

СЕЗОННОЕ АККУМУЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНОГО ХОЛОДА

Ю.А. Зейгарник, О.С. Попель, В.Л. Низовский, Л.В. Низовский

Рассмотрены физико-технические аспекты искусственной генерации льда методом мелкодисперсного распыления воды в холодный воздух применительно к созданию сезонных аккумуляторов природного холода

Ключевые слова: холодильный коэффициент холодоснабжения, физические процессы замерзания распыленной жидкости, оптимальные параметры установки.

Холодильные нагрузки из года в год оказывают все большее влияние на энергетические балансы населенных пунктов, сельскохозяйственных комплексов и фермерских хозяйств, и поиск более эффективных путей обеспечения холодоснабжения является важной составляющей политики энергосбережения и повышения энергоэффективности экономики. Проблема кондиционирования воздуха в рекреационном и жилищно-офисном секторах также стоит весьма остро в связи с ограниченностью мощности имеющихся электрических сетей особенно на юге страны.

В статье рассматриваются физико-технические аспекты создания систем холодоснабжения на основе сезонного аккумулярования природного холода путем производства льда в зимнее время и сохранения его в теплоизолированном хранилище с постепенным расходом накопленного «холода» в теплый период года. Данный подход имеет ряд потенциальных преимуществ по сравнению с традиционными системами холодоснабжения и по мере роста стоимости энергоресурсов находит все более широкое применение в различных странах.

Применяемые для холодоснабжения парокомпрессионные холодильные машины имеют относительно невысокий холодильный коэффициент, который при получении температуры холодоносителя на уровне $+5...+10^{\circ}\text{C}$ при температуре окружающей среды $20...30^{\circ}\text{C}$ не превышает 2,5...3,5, что означает, что на 1 кВт затраченной электрической мощности на привод компрессора холодильной машины можно получить лишь 2,5...3,5 кВт холодильной мощности.

Предлагаемое техническое решение обеспечивает многократное снижение затрат электроэнергии на холодоснабжение потребителей. Идея состоит в искусственном производстве снега (льда) в холодные периоды

при температуре наружного воздуха ниже -5°C путем мелкодисперсного распыления воды в холодном воздухе. Замерзание воды в результате охлаждения капель малого размера за время нахождения их в холодном воздухе обеспечивает аккумулярование природного холода в количестве, пропорциональном массе намороженного льда. Полученный лед накапливается в теплоизолированном объеме (траншее, яме или специально созданном подземном или наземном резервуаре). Размеры аккумулятора холода выбираются исходя из годовой нагрузки по холодоснабжению потребителя с учетом неизбежных потерь холода через ограждения аккумулятора в течение года. Для «отбора» холода к потребителю внутри созданного описанным способом аккумулятора размещается теплообменник, по которому прокачивается холодоноситель (антифриз или вода). Как показывают оценки, холодильный коэффициент холодоснабжения такой системы, определяемый как отношение количества полученного «холода» к затратам электроэнергии на распыл воды, вентиляцию наружного воздуха при «генерации» льда и обеспечение подачи холодоносителя к потребителю, может достигать 30...50, т.е. быть на порядок больше, чем у парокомпрессионных холодильных машин.

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ

Приведенные ниже оценки выполнены для потребителя холода, расположенного в южных районах страны с небольшой (несколько сот часов) продолжительностью морозного периода с температурой наружного воздуха ниже $-5...-10^{\circ}\text{C}$.

Эффективный уровень наружной температуры для намораживания льда определяется необходимостью срабатывания некоего минимального холодильного потенциала окружающего воздуха (возможным диапазоном

его подогрева), и по технико-экономическим соображениям равного минимум 2...3°C. Не-высокие температурные напоры и малые времена намораживания определяют доста-точно высокие расходы подаваемого охлаж-дающего воду наружного воздуха.

Намораживание льда осуществляется в результате распыла воды системой из боль-шого числа форсунок в несущем охлаждаю-щем воздухе, имеющем отрицательную тем-пературу, и осаждением образующихся час-тиц льда сначала на ограждающих поверхно-стях накопителя, а затем путем организован-ного наращивания образующегося на стенках слоя льда. При правильно выбранных пара-метрах системы весь образовавшийся лед оказывается в накопителе, и лишь небольшой процент незамерзшей воды дренируется.

Соотношение расходов охлаждающего воздуха и замораживаемой воды определя-ется тепловым балансом

$$K = \frac{G_{\text{возд}}}{G_{\text{вод}}} = \frac{r_{\text{пл}} + C_{p,\text{вод}} \delta t_{\text{вод}}}{C_{p,\text{возд}} \Delta t_{\text{возд}}} = \frac{r_{\text{эф}}}{C_{p,\text{возд}} \Delta t_{\text{возд}}}, \quad (1)$$

где $r_{\text{пл}}$ — скрытая теплота плавления (за-мерзания) льда ~295 кДж/кг; $C_{p,\text{вод}}$ и $C_{p,\text{возд}}$ — теплоемкости воды и воздуха; $\delta t_{\text{вод}}$ — превышение распыляемой водой температу-ры заморзания; $\Delta t_{\text{возд}}$ — глубина охлажде-ния несущего охлаждающего воздуха.

При типичных $\Delta t_{\text{возд}} = 3...5^\circ\text{C}$ (подогрев воздуха от минус 5...7°C до минус 2°C) и $\delta t_{\text{вод}} \approx 10^\circ\text{C}$ величина $K = 110...65$, т.е. для замораживания 1 г воды, имеющей темпера-туру 10°C, необходимо ~ 0,085...0,06 м³ воз-духа. Это опорные цифры для расчета намо-раживания льда в аккумуляторе. Работа с меньшим расходом воздуха не позволит на-морозить нужное количество льда и оставит незамерзшую воду, которую придется отво-дить, а подача излишнего воздуха приведет к перерасходу энергии на его прокачку и уве-личит длину пути намораживания (длину пролета капли до полного заморзания).

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ЗАМЕРЗАНИЕ РАСПЫЛЕННОЙ ЖИДКОСТИ

Физическое тепло перегрева капли от-носительно температуры насыщения (точки заморзания) и скрытая теплота плавления (заморзания) транспортируются по капле к ее свободной поверхности, где передаются кон-векцией к несущему каплю воздуху. Соотно-

шение интенсивностей этих двух процессов (теплопроводности по капле и теплоотдачи к воздуху) определяется числом Био [1]:

$$Bi = \frac{\alpha r_k}{\lambda_{\text{вод}}}, \quad (2)$$

где α — коэффициент теплоотдачи к воздуху; $\lambda_{\text{вод}}$ — теплопроводность воды; r_k — радиус капли.

Распыляемые форсунками мелкие капли в силу своей малой инерционности достаточ-но быстро (на 100...200 мм пути) приобрета-ют скорость, близкую к скорости несущего воздуха, при этом формула Ранца-Маршалла, описывающая теплоотдачу к кап-ле,

$$Nu_d = 2 + 0,6 Re_{d_k}^{1/2} Pr_{\text{возд}}^{1/3}, \quad (3)$$

где $Nu_d = \frac{\alpha d_k}{\lambda_{\text{возд}}}$ — число Нуссельта

($Re_d = \frac{w_{\text{отн}} d_k}{\nu_{\text{возд}}}$ — число Рейнольдса, рас-

считанное по относительной скорости капли в потоке воздуха $w_{\text{отн}}$; $\nu_{\text{возд}}$ — кинематиче-ская вязкость воздуха; d_k — диаметр капли) принимает предельное значение

$$Nu_d = 2, \quad (3a)$$

и соответственно число Би будет равно

$$Bi \cong \frac{\lambda_{\text{возд}}}{\lambda_{\text{вод}}} \approx 0,05.$$

Это означает, что теплообмен капли с охлаждающим ее воздухом определяется те-плоотдачей к воздуху и интенсифицируется

при уменьшении диаметра капли $\left(\alpha \sim \frac{1}{d_k} \right)$.

Заметим, что реально в рассматривае-мом случае мы имеем дело с так называемой задачей Стефана, когда в объеме капли су-ществует перемещающийся фронт заморза-ния и происходит локализованное внутрен-нее выделение тепла. Это вносит опреде-ленные коррективы в оценки числа Био, но принципиальный вывод об определяющем влиянии конвективной теплоотдачи со сво-бодной поверхности капли в суммарный теп-лообмен остается в силе.

Оценка времени заморзания воды. При-ближенную оценку времени заморзания кап-ли τ_{max} можно провести, исходя из теплового баланса, считая, что интенсивность теплоот-дачи определяется формулой (3a)

$$\tau_{\max} = \frac{r_{\text{эф}} \rho_{\text{вод}}}{12 \lambda_{\text{возд}}} \frac{d_k^2}{\Delta t}, \quad (4)$$

где $\overline{\Delta t}$ — средняя по времени процесса замерзания разность температур между точкой замерзания капли и окружающим воздухом.

В табл. 1 приведены оценки $\tau_{\max}$ в миллисекундах в функции d_k и $\overline{\Delta t}$ ($\lambda_{\text{возд}} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м·К), $r_{\text{эф}} = 340$ кДж/кг, $\rho_{\text{вод}} = 10^3$ кг/м³).

Таблица 1– Времена замерзания капель (мс)

$\overline{\Delta t}$, °C	d_k , мкм				
	10	20	50	100	200
10	11	44	275	1100	4400
5	22	88	550	2200	8800
3	37	146	915	3700	14600

Видно, что время замерзания капель диаметром менее 50 мкм не превышает 1 с даже при малых разностях температур ($\overline{\Delta t} = 3^\circ\text{C}$) между охлаждающим воздухом и точкой замерзания. Тем не менее, длина пути замерзания оказывается не столь малой, ее характерные значения приводятся в табл. 2 в функции скорости несущего воздуха.

Таблица 2. – Длина пути замерзания капель (м)
($\overline{\Delta t} = 5^\circ\text{C}$)

w , м/с	d_k , мкм				
	10	20	50	100	200
1	0,022	0,088	0,55	2,2	8,8
2	0,044	0,176	1,10	4,4	17,6
5	0,110	0,440	2,75	11,0	44,0
10	0,220	0,880	5,50	22,0	88,0

При больших скоростях несущего потока охлаждающего воздуха длина пути замерзания крупных капель оказывается значительной, а при скоростях воздуха более 7...10 м/с даже чрезмерной (заметим, кстати, что ветер скоростью около 10 м/с со снегом относится к категории слабой метели). Это ограничивает «свободу маневра» при выборе рабочих параметров системы намораживания. Из данных табл. 1 и 2 видно, что практически область рациональных размеров замораживаемых капель ограничивается диаметром капель примерно 50 мкм. Для сравнения укажем, что типичный размер природных снежинок лежит в пределах от 0,5 (мелкозернистый снег) до более чем 2 мм (крупнозернистый снег), т.е. на порядки величины больше при существенно меньшей насыпной плотности.

Расчет некоторых из режимов, представленных в табл. 1 и 2, показал хорошее согласие с оценками по соотношению (4).

На установке «Распыл» ОИВТ РАН было осуществлено температурное зондирование факела распыла воды в потоке холодного воздуха [$t_{\text{возд}} = -(7...8)^\circ\text{C}$] с помощью термопарных зондов. Температурное зондирование потока позволило с приемлемой точностью очертить границы зоны, где жидкая фаза претерпевает фазовые переходы.

Дисперсионные характеристики факела распыла. Выше говорилось, что время замерзания капель воды в первую очередь определяется их диаметром. Для нахождения размеров капель, достигаемых при распыле воды форсунками разных типоразмера и производительности на стенде «Распыл» ОИВТ РАН были выполнены специальные эксперименты с форсунками с диаметром сопла 0,20; 0,65; 2,0 мм. При давлении на входе в форсунку 8 МПа эти сопла обеспечивали расход воды 2,7; 9,8 и 32 г/с соответственно. Дисперсионный состав факелов распыла определялся по специально разработанной методике путем измерения индикаторы рассеяния диагностирующего монохроматического лазерного луча в широком диапазоне углов измерения (модифицированный метод малых углов [2]). На рис. 2 приведено типичное распределение капель воды по размерам (радиусу в мкм) для центробежной форсунки с диаметром сопла 2 мм. Аналогичные распределения были получены для форсунок другого размера. На этом же рисунке представлены кривые, дающие суммарную объемную долю капель размера от нуля до текущего радиуса r_i для трех типов форсунок.

Видно, что центробежные форсунки всех рассмотренных размеров обеспечивают приемлемо тонкий для наших целей распыл воды. Максимальный диаметр капель не превышает 25 мкм ($d_k < 50$ мкм). Видно также, что форсунки с более высоким расходом, имеющие больший диаметр сопла, дают несколько больший размер капель. В дополнение к стендовым измерениям размеров капель, масштабов скорости и длины намерзания были проведены серии «натурных» испытаний форсунок в потоках воздуха разной температуры и скорости. Опыты проводились при прокачке холодного воздуха вентилятором через прямоугольный канал размером 500×500 мм и длиной 4,0 м, круглый канал диаметром 300 мм, а также в свободном пространстве.

СЕЗОННОЕ АККУМУЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНОГО ХОЛОДА

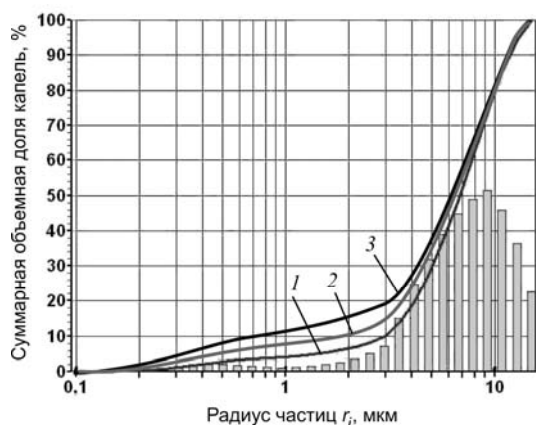


Рисунок 2 – Типичное распределение капель по размерам для центробежной форсунки $d_{\text{сопла}} = 2$ мм (расход воды $G = 32$ г/с) на расстоянии от среза сопла форсунки 100 мм при давлении воды перед форсункой 8 МПа и температуре воды 25°C . 1 – суммарная доля капель размером менее текущего радиуса r_i для форсунки с $d_{\text{сопла}} = 2$ мм; 2 – то же для

$d_{\text{сопла}} = 0,65$ мм ($G = 9,8$ г/с); 3 – то же для $d_{\text{сопла}} = 0,2$ мм ($G = 2,7$ г/с)

Воздушно-капельный поток направлялся внутрь канала вдоль его оси. Вентилятор с форсункой устанавливались в начале канала. На выходе из канала был установлен отбойный щиток, моделирующий намораживаемую стенку. Использовалась центробежная форсунка производства ММП «Салют»; давление воды перед форсункой 1,5-2,0 МПа; расход воды 4,4 г/с. Вентилятор обеспечивал номинальную производительность $500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ($0,14 \text{ м}^3/\text{с}$ или $\sim 0,18 \text{ кг/с}$). Отношение массовых расходов воздуха и воды: $K \approx 41$.

В ходе эксперимента при помощи термоанемометра проводилось измерение скорости воздушного потока в канале, а с помощью термометров сопротивления термометрирование потока. В конце каждого эксперимента измерялось количество намороженного в канале льда. Результаты экспериментов приведены в таблице.

Параметр	Дата		
	06.02.2012	07.02.2012	15.02.2012
Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$	-12	-11	-6,5
Температура воздуха на выходе из канала, $^{\circ}\text{C}$			
Давление воды, атм	15-20	15-20	14-18
Продолжительность опыта, мин	66	66	70
Расход воды, л	17,5	17,5	17,5
Удельный расход воды, г/с	4,4	4,4	4,4
Уловлено в виде льда, л	14,8	15	*
Унос, л	2,7	2,5	*
Скорость воздушного потока, м/с	0,8-1,0	0,8-1,0	0,8-1,0
* В ходе данного эксперимента, проводившегося при недостаточно низкой температуре окружающей среды, в нижней части канала собралось большое количество незамерзшей воды, в связи с чем произвести измерение количества образовавшегося льда не представлялось возможным.			

Обращает на себя внимание приемлемый баланс введенной жидкости и намороженного льда при температурах окружающей среды минус 11...12 $^{\circ}\text{C}$. При температуре окружающей среды -6,5 $^{\circ}\text{C}$ намораживание льда происходит менее интенсивно.

На фотографии рис. 3 виден сформировавшийся туман из мелких частиц льда. Вид образующегося льда на отбойном щитке на выходе из канала показан на рис. 4, а на рис. 5 видно равномерное нарастание слоя льда на стенках канала. Более монолитный характер этого слоя льда связан с частичным попаданием на стенки капель воды, которые затем замораживаются обтекающим их потоком.



Рисунок 3 – Фотография образующегося тумана из мелких частиц льда

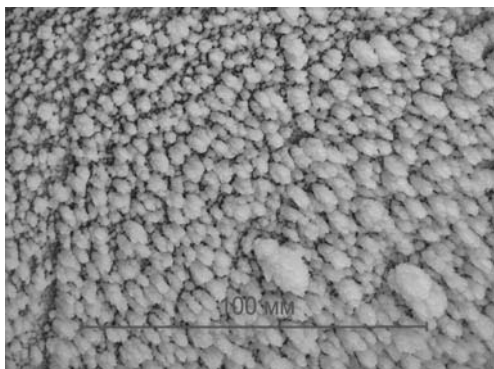


Рисунок 4 – Вид образующихся частиц льда на отбойном щитке на выходе из канала



Рисунок 5 – Нарастание слоя льда на стенках канала

Таким образом, и эксперименты, и расчеты показывают реальность интенсивного направленного намораживания льда при распыле воды на капли диаметром менее 50 мкм в принудительном потоке холодного воздуха с температурой минус (4-5)°С и ниже.

Отдельные вопросы организации процесса намораживания. Выполним некоторые предварительные оценки. Рассмотрим аккумулятор холода, содержащий 10^3 т льда, который требуется наморозить за 10 суток. Это значит, что скорость намораживания должна составить ~4 т/ч или 1,1 кг/с.

Примем, что площадь намораживания, обдуваемая воздушно-капельным потоком, $3 \times 3 = 9 \text{ м}^2$. Тогда удельная скорость намораживания составит ~120 г/(м²·с).

При соотношении массовых расходов распыляемой воды и охлаждающего воздуха $K = 100$, что соответствует подогреву воздушного потока от минус 5°С на ~3°С, необходимый объемный расход воздуха составит $120 \times 100 : 1,3 = 9,4 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \text{ стенки} \cdot \text{с})$ или скорость воздушного потока будет 9,4 м/с, длина пути замерзания (см. табл. 1 и 2) составит около 8 м. По-видимому, более приемлемой будет рабочая площадь, обдуваемая системой намораживания, в ~15 м² со снижением

скорости обдува до ~5,0 м/с (напомним, что ветер со снегом, имеющий скорость 10 м/с, уже относится к слабой метели).

Специально остановимся на следующем важном технологическом вопросе.

Распыл воды с получением капель диаметром до 50 мкм неизбежно ведет к "шнурованию" факела распыла воды, которое при скоростях воздуха 5...10 м/с, обусловленных необходимостью обеспечения должной производительности намораживающей установки, оказывается достаточно существенным.

"Шнурование" означает, что несмотря на достаточно большой (90...120°) угол раскрытия у среза сопла капли следуют за потоком воздуха, обтекая преграды при слабо интенсивном осаждении на горизонтальные поверхности, что наблюдалось в проведенных в ОИВТ РАН экспериментах. Причем это касается также наиболее крупных капель диаметром 50...100 мкм, в том числе и при распыле воды блоком форсунок большой производительности.

Тем самым, нужно соблюдать оптимальное расстояние между форсунками, обеспечивающее заполнение воздушного потока, обдувающего намораживаемую поверхность, факелами капель.

ВЫВОДЫ

1. Для обеспечения достаточной скорости замерзания капель воды и приемлемо коротких длин пути замораживания необходимо получать на выходе из форсунки капли диаметром менее 50 мкм.

2. Центробежные форсунки с диаметром сопла до 2...3 мм позволяют получить капли требуемого размера.

3. Расходы воздуха, необходимые для обеспечения замерзания 1 г воды, составляют 0,060-0,085 м³ при температуре наружного воздуха минус 5...7°С. С понижением температуры окружающей среды потребные расходы воздуха снижаются.

4. Для достижения приемлемой длины пути замерзания в несколько метров целесообразно ограничивать скорость несущего потока холодного воздуха 5 м/с. При этом также сохраняются приемлемая удельная интенсивность намораживания льда в 70...80 г/(м²·с) или ~250 мм/ч.

5. Во время эксплуатации системы намораживания льда необходимо поддерживать зависящее от наружной температуры оптимальное соотношение «воздух-вода».

6. Существует оптимальный шаг компоновки форсунок системы распыла, учиты-

СЕЗОННОЕ АККУМУЛИРОВАНИЕ ПРИРОДНОГО ХОЛОДА

вающий как производительность системы, так и эффект "шнурования" потока мелких капель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.В. Лыков. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 597 с.
2. Л.А. Домбровский, В.И. Залкинд, Ю.А. Зейгарник, Д.В. Мариничев, В.Л. Низовский, А.А. Оксман, К.А. Ходаков. Распыление перегретой воды: результаты экспериментальных исследований // Теплоэнергетика. 2009. № 3. С. 12-20.

Зейгарник Юрий Альбертович¹, д.т.н.,
зав. отделом

Попель Олег Сергеевич¹, д.т.н., зав. лабораторией, E-mail: o_popel@mail.ru

Низовский Владимир Львович¹, к.ф.-м.н.,
ст. научный сотрудник

Низовский Лев Владимирович¹, вед. Инженер-программист

¹ ФГБУН Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госконтракт №16.516.11.6043).