженного CO_2 в исследованном интервале изменения определяющих параметров:

$$\delta = 8,506 \cdot 10^{-5} v_{r,n}^{0,0036} (T_x - T_n)^{0,6} \times \\ \times (T_{r,n} - T_k)^{0,54} C_{CO_2}^{0,4} p_{r,n}^{-0,11} t^{0,53}, \quad (1)$$

$$q = 4,803 v_{r,n}^{0,25} (T_x - T_n)^{-0,25} (T_{r,n} - T_k)^{0,23} \times \\ \times C_{CO_2}^{0,15} p_{r,n}^{0,32} t^{0,12}. \quad (2)$$

Среднеквадратичное отклонение расчетных значений δ и q от экспериментальных составляет соответственно 12 и 5 %.

Сопоставление значений плотности слоя вымороженного CO_2 , полученных по зависимости (2), с результатами расчета q по данным [5] в сходных условиях приводит к расхождению от 5 до 80 % для разных значений скорости газового потока, его перегрева $T_{r,n} - T_k$ и различных моментов времени. При этом во всех сравниваемых случаях большие значения q получаются в данном [5], что связано, очевидно, как с погрешностью определения q в опытах, так и исключением из рассмотрения в работе [5] определяющего параметра $T_{r,n} - T_k$, заметно влияющего на значение плотности слоя вымороженного CO_2 .

На основании результатов исследования процесса вымораживания CO_2 , содержащегося в небольшом количестве в газовой смеси $N_2 - CO_2$, на продольно расположенную в потоке охлаждаемую пластину установлено, что:

плотность слоя вымороженного CO_2 изменяется в зависимости от того или иного определяющего параметра в соответствии с изменением градиента парциальных давлений CO_2 в слое твердой фазы, а толщина слоя — в зависимости от плотности массового потока к его поверхности;

эффективность вымораживающей поверхности повышается по мере охлаждения поступающей газовой смеси;

переохлаждение пластины более чем на 20 К оказывает незначительное влияние на рост массообмена;

оптимальное значение скорости движения газового потока смеси вдоль вымораживающей поверхности при давлении $p_{r,n} = 0,1$ МПа около 3 м/с; при повышении $p_{r,n}$ оптимум скорости смещается в сторону меньших значений.

Результаты исследований были использованы при создании опытного образца вымораживателя, который в настоящее время испытывается в промышленных условиях.

Список использованной литературы

1. Иванова В. С. Нарастание инея в зависимости от условий эксплуатации воздухоохла-