

Инж. Г. И. ФУКС

**К ВОПРОСУ
О ПРОИЗВОДСТВЕ СУХОГО ЛЬДА
И ПРИМЕНЕНИИ ЕГО ДЛЯ НУЖД
ТРАНСПОРТА**



ТОМСК

1929

Отд. оттиск из „Изв. СТИ“, т. 51, в. IV.

Окрглг 846.

Томск, тип. «Кр. Зн.». Зак. № 2474-30.

Тираж 550 экз.

К вопросу о производстве сухого льда и применении его для нужд транспорта.

Теоретические обоснования вопроса о производстве сухого льда, его стоимости и стоимости охлаждения при перевозках¹⁾.

Настоящая статья написана по предложению и идее проф. СТИ С. В. Лебедева, как часть общей работы о производстве и применении сухого льда для ж. д. транспорта экспортного Сибирского масла.

Развитие экспорта скоропортящихся продуктов и, в частности, экспорта масла из Сибирских районов маслоделия, упирается, как известно, в вопрос о создании достаточно совершенной холодильной цепи. В особенности несовершенно одно звено этой цепи—холодильный транспорт. Весьма ценный и доброкачественный на месте изготовления продукт теряет при перевозке свои качества и расценивается, благодаря этому, ниже товарных цен других стран.

Исходя из очевидного положения, что развитие экспорта с скоропортящихся продуктов для СССР является насущнейшей задачей времени, следует отнестись с особым вниманием ко всем предложениям в области улучшения условий холодильного транспорта. Не следует смущаться и тем, что предложенное устройство будет несколько дороже принятого до сих пор. По отношению к самому перевозимому продукту перевозка его является лишь небольшим накладным расходом. Даже значительное, в несколько раз, увеличение этого расхода, если только этот расход достаточно целесообразен, может быть оправдано. Необходимо весь вопрос увязать с экономической стороны, т. е. быть убежденным, что произведенная дополнительная затрата даст определенный коммерческий эффект—большую цену перевезенного продукта в месте продажи, с избытком покрывающую дополнительные расходы.

История вопроса о системах холодильных перевозок достаточно обширна. Неоднократно делались попытки заменить обычный вагон-ледник более совершенным устройством. Предлагалось охлаждение по ледо-соляной системе с искусственной циркуляцией рассола и воздуха (вагоны Беннетера, Соколова и Пташинского и т. д.), наконец, испытывался на наших дорогах холодильный поезд Линде с машинным охлаждением

Дальше опытных перевозок, дававших иногда весьма хорошие результаты в смысле сохранения качества перевозимого продукта, дело не шло. Причинами этого обыкновенно считают:

1. Большую дороговизну перевозок в сравнении с обычным вагоном ледником.

¹⁾ На настоящую статью инж. Г. И. Фукс имеются ссылки в статье проф. С. В. Лебедева—„Сухой лед в деле экспорта Сибирского масла“. (Расчеты инж. Г. И. Фукс приведены на стр. 12 до 27 указан. статьи проф. С. В. Лебедева. Вып. I, том 51 „Изв. СТИ“).
Редакция.

2. Сложность устройства всех этих систем охлаждения, т. е. довольно дорогое и сложное оборудование, которое, по существу дела, может быть использовано только периодически и сравнительно недолго в течение года.

3. Необходимость тщательного и квалифицированного обслуживания установки, что трудно и дорого в обычных условиях транспорта.

Первая причина, по указанным выше условиям, не является столь важной, как это кажется на первый взгляд. Нужно думать, что решающую роль играли 2 и 3 причины.

Заслуживает в этом отношении внимания новый метод охлаждения, применяемый в настоящее время в Америке. Этот метод охлаждения заключается в применении „сухого“ льда или твердой углекислоты взамен обычного льда для целей охлаждения.¹⁾

Идею применения твердой углекислоты для целей охлаждения нельзя считать совершенно новой. Впервые, насколько известно автору, предлагалось применить углекислотный снег для охлаждения рыбы в ловецких лодках в России в 1910—12 годах.

С другой стороны, предложение воспользоваться твердой углекислотой для целей обычного охлаждения не может не показаться странным на первый взгляд. Практика хранения и перевозки скоропортящихся продуктов требует умеренного охлаждения 0,—5° С, самое большее до—20° С. Твердая углекислота в виде льда или снега испаряется при атмосферном давлении при ~—79° С. Т. к. стоимость каждой калории холода сильно возрастает с понижением температуры, то ясно, что пользоваться твердой углекислотой для получения умеренного охлаждения будет невыгодно, по крайней мере там, где эти умеренные температуры холода можно получать непосредственно, напр., помощью холодильной машины.

Тем не менее, американская практика выявила ряд преимуществ употребления „сухого“ льда для целей охлаждения.

1. Сухой лед не тает, а переходит непосредственно в пар (газ) без всякого остатка. Температура испарения при этом—78,9° С, так что часть холода еще может быть получена при нагреве образовавшейся газообразной углекислоты. При употреблении сухого льда не образуется жидкости, чем и оправдывается его название, т. е., нет излишней влажности в охлаждаемом помещении.

2. Сухой лед примерно в 2 раза тяжелее обычного льда.

3. Газообразная углекислота, образующая из сухого льда, противодействует гнилостным процессам.

4. Сухой лед имеет на единицу веса, примерно, вдвое большую охлаждающую способность, чем обыкновенный. На единицу занимаемого объема его действие, т. о., вчетверо больше.

К этому остается добавить, что низкая температура получающегося холода позволяет рассчитывать на получение достаточно низких температур в охлаждаемом помещении (вагоне) вполне надежно.

¹⁾ ЛИТЕРАТУРА: Bulletin mensuel d. reinseignements frigorifiques 1927, 1.2. Martin The Field of dry Ice in modern Refrigeration Refrigerating Engineering 1928,2. Taylor. Refrigeration of Fish. Solid Carbon dioxide refrigerant for Transportation Bulletin 1016 d. Departement of Commerce Washington.

Рулев Углекислота или сухой лед в рыбной промышленности. Скоропортящиеся продукты и холодильное дело 1928,7.

— Производство сухого льда из углекислоты. Там-же 1928,8. Krause. Kohlensäure als Kältemitte. Z. für d. gesamte Kälte-Industrie 1928,10.

Возможность применения сухого льда для целей охлаждения можно считать, т. о., доказанной, тем более, что она доказана перевозками мороженой рыбы в Америке. Перевозки производились в изотермических вагонах из Галифакса и Монреал в течение 6 дней, кроме того, производилась пробная перевозка рыбы в виде замороженных рыбных филе, упакованных вместе с сухим льдом в трюме обычного неохлаждаемого судна из Нью-Йорка в Кингстуан (остров Ямайка) в течение 7 дней. В обоих случаях перевозимый груз пришел в хорошем состоянии.

Что же касается вопроса о выгодности применения сухого льда в условиях нашего транспорта, то он сводится в первую очередь к проблеме стоимости сухого льда.

В виду новизны этого дела получить твердые данные о цене сухого льда не представляется возможным. Можно наметить лишь ориентировочные цифры и сравнить их с теми немногими данными, которые имеются в литературе.

Техника получения твердой углекислоты или сухого льда довольно несложна. Имея жидкую углекислоту в баллоне или по выходе из конденсатора при давлении 50—70 атмосфер абсолютных и температуре 10—25° С, пропускают ее через узкое дроссельное отверстие с таким расчетом, чтобы давление углекислоты упало до нормального атмосферного давления. Часть углекислоты при этом испарится, а другая часть перейдет в твердое состояние в виде снега. Фирма Dry Ice Corporation употребляет как испаритель стальной баллон, диаметром около 900 м/м и высотой около 1500 м/м., тщательно изолированный снаружи пробкой. Собственно испарителем является второй стальной цилиндр, вставленный концентрично в первый с зазором. Этот внутренний цилиндр сверху перекрыт сукном и ситом, через которые отсасывается газообразная углекислота.

Когда внутренний баллон заполняется углекислотным снегом, последний выгребают через специальный лаз и прессуют гидравлическим прессом под давлением 55—100 атм. При этом получается сухой лед плотности 1,1.

Основным вопросом при подсчете стоимости сухого льда является вопрос о выходе сухого льда при этом процессе. Инженер В. Н. Рулев указывает, что при обыкновенных лабораторных опытах получается в виде снега только 10—15% жидкой углекислоты, в промышленных предприятиях получается от 1/3 и больше снега. Т.-к. выход твердой углекислоты является основной базой для подсчета ее стоимости, то в дальнейшем займемся определением более точной цифры возможного выхода ее исходя из соответствующих теоретических данных. Для этого воспользуемся данными 2-х работ. R. Plank: Herstellung und Industrielle Verwendung fester Kohlensäure¹⁾, и R. Plank и J. Kuprianoff: Die thermische Eigenschaften der Kohlensäure in gasförmigen, flüssigen und festen Zustand²⁾.

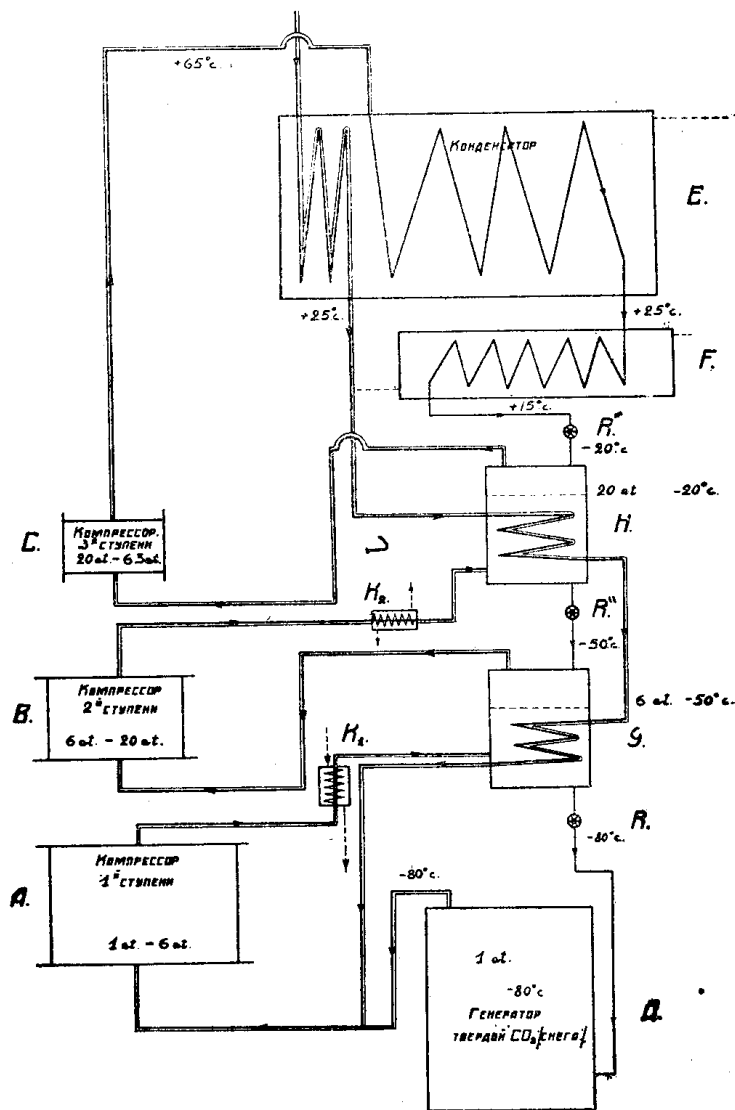
Подсчет произведен для конкретной установки, производительностью около 500 пудов (~8000 кг.) в сутки. В качестве источника углекислоты мы предположим углекислоту, получаемую в процессе брожения, т. е. газообразный отход производства; обычно не утилизируемый. В основу процесса получения твердой углекислоты поло-

¹⁾ VDJ 1929,7.

²⁾ Z. f. d. ges. Kälte-Industrie 1929,3.

жим процесс 3-х ступенчатого сжатия с трехступенчатым же испарением, причем в промежуточных испарителях (промохладителях) предполагаем теплообмен между сжатым паром и притекающей через дросс-вентиль жидкостью (см. схему установки, черт. № 2). Т. о. мы имеем приближение к наивыгоднейшему регенеративному процессу установки¹⁾.

СХЕМА
УСТАНОВКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТВЕРДОЙ СО₂.



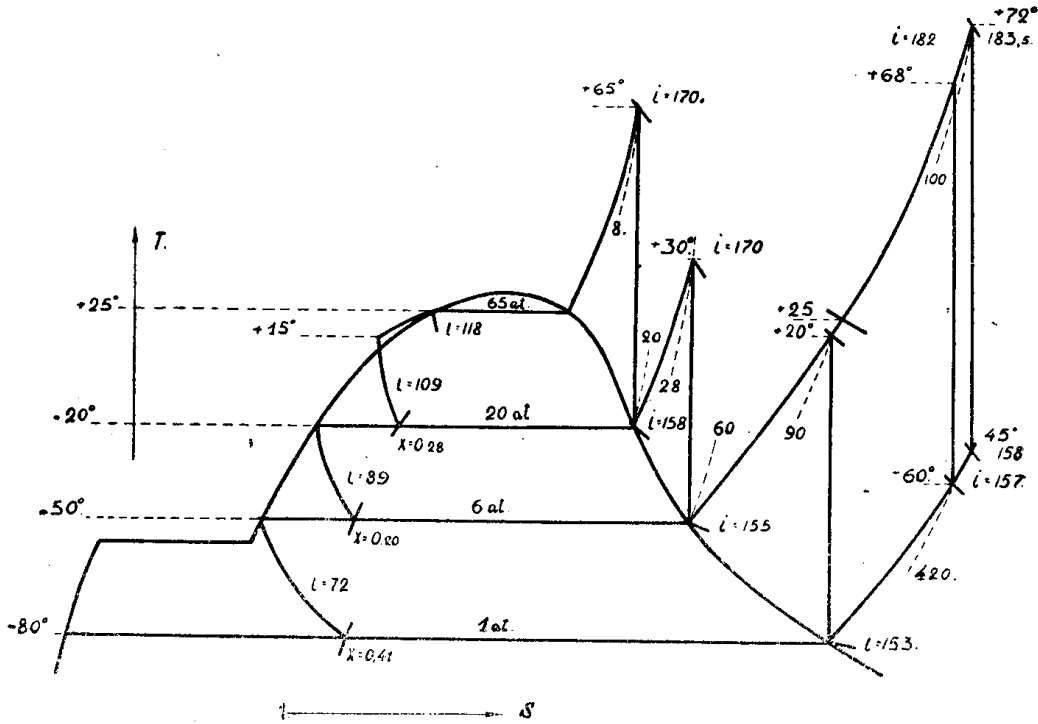
- E** - Переключатель жидкой СО₂
G, H - Первый и второй промежуточные испарители /отделители жидкости/
R, R', R'' - Регулирующие вентили.
K, K₁ - Обвязочные охладители смесью СО₂ между ступенями. /водяные/
 ——— Трубопроводы для /пара/ газа.
 - - - - - Водопровод

¹⁾ См. Г. И. Фукс.—Регенеративный процесс холодильной машины. „Известия СТИ,“ т. 48 (2), 1928 г.

Практические отклонения от него учтем соответственными коэффициентами, как это принято в практике расчета холодильных установок.

Воспользовавшись энтропийной диаграммой для углекислоты наносим теоретический процесс работы компрессора. За промежуточные давления приняты 6 атм. и 20 атм. абс, т.е. -50°C и -20°C (черт. № 1.)

ЭНТРОПИЙНАЯ ДИАГРАММА CO_2



Теоретический процесс. 1)

При дросселировании жидкости через первый регулирующий вентиль R' , согласно диаграмме получается:

0,41 кг. пара и 0,59 кг. снега.

Пар получается при давлении 1 атм. абс и $t = -80^{\circ}\text{C}$.

Для непрерывности процесса к нему необходимо добавить 0,59 кг. паров, температуру которых примем равной температуре первого пром. охладителя в -50°C .

Средняя температура всасываем. первой ступенью пара будет при этом:

$$t = \frac{0,41(-80) + 0,59(-50)}{1} \sim -60^{\circ}\text{C}$$

1) Примечание: Все характерные точки процесса имеют двойную нумерацию причем вторая цифра обозначает номер ступени.

Значения первой цифры:

1—начало сжатия

3—конец конденсации

2—конец сжатия

4—начало испарения

Например: i_{43} —теплосодержание смеси в начале испарения в 3-й ступени (2-й пром. охладитель).

При сжатии пара до давления в 6 атм. в 1-й ступени необходима теоретическая затрата работы:

$$AL_{ad} = i_{21} - i_{11} = 182 - 157 = 25 \text{ Cal}$$

Для полного превращения в жидкость сжатого в 1-й ступени пара от каждого кг. надо отнять:

$$Q_{21} = i_{21} - i_{31} = 182 - 72 = 110 \text{ Cal}$$

Т. к. в конце сжатия пар получается высокой температуры (+68°С), то часть тепла от него можно отнять охлаждающей водой. Предполагая охлаждение до 25°С ($i = 173$), находим, что охлаждающей водой будет отнято:

$$q_2' = 182 - 173 = 9 \text{ Cal/кг.}$$

Остаток:

$$Q_{21} - q_2' = 110 - 9 = 101 \text{ Cal/кг.}$$

необходимо отнять за счет испарения жидкости в 1-м пром. охладителе. Т. к. в 1-й пром. охладитель поступает смесь жидкости и пара с теплосодержанием $i_{32} = i_{41} = 89 \text{ Cal}$, а отсасывается сухой насыщенный пар с теплосодержанием $i_{12} = 155 \text{ Cal}$, то одним кг. можно отнять тепла:

$$Q_{12} = i_{12} - i_{42} = 155 - 89 = 66 \text{ Cal/кг.}$$

Необходимо еще учесть, что в первом пром. охладителе надо остудить 0,59 кг. пара от -20°С до -50°С, для чего надо отнять

$$q_1 = 0,59 \cdot 0,2 \cdot 30 = \sim 3,5 \text{ Cal (Ср. } \sim 0,2)$$

Следовательно, всего в 1-м пром. охладителе надо отнять

$$(Q_{21} - q_2') + q_1 = 101 + 3,5 = 104,5 \text{ Cal/кг.}$$

На один кг. углекислоты в 1-й ступени во второй должно приходиться:

$$g_2 = \frac{(Q_{21} - q_2') + q_1}{Q_{12}} = \frac{104,5}{66} = 1,58 \text{ кг.}$$

Дальнейшие аналогичные подсчеты, а также вычисленные величины для первой ступени сведены в таблицу № 1.

Таблица № 1.

	I ступ.	II ступ.	III ступ.
Температура начала сжатия	-60	-50	-20
Затрата работы на сжатие 1 кг. Cal	25	15	12
При охлаждении сжатого пара до 25°С отнимается охлаждающ. водой на 1 кг. Cal . .	9	1	-
В промежуточном охладителе необходимо отнять тепла для полной конденсации 1 кг. Cal.	101	80	-
Для охлаждения добавочного газа в 1-ю ступень (0,59 кг. на каждый кг. рабочего вещества 1-й ступени) надо отнять тепла Cal.	3,5	3,4	-
Польное количество обменив. тепла в пром. охладителе на 1 кг. Cal	104,5	83,4	-
При испарении 1 кг. жидкости в пром. охладителе связывается тепла Cal.	66	49	-

К этой таблице необходимо сделать следующие добавления:

Количество тепла, которое необходимо отнять во втором промежуточном охладителе для охлаждения добавочного газа вычисляется, предполагая охлаждение в нем от $+25$ до -20°C :

$$q' = C_p G \cdot \Delta t = 0,2 \cdot 0,59 [25 - (-20)] \sim 5,3 \text{ Cal/кг.}$$

Но так как на каждый кг. рабочего вещества 1-й ступени во второй работает 1,58 кг., то на каждый кг. рабочего вещества 2-ой ступени это составит:

$$\frac{5,3}{1,58} \cong 3,4 \text{ Cal/кг., что и помещено в таблице}$$

Количество рабочего вещества, которое должно проходить через вторую ступень на 1 кг. первой ступени вычислено выше — 1,58 кг. Соответственно, количество рабочего вещества в 3-й ступени, приходящееся на 1 кг. 2-й ступени:

$$g_3 = \frac{83,4}{49} \cong 1,72 \text{ кг.}$$

Действительный процесс.

Первая ступень.

Действительный процесс будет отличаться от рассмотренного теоретического рядом потерь термического и механического характера.

Вследствие проникновения тепла для получения заданного эффекта надо будет пропускать большее количество рабочего вещества. Примем, по Koeniger'у:

$$\rho = 1,2 \text{ для первой ступени,}$$

т. е. предположим, что для компенсации потерь от проникновения тепла в 1-й ступени надо пропускать на 20% больше рабочего вещества, чем в теоретич. установке

На 1 кг. углекислоты снега в 1-й ступени должно пропустить:

$$g' = \frac{\rho}{0,59} = 2,035 \text{ кг.}$$

Потери компрессора оценим коэффициентом:

$$\eta_d = 0,8$$

Охлаждение добавляемого пара в 1-й пром. охладителе, для возможности теплопередачи, примем от -10° до -40° т.е. на 30°C , для чего нужно затратить $\sim 3,5 \text{ Cal}$.

Начальная температура сжатия

$$t = \frac{0,41 (-80) + 0,59 (-40)}{1} = -57^\circ.$$

Нанеся эту точку на T S диагр. и проведя адиабату до давления 6 атм., отсчитываем адиабат. работу сжатия:

$$A L_{ad} = 183,5 - 158 = 25,5 \text{ Cal/кг.}$$

Действительн. работа сжатия на 1 кг.

$$AL_d = \frac{AL_{ad}}{\eta_d} = \frac{25,5}{0,8} = 31,9 \text{ Cal/кг.}$$

Действительная работы сжатия 1-й ступени на 1 кг. углекислого снега:

$$AL_1 = AL_d' = 31,9 \cdot 2,035 = 65,0 \text{ Cal/кг.}$$

Теплосодержание конца сжатия 1-й ступени:

$$i_2 = i_1 + AL_d = 158 + 31,9 = 189,9 \text{ Cal.}$$

Охлаждением до 25° С можно отнять тепла:

$$189,9 - 173 = 16,9 \text{ Cal/кг.}$$

охлаждающей водой. На 1 кг. сухого льда, следовательно, придется отнять водой:

$$16,9 g' = 34,4 \text{ Cal/кг.}$$

Для дальнейшего полного превращения в жидкость надо отнять, кроме того:

$$173 - 72 = 101 \text{ Cal/кг.}$$

Т. е. на 1 кг. агента в 1-й ступени во второй должно пропустить 1,58 кг. теоретически (см. выше, практически же:

$$1,58 \rho = 1,58 \cdot 1,2 = 1,9 \text{ кг.}$$

А на 1 кг. твердой углекислоты:

$$\frac{1,90}{0,59} = 3,21 \text{ кг/кг.}$$

Оценивая термич. потери в пром. охладителе коэф. 1,2 надо во второй ступени пропускать на 1 кг. твердой углекислоты:

$$g = 3,21 \cdot 1,2 = 3,86 \text{ кг/кг.}$$

Соответственные вычисления для второй и третьей ступени сведены в таблицу № 2. В эту же таблицу включены вычислен. выше данные для первой ступени.

Таблица № 2.

	I ступ.	II ступ.	III ступ.	Примечание
Термич. коэфф. совершенства (принято) ρ	1,2	1,2	1,12	
Колич. рабочего вещества на 1 кг. снега g кг.	2,035	3,86	7,31	
Начальная температура сжатия °С	-57°	-50	-20°	
Адиабатич. работа сжатия AL_{ag} Cal	25,5	15	12	
Действ. коэфф. компрессора (принято) η_g	0,8	0,8	0,8	
Действ. работа сжатия AL_d Cal	31,9	18,75	15	
Работа сжатия на 1 кг. снега AL	65,0	72,3	109,5	
Теплосодержание конца сжатия i_2	189,9	174	173	
Тепло сжатия, отнимаемого охлаждающей водой на 1 кг. снега Cal	34,4	19,4	65,0	В конденсаторе в переохладит.

Полное количество работы, затрачиваемой на сжатие, считая на 1 кг. полученного снега:

$$AL = 65,0 + 72,3 + 109,5 = 247 \text{ Cal/кг.}$$

Полное количество тепла, передаваемого охлаждающей воде на 1 кг. снега $\sim 530,0 \text{ Cal/кг.}$

Данные, необходимо для вычисления размеров компрессора, сведены в таблице № 3.

Таблица № 3.

	I ступ.	II ступ.	III ступ.	Примечание
Удельный объем в начале сжатия $v_1 \text{ дм}^3$	450	60	20	Взято по энтропийной диаграмме (Черт. 1)
Удельный объем в конце сжатия $v_2 \text{ дм}^3$	100	28	8	
Необходимый объем нетто, описываемый поршнем на 1 кг. снега $V^H \text{ дм}^3$	916	232	146	Вычисляется по формуле $V^H = v_1 g$.
Волюметрич. коэффициент подачи λ_v	0,82	0,95	0,92	Вычисляется по формуле $\lambda_v = 1 - \epsilon_0 \left(\frac{v_1}{v_2} - 1 \right)$ причем вредн. пространство ϵ принято в 5%
Весовой коэф. подачи λ	0,70	0,80	0,78	$\lambda = \lambda_v \cdot \lambda_w$
Полный объем брутто, описываемый поршнем на 1 кг. снега $V \text{ дм}^3$	1310	230	188	$\lambda_w = 0,85$ (принято)

По данным таблиц № 2 и 3 подсчитываем размеры и расход работы установки, производительностью в $G = 500$ пуд. в сутки ~ 8000 кг/сутки сухого льда. Считая на 20 часовую работу установки, имеем необходимую индикаторную мощность:

$$N_i = \frac{ALG/20}{632 \cdot 3} = \frac{400 \cdot 247}{632 \cdot 3} \sim 156 \text{ л. с.}$$

Механическая отдача компрессора принята $\eta_m = 0,85$. Тогда необходимая эффективная мощность:

$$N_e = \frac{N_i}{\eta_m} = \frac{156}{0,86} \sim 184 \text{ л. с.}$$

Считая потери в передаче, надо поставить мотор

$$N = 200 \text{ л. с.}$$

Полный часовой расход воды, считая ее нагрев \sim на 14°C

$$G_b = \frac{530 \cdot 0 \text{ G}/20}{14} \sim 15 \text{ м}^3/\text{час.}$$

Для вычисления размеров компрессора, подсчитываем необходимый часовой объем, описываемый поршнем компрессора по формуле

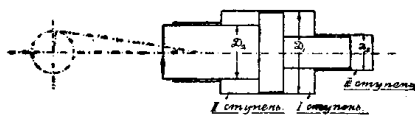
$$V_r = V G/20$$

где V берется из таблицы 2-й

В результате имеем:

Часовой объем, описываемый поршнем 1 ступени	524 . 10 ⁶ см. ³
” ” ” ” 2 ”	116 . 10 ⁶
” ” ” ” 3 ”	75 . 10 ⁶

Чтобы получить представление о реальных размерах компрессора принимаем следующую схему его устройства (черт. 3).



Считая число оборотов в минуту $n = 300$ об/мин. ход компрессора $S = D_3$, получаем следующие размеры компрессора:

$$D_1 = 495 \text{ мм. } D_2 = 410 \text{ мм. } D = 175 \text{ мм. } = s.$$

Компрессор указанных размеров по ориентировочному подсчету должен стоить ~ 15,000 рублей.

Подсчет себестоимости 1 кг. сухого льда.

Исходя из выявленных конкретных размеров, составляем ориентировочную смету первоначальных затрат по установке.

Первоначальные затраты установки, согласно соответствующей ориентировочной сметы составляют

Стоимость здания 18000 р.

Стоимость машинного оборудования (компрессоры, электромоторы, пресса и пр.) 144500 р.

Ориентировочная смета годовых расходов.

Эксплуатационные расходы:

Работа установки предполагается сезонная в течении 100 дней в году, по 20 часов в сутки. Привод от электромотора $N = 200$ л. с. ~ 150 кил. Коэф. полезного действия мотора взят 0,95, стоимость тока — 8 копеек за киловатт-час. Годовой расход по электро-энергии:

$$\frac{0,08 \cdot 150 \cdot 20 \cdot 100}{0,95} = 25250 \text{ р.}$$

Годовой расход на воду при расходе ее 15,0 м.³/час и цене 25 коп. за куб. метр.

$$0,25 \cdot 15,0 \cdot 20 \cdot 100 = 7500 \text{ р.}$$

Смазочный и обтирочный материал 500 р.

Для обслуживания установки предполагается следующий персонал:

1 заведывающий цехом

3 мастера производственных

4 машиниста (3 сменные и 1 запасной)
 4 прессовщика
 4 подручных прессовщика
 7 чернорабочих.

Расценивая рабочую силу согласно тарифным нормам, получаем полный годовой расход на обслуживающий персонал . . . 22800 р.

Полная сумма годовых эксплуатационных расходов, учитывая еще 15% непредвиденных расходов выразится в сумме. . . . 64500 р.

Полные газовые расходы по установке, считая амортизац. здания в 5%, амортизацию машинной части 10% будут. 80000 р.

Выработка сухого льда—400 кг./час, считая по 20 часов 100 дней в году:

$$400 \cdot 20 = 8000 \text{ кг./год}$$

Считая 25% на испарения до потребителя имеем полезную выработку:

$$0,75 \cdot 80000 = 60000 \text{ кг./год.}$$

Себестоимость 1 кг. сухого льда:

$$80000 : 60000 = 1,33 \text{ руб.} \sim 13,5 \text{ коп./кг.}$$

Учтя стоимость основного продукта (газообразной углекислоты, цифрой в 1,6 коп./кг. (стоимость очистки и т. п.), имеем полную стоимость 1 кг. сухого льда в 15 копеек за килограмм.

Эта цифра стоимости значительно ($\sim 1,5$ раза) ниже приводимых в литературе из американской практики. Т. к., тем не менее, реальность приведенной цифры, как ориентировочной, не подлежит сомнению, то остается предположить 2 источника расхождения:

1. Несовершенство процесса работы в выполненных установках. Выполненные установки, насколько известно, работают с мятием в одну ступень, что должно значительно уменьшать выход продукта при той же, примерно, затрате работы.

2. Высокая коммерческая прибыль.

Применение сухого льда на транспорте.

Вычислив себестоимость 1 кг. сухого льда, попробуем ориентировочно учесть вопрос об эксплуатационном применении его в качестве источника холода при транспортировании экспортн. масла из Сибири.

При атмосферном давлении сухой лед не тает, а непосредственно переходит в пар при $-78,9^\circ \text{C}$, при чем связывается скрытая теплота сублимации—136,89 cal/кг. Полученные пары углекислоты будут иметь ту же температуру— $-78,9^\circ \text{C}$. Если принять меры к тому, чтобы избежать утечки холодных паров, т. е. использовать полученный пар для целей охлаждения, то можно получить еще некоторое добавочное количество холода. Т. к. для нужд холодильного транспорта мы имеем обычно необходимость в температуре лишь немного ниже (на $2-3^\circ \text{C}$) нуля, то можно рассчитывать, что выпускаться будет пар с температурой $\sim -10^\circ \text{C}$.

Для подсчета тепла, которое пойдет на нагрев паров CO_2 от $78,9^\circ$ до -10° вполне достаточно воспользоваться пригл. ур-нием для теплоемкости, рассматривая CO_2 , как идеальный газ.

Примем по Планку:

$$C_p = 0,1965 + 0,00023 t.$$

Тогда нагреваясь от $-78,9^\circ$ до -10°C . 1 кг. CO_2 потребует:

$$q = \int_{-78,9}^{-10} C_p dt = \left[0,1965 + 0,00023 \frac{-10 - 78,9}{2} \right] [-10 - (-78,9)] = 12,85 \text{ cal.}$$

Следовательно, всего 1 кг. сухого льда даст холода:

$$136,89 + 12,85 = 149,74 \sim 150 \text{ cal./кг.}$$

Отметим, что это количество холода \sim в 2 раза больше того, что может дать 1 кг. обычного льда, и самый холод получается при значительно более низкой температуре.

Далее в вагоне, охлаждаемом сухим льдом углекислоты совершенно устраняется весьма вредный момент для хранения всякого скоропортящегося продукта, а именно излишняя сырость или влажность воздуха. Следующий простой расчет убеждает нас в этом:

Каждый кг. сухого льда, испаряясь, значительно (\sim в 570 раз увеличивается в объеме. При атм. давлении 1 кг. паров углекислоты занимает объем 365,12 дм. при $t = -78,9^\circ \text{C}$. При дальнейшем нагреве до -10°C . объем, занимаемый 1 кг. должен увеличиться в отношении абсолютн. температур, т. е.:

$$\text{в } \frac{273 - 10}{273 - 78,9} \sim 1,35 \text{ раза}$$

Т. о., объем одного кг. выходящей углекислоты будет $\sim 495 \text{ дм.}^3$.

Если считать, что в вагон будет загружено ~ 1500 кг. сухого льда, то при испарении и нагреве его пар должен занять объем в

$$1500 \cdot 0,495 \sim 740 \text{ м.}^3.$$

Общий объем обычного масляного вагона $\sim 38,5 \text{ м.}^3$. Т. о., объем полученного пара превышает объем вагона \sim в 19 раз.

Учитывая то обстоятельство, что во время пробега вагон должен быть закрыт возможно плотнее, и, следовательно, газ из него должен будет уходить только через неизбежные неплотности в обшивке и изоляции, можно ожидать, что большая часть находившегося в вагоне во время погрузки сухого льда воздуха будет вытеснена. Этим самым будет вытеснена и примесь воды к воздуху. В вагоне должно, вскоре после загрузки, установиться довольно высокое содержание углекислоты. Необходимо, конечно, произвести детальное исследование над влиянием богатой углекислотой атмосферы на сохранность того или иного продукта. Но а priori трудно ожидать, чтобы присутствие столь индифферентного химически газа, как CO_2 , могло бы послужить во вред, например, маслу, мясу и т. д. ¹⁾.

¹⁾ Особо, конечно, стоит вопрос о фруктах и т. п.

Основной вопрос о стоимости охлаждения в пути при пользовании сухим льдом углекислоты мы попробуем осветить следующим пробным подсчетом на пробег обычного груженого масляного вагона Новосибирск—Ленинград. Необходимо лишь заранее оговориться, что в целях предварительного, ориентировочного подсчета будут введены значительные упрощения в расчет, большей частью в невыгодную для нового способа охлаждения сторону, чтобы иметь наиболее надежные для сравнения величины.

Средняя коммерческая скорость движения изотермического вагона принята, по данным Томской ж. д. за 1927/28 оп. год—в $w = 20$ км./час.¹⁾ Считая расстояние Новосибирск—Ленинград $S = 3620$ км., имеем время пребывания вагона в пути в часах:

$$p = \frac{S}{W} = \frac{3620}{20} = 181 \text{ час, т. е. } \sim 7,5 \text{ суток}$$

Для сравнительного расчета мы примем необходимое время пробега вагона Новосибирск—Ленинград по скорости движения товаро-пассажирского поезда—6 суток. Считая, как минимум, 4 набивки обычного льда в пути на пополнение, мы имеем полное время движения 7 суток. К этому надо добавить:

12 часов от начала набивки льда до подачи к холодильнику с загрузкой масла в Новосибирске.

12 часов от окончания загрузки масла до отправки из Новосибирска.

24 часа от момента прихода вагона в Ленинград до разгрузки—всего 2-е суток.

Таким образом, полное время пребывания изотермического масляного вагона под охлаждением определяется в 9 суток или $p_0 = 216$ часов (при охлаждении обычным льдом).

При охлаждении сухим льдом это время может быть сокращено на:

1) 12 часов в Н.-Сибирске, т. е. предварительного охлаждения вагона не требуется.

2) 24 часа в пути, т. к. необходимость в пополнении льда отпадает.

Итого на 36 часов, что дает время пребывания под охлаждением $p_c = 180$ часов.

Коэффициент теплопроводности стенок вагона принят в дальнейшем расчете $k = 0,45$. Эта цифра принята, как некоторая средняя для всего вагона, после просчета среднего коэффициента теплопроводности ряда изотермических вагонов, описанных в литературе, а также по данным инж. П. И. Денисова²⁾. Этот коэффициент немного меньше того, который получался при довоенной изоляции масляного вагона только пробкой, хотя он достигался в других вагонах. При современных типах изоляции вагонов шевелином, морозином, войлоком и т. д. коэф. теплопроводности обычно не превосходит указанной величины.

Нет никакого сомнения³⁾, что коэффициент теплопроводности стенок вагона должен выбираться из экономических соотношений, как наивыгоднейший. В этом случае надо ожидать, что вагоны с охлаж-

1) Колеблется в пределах 16,5—23 км./час.

2) XXXIII Сов. Съезд. инж. подв. состава и тяги. Москва 1924, стр. 382.

3) Хотя подобных расчетов в практике не делают.

дением сухим льдом должны быть снабжены более совершенной изоляцией, с меньшим коэф. теплопроводности, чем вагоны с охлаждением обычным льдом. Приняв одинаковый коэф. теплопроводности для обоих типов вагонов, мы, таким образом, преувеличиваем расход сухого льда, т. е. рассчитываем с некоторым запасом.

Температура наружного воздуха принята в 22°C , а температура внутри вагона при охлаждении обычным льдом $+2^{\circ}\text{C}$, при охлаждении сухим льдом -2°C . Т. о. расчетная разность температур при охлаждении обычным льдом:

$$\Delta t_0 = 22 - 2 = 20^{\circ}\text{C}.$$

При охлаждении сухим льдом:

$$\Delta t_c = 22 - (-2) = 24^{\circ}\text{C}.$$

Для практики маслоэкпортера разница от $+2$ до -2°C при хранении и перевозке масла настолько очевидна, что на ней останавливаться излишне. Тепловой расчет, конечно, не учитывает „качества“ температуры охлаждения, но не подлежит сомнению, что при столь низкой температуре основного охлаждающего агента, как сухой лед ($-78,9^{\circ}\text{C}$), достижение внутри вагона температуры в -2°C значительно легче, чем достижение $+2^{\circ}\text{C}$ при охлаждении обычным льдом, с температурой таяния около 0°C .

Расчет поведем на обычный „масляный“ вагон¹, основные данные о котором помещены в таблице № 4.

Таблица № 4.

Число осей	Тара	Под'емн. сила	Внутренний размер	Общая пар. поверхн.	Погруз. площ.
2	12 т.	15,6 т.	6,356 × 2,743 × 2,222 м. ³	F = 85,8 м. ²	f = 13,96 м. ²

Охлаждающие приборы: число—8, у торцевых стенок, размеры $0,410 \times 0,410 \times 1,500$ м.³.

Необходимое количество холода для охлаждения вагона в пути нетто при охлаждении обычным льдом:

$$Q_0^H = k F_{\Delta} t_0 n_0 = 0,45.85,8.20.216 = 167000 \text{ Cal}$$

Тоже при охлаждении сухим льдом:

$$Q_c^H = k F_{\Delta} t_c n_c = 0,45.85,8.24.180 = 167000 \text{ Cal}.$$

При учете количества льда необходимо, кроме этого расхода холода нетто, учесть еще ряд разнообразных потерь холода, иногда весьма значительных. Чтобы получить представление о величине этих потерь, были использованы результаты двух опытных перевозок: Опытная перевозка Астрахань—Петроград¹⁾ и опытная поездка Курган—Ленинград летом 1924 г.²⁾. При этом планиметрированием тер-

¹⁾ Известия Комитета по холод. делу 1917 г., № 1.

²⁾ Данные представлены в распоряжение автора участником, т. Рыбченко.

мограмм определялась средняя разница температур за время пробега, подсчитывалось необходимое количество льда нетто и сравнивалось с действительно израсходованным. Результаты подсчетов сведены в таблицу № 5.

Таблица № 5.

№ вагона	Средняя разность температуры	Необход. колич. льда нетто пудов в сутки	Израсход. льна пудов в сутки	Кoeff. ис- пользования η	Примечание
212—473	13,94	9,7	17	57%	Опытная поездка Астрахань — Петро- град июнь — июль 1915 г.
119—976	21,4	14,6	27	55	
212—520	16,6	15,95	21	76	
848—540	22	21,3	53,8	39	Опытная поездка Курган — Ленинград июль 1924 г.
847—323	25,9	25,1	52,7	47,5	

Кoeff. использования вычислялся как отношение:

$$\eta = \frac{\text{Необходим. количество льда}}{\text{Израсходов. количество льда}} \cdot 100\%$$

На основании этих данных coeff. использования при охлаждении обычные льдом принят в 50%.

Необходимое количество обычного льда G_0 , считая, как обычно, при охлаждении с солью скрытую теплоту плавления 75 Cal./кг.:

$$G_0 = \frac{Q_0^n}{\eta \cdot 75} = \frac{167000}{0,50 \cdot 75} \sim 45000 \text{ кг.}$$

Вдобавок к этому расход соли, считая в среднем 10—12% по весу от загрузки льда:

$$g = 0,11 G_0 = 0,11 \cdot 45000 = 490 \text{ кг.}$$

Стоимость льда в заготовке, по данным инж. П. И. Денисова¹⁾ на 1923/24 операц. год, составляла в среднем 20 р. 30 к. за 1 куб. сажень, с значительными колебаниями от 32 р. 90 к. до 6 р. 90 к.

В виду сильного колебания этих цифр и значительной их неустойчивости по годам, для подсчетов принята средняя стоимость льда по данным Том. жел. дор. за 1927/28 оп. год. Эти данные следующие.

Стоимость заготовки 1 м.³—1 рубль.

Стоимость погрузки в вагон 1 т.—2 рубля

„ соли 1 т.—26 рублей.

По этим данным подсчитана стоимость 1 кг. льда, загруженного в вагон следующим образом. Процент таяния льда в заготовке, по данным инж. П. И. Денисова 25—50%. Для Сибирских условий при-

¹⁾ П. И. Денисов. Холодильный железнодорож. транспорт. Москва 1926 г.

нята цифра, близкая к низшему пределу 30%. Считая удельный вес льда в заготовке 0,7, стоимость погрузки 2 рубля, имеем стоимость 1 льда в вагоне:

$$a_0 = \frac{\frac{100}{0,7 \cdot (1 - 0,3)} + 200}{1000} = 0,404 \text{ коп./кг.}$$

Стоимость всего льда для охлаждения с погрузкой:

$$a_0 G_0 = 0,404 \cdot 4500 = 18 \text{ р. } 20 \text{ к.}$$

Стоимость соли:

$$\frac{2600}{1000} g_0 = 2,6 \cdot 490 = 12 \text{ р. } 70 \text{ к.}$$

Полная стоимость охлаждения в пути:

$$18 \text{ р. } 20 \text{ к.} + 12 \text{ р. } 70 \text{ к.} = 30 \text{ р. } 90 \text{ к.}$$

Принятый нами тип вагона вмещает ~ 150 боченк. или 8 т. масла. Расход в пути на охлаждение одной тонны масла

$$K_0 = \frac{30 \text{ р. } 90 \text{ к.}}{8} = 3 \text{ р. } 86 \text{ к.}$$

При подсчете на 1 т. масла в сутки это дает стоимость охлаждения 43,0 к./т. Эта цифра значительно (~ в 5 раз) превышает приведенную в Hütte¹⁾ цифру в 8,1 коп./т., причем в последнюю цифру включены все расходы по холодильной перевозке. Очевидно, что последняя цифра подсчитана для других (вероятно, довоенных) соотношений, т. к. стоимость одного льда в заготовке уже дает цифру, в подсчете на 1 т. масла, бóльшую.

При охлаждении сухим льдом, необходимое его количество найдем из условий, что 1 кг. сухого льда, испаряясь и нагреваясь поглотит 150 Cal./кг. При этом следует ожидать значительно лучшее использование холода в вагоне, т. к. отпадает ряд факторов, ухудшающих использование холода. В самом деле, необходимое количество сухого льда для охлаждения вагона невелико и может быть загружено в вагон сразу, на станции отправления, без необходимости возобновления его в дальнейшем. Затем в устройстве вагона выпадают места, где неплотности являются наиболее вероятными (крышки загрузочных люков, отверстия сифонов и т. д.). В виду значительной холодоемкости сухого льда и расположения его в вагоне над охлаждаемым продуктом, запас сухого льда к концу пробега может быть сделан минимальным, чего, как известно, не допускают при обычном охлаждении. Опытные перевозки в Америке с сухим льдом, на которые указывалось выше, подтверждают этот результат. Количество загруженного в них сухого льда было равно или лишь немного превышало теоретически. необходимое. Тем не менее, для осторожности мы введем коэффициент использования вагона при охлаждении сухим льдом:

$$\eta_c = 0,75.$$

¹⁾ Hütte транспиртный.

Необходимое количество сухого льда при этом определится

$$G_c = \frac{Q_c^H}{\eta_c 150} = \frac{167000}{0,75 \cdot 150} \sim 1500 \text{ кг.}$$

Цена сухого льда определена выше в 15 коп./кг. или 150 руб. за тонну. Стоимость загрузки сухого льда не должна превышать стоимости загрузки обычного льда. Примем стоимость погрузки 1 т. сухого льда в 3 р., тогда полная стоимость охлаждения вагона в пути составит:

$$1,5 \cdot (150 + 3) \sim 230 \text{ р.}$$

По абсолютной величине эта цифра \sim в 6,5 раз больше стоимости охлаждения обычным способом—льдом с солью. Т. о., не может быть речи о применении этого способа охлаждения там, где обычный ледосоляной метод достаточно удовлетворителен. Но в тех случаях, где этого нет, там главную роль будет играть не абсолютная стоимость охлаждения, а разница в расходах на каждую единицу веса и разница в продажной цене.

Стоимость охлаждения на 1 т. масла при обычном охлаждении указана выше. При подсчете стоимости охлаждения на единицу веса сухим льдом необходимо учесть увеличение емкости вагона при охлаждении сухим льдом. Это увеличение емкости обуславливается 2-мя причинами.

1. Отпадает необходимость в охлаждающих карманах у торцевых стенок вагона, отнимающих довольно значительную площадь, которая может быть использована для погрузки товара. Подсчет по данным, приведенным выше, дает выигрыш в площади \sim в 16%.

Имеется возможность значительно лучшего использования кубатуры вагона, т. к. нет необходимости оставлять столь значительное расстояние между верхом боченков и потолком вагона, как это делается при обычном охлаждении для циркуляции воздуха.

Некоторый объем вагона, правда, весьма, небольшой, будет использован для размещения ящиков с сухим льдом. Но их размещают вверху, под самым потолком, где все равно загрузка перевозимого груза невозможна.

Учитывая, как минимум, выигрыш в загрузке вагона пропорционально выигрышу площади, освобождающейся от приборов охлаждения \sim в 15%, имеем при загрузке сухим льдом вес перевозимого масла:

$$1,15 \cdot 8,0 = 9,2 \text{ т.}$$

Расход в пути Новосибирск—Ленинград, на охлаждение одной тонны масла:

$$K_c = \frac{230}{9,2} = 25,0 \text{ рублей/т.}$$

По сравнению с охлаждением обычным льдом с солью, охлаждение сухим льдом будет дороже на

$$25,0 - 3 \text{ р. } 86 \text{ к.} = 21 \text{ р. } 14 \text{ к./т. или } \sim \text{ на } 35,2 \text{ коп./пуд.}$$

Этот подсчет нуждается в более или менее значительных поправках, дающих некоторое уменьшение вычисленной разности стоимости. Не учитывая их в числах, наметим основные:

1. Уменьшение времени оборота вагона \sim на 1 сутки.

2. Лучшее использование под'емной силы вагона.

3. Упрощение, а может быть и сведение к минимуму ухода за вагоном в пути (отсутствие повторных набивок).

Можно лишь отметить, что, даже не принимая во внимание указанных поправок, употребление сухого льда для охлаждения вагонов может быть коммерчески рентабельно при перевозке экспортного масла. Надо думать, что возможность стойко поддержать необходимую температуру охлаждения масла в пути достаточно гарантирует поддержание качества масла; опыт перевозок показывает, что масло сильнее всего теряет в своих качествах при продолжительной перевозке в плохо охлаждаемом вагоне.

По данным инж. П. И. Денисова,¹⁾ относящийся к 1924 г., разницы в ценах на Лондонском рынке на Сиб. и Австралийское масло выражается в 2 рубля/пуд \sim 120 р./тонну, на Сиб. и Датское масло до 5 р./пуд, т. е., 300 руб./тонну. Если рассчитывать, что благодаря улучшившимся условиям перевозки, качество Сиб. масла на Лондонском рынке хотя бы приблизится к качеству Австралийского, то можно рассчитывать на повышение продажной цены на 100—80 рублей/тонну. Скидывая 20 рублей добавочных расходов на тонну, вызванных применением более дорогого сухого льда для охлаждения, имеем реальный выигрыш на тонну в 60—80 рублей.

По статистике 1913 г. вывоз масла из Сибири был 83 тысячи тонн, из которых 78000 шло за границу. При этих условиях реальная выгода применения сухого льда должна выражаться в сумме:

$$(60-80) 78000 = 4,68 \text{ до } 6,24 \text{ милл. рублей/год.}$$

Резюмируя все изложенное, приходим к следующим заключениям:

1. Сухой лед углекислоты по своим свойствам: а) высокому удельному весу, в) низкой температуре испарения и с) непосредственному обращению в пар (при нормальных условиях) без промежуточной жидкой фазы, является весьма удобным и компактным источником холода. Холод может быть получен при температурах, значительно более низких, чем при таянии обычного льда, даже с примесью соли, и, во всяком случае, при температуре, вполне удовлетворяющей самые строгие требования в этом смысле.

2. Получение основного продукта—газообразной углекислоты не связано ни с какими особыми затруднениями. Можно получать газообразную углекислоту из продуктов сгорания топлива под паровыми котлами, как это делает Dry Ice Co в Америке, или как побочный продукт брожения. В обоих случаях дело сводится к несложной и недорогой промывке газа с целью извлечения из него возможно чистого CO_2 .

3. Техническое выполнение всей необходимой аппаратуры для получения сухого льда может быть выполнено без особых затруднений внутри СССР на хороших заводах в центре.

4. Значительным препятствием в применении сухого льда для целей охлаждения является его высокая стоимость. По существу, сухой лед должен стоить дороже обычного, даже при машинном полу-

¹⁾ См. выше.

чении последнего, т. к. для получения сухого льда нужно получать температуры, значительно более низкие, чем для получения обычного льда. Т. о., область его применения естественно ограничивается той частью, где применение обычного льда не дает достаточного эффекта.

5. Компактность сухого льда, как источника холода, дает перспективы его применения, как охладителя, в наиболее уязвимом до настоящего времени звене холодильной цепи—доставке скоропортящихся продуктов из места производства (Маслозавод) или добычи (рыбы) к холодильнику. В особенности просто и заманчиво кажется решение этой задачи с развитием автомобильного транспорта.

6. Исходя из современных условий и соотношения цен, применение сухого льда в качестве охладителя при длительной ж. д. транспортировке скоропортящихся продуктов в некоторых случаях оказывается достаточно рентабельным.

Было бы неправильно предполагать, что автор настоящей статьи предлагает немедленное и широкое применение указанного способа охлаждения сухим льдом для нужд холодильного транспорта и т. п. Для этого, конечно необходимо проделать ряд предварительных работ, а именно:

1. Разрешить вопросы сохраняемости сухого льда при различных условиях.

2. Выработать рациональные методы упаковки сухого льда при сохранении его и употреблении в качестве охладителя.

3. Разрешить вопрос о возможности регулирования холода при охлаждении сухим льдом, т. к. во многих случаях слишком глубокий холод также нежелателен.

4. Испытать метод охлаждения сухим льдом в условии опытной перевозки на большое расстояние с тщательным замером всех условий опыта, в том числе и качества перевозимого продукта. Лишь по выполнении всех указанных работ вопрос может считаться настолько проработанным, что может встать следующий, о применении его в широком, промышленном масштабе.

Целью же настоящей статьи является лишь желание подтолкнуть техническую мысль на дальнейшую разработку этого вопроса.

Добавление.

Когда настоящая статья была написана в распоряжении автора оказался доклад Otto Hardung'a на холодильной конференции в Берлине в январе 1929 г.¹⁾

Приведенные в этом докладе цифры себестоимости сухого льда значительно ниже приведенны выше ($\sim 0,1$ марки, т. е. ~ 5 коп. за кг. сухого льда), но при этом в расчетах предположен весьма дешевый ток (~ 3 коп. за киловат-час), значительно меньшая затрата рабочей силы, т. е. большая механизация производства, и непрерывное производство в течение года. Трудно ожидать, чтобы все это благоприятные условия могли быть непосредственно приложены у нас в ближайшее время, в особенности в Сибирских условиях. Тем не менее, эти цифры крайне интересны, т. к. позволяют считать, что вы-

¹⁾ O. Hardung. Kohlensäure im Gärgeuerbe Gewinung in plüssiger und fester Form. Z. f. d. ges. Kälte—Jnd. 1929,5.

численные нами цифры экономии далеко не предельны, а могут быть в значительной мере превзойдены.

Значительный интерес для нас представляет метод получения сухого льда по способу Ф. Карба¹⁶⁾. Сущность этого способа заключается в получении углекислотного снега под давлением тройной точки в виде влажного льда, который нормально застывает в сухой лед большой плотности непосредственно, без сдавливания гидравлическим прессом. Эта идея крайне интересна, т. к. позволяет значительно упростить и удешевить производство сухого льда.

¹⁶⁾ Carba—Bulletin (Bern) 2,1.