

МРНТИ 30.15.35: 55.65.51

Н.М. Весельский¹ – основной автор, | ©
А.П. Цой², Д.Е. Лоечко³^{1,3}Магистрант, ²Д-р техн. наук, профессор

ORCID

¹<https://orcid.org/0000-0002-3087-3326> ²<https://orcid.org/0000-0002-3073-6698>³<https://orcid.org/0009-0002-1334-3400>^{1,2,3}Алматинский технологический университет,

г. Алматы, Казахстан

¹nik.stor2335363@gmail.com<https://doi.org/10.55956/JLIC7148>

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-ИСПАРИТЕЛЬНОГО КОНДЕНСАТОРА

Аннотация. Данная работа посвящена разработке комбинированного радиационно-испарительного конденсатора для холодильной системы, работающей на природном хладагенте R290. В данном устройстве объединены два пассивных метода охлаждения: теплоотвод за счет излучения в «холодное небо» и испарение воды. Создан экспериментальный прототип, который был подвергнут испытаниям. Результаты показали, что при внешней температуре +25°C и влажности около 60% комбинированный конденсатор способен отводить до 650 Вт/м² тепла, что на величину от 25% до 30% превышает эффективность традиционного воздушного конденсатора. Достигнуто снижение нагрузки на компрессор и энергопотребления (~15-20% годовой экономии), подтверждая перспективность предлагаемого подхода.

Ключевые слова: радиационно-испарительный конденсатор, пассивное охлаждение, радиационное охлаждение, испарительное охлаждение, энергоэффективность, холодопроизводительность, R290 (пропан).



Весельский, Н.М. Разработка и исследование радиационно-испарительного конденсатора [Текст] / Н.М. Весельский, А.П. Цой, Д.Е. Лоечко // Механика и технологии / Научный журнал. – 2025. – №2(88). – С.396-411. <https://doi.org/10.55956/JLIC7148>

Введение. Современные требования к энергоэффективности холодильных и климатических систем продиктованы ростом энергопотребления и ужесточением экологических стандартов. Традиционные конденсаторы с принудительным воздушным или водяным охлаждением требуют значительных энергозатрат и потребления воды. Одним из перспективных направлений повышения эффективности и экологической устойчивости является использование пассивных методов теплоотдачи – радиационного охлаждения и испарительного охлаждения – в одном аппарате. Такая комбинация способна обеспечить высокий удельный отвод тепла (до 500-700 Вт/м²) при стабильной работе в различных климатических условиях без внешнего энергоподвода.

Актуальность данного исследования обусловлена стремлением снизить долю энергоёмких компрессорных холодильных машин в условиях

декарбонизации экономики. Комбинированный радиационно-испарительный конденсатор использует одновременно «холод космоса» и охлаждение за счёт испарения влаги, достигая суммарного эффекта, недостижимого традиционными методами. При этом применение безопасного природного хладагента пропана (R290) с низким потенциалом глобального потепления делает такой подход особо актуальным.

Целью работы является разработка, создание и экспериментальная проверка эффективности радиационно-испарительного конденсатора на хладагенте R290

Объект исследования – процесс теплообмена в конденсаторах холодильных установок, в том числе в комбинированных радиационно-испарительных системах. *Предмет исследования* – конструктивные и теплотехнические особенности радиационно-испарительного конденсатора, а также методы его расчёта, моделирования, изготовления и экспериментального исследования

Научная новизна работы заключается в определении удельного теплового потока радиационно-испарительного охлаждения в течении суток и годового периода

Практическая ценность подтверждается тем, что опытный образец позволил снизить энергопотребление на конденсацию на ~25-30% по сравнению с традиционным воздушным конденсатором. Настоящая работа формирует научно-практическую базу для внедрения радиационно-испарительных конденсаторов, отвечающих современным требованиям энергоэффективности и экологической безопасности.

Обзор литературы. Радиационное охлаждение. Процесс радиационного (лучистого) охлаждения основан на излучении тепловой энергии поверхностью в длинноволновом инфракрасном диапазоне в открытое небо (так называемое «небесное окно» 8-13 мкм). В ночное время при ясной погоде поверхность-излучатель может отдавать тепло излучением в космос и охлаждаться до температур ниже температуры окружающего воздуха без затрат электроэнергии. Однако мощность такого пассивного охлаждения относительно невелика – порядка 100 Вт/м², и эффективность сильно зависит от метеоусловий (ночью, при отсутствии облачности). Максимальное снижение температуры, достигаемое типичным радиационным охладителем за ночь, составляет около 10-11°C относительно окружающей среды. Днём же чисто радиационные панели практически не работают из-за поглощения солнечного излучения. Схема работы ночного пассивного радиационного охлаждения представлена на рисунке 1.

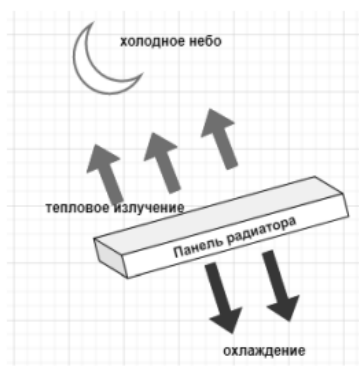
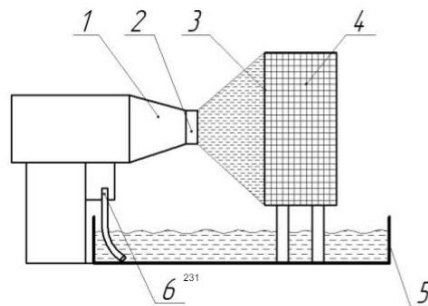


Рис. 1. Схема работы ночного пассивного радиационного охлаждения

Испарительное охлаждение. Данный метод основан на поглощении теплоты испаряющейся водой. При испарении 1 кг воды поглощается около 2440 кДж теплоты (при 25°C), что обеспечивает значительный охлаждающий эффект. Испарительное (адиабатическое) охлаждение широко применяется в градирнях и испарительных конденсаторах. Теоретически, при сухом воздухе и высокой начальной температуре воды, испарительное охлаждение может отводить до ~320 Вт/м² тепла (при 30°C). На практике эффективность ограничена влажностью воздуха: метод хорошо работает только в сухом климате, требуя постоянной подачи воды, и его эффективность падает при повышении относительной влажности. Схема работы обдуваемого испарительного конденсатора представлена на рисунке 2.



1 – направляющая потока воздуха; 2 – сопла форсунок; 3 – обдуваемая и орошаемая поверхность; 4 – корпус конденсатора; 5 – поддон с водой; 6 – патрубок забора воды [1].

Рис. 2. Схема обдуваемого испарительного конденсатора

Комбинирование радиационного и испарительного охлаждения. Объединение двух пассивных методов – лучистого и испарительного – позволяет компенсировать недостатки каждого из них за счет достоинств другого. Радиационное охлаждение эффективно при ясном небе и способно охлаждать ниже температуры воздуха, но ограничено по мощности; испарение дает большой тепловой поток, но требует сухого воздуха и расхода воды. Комбинированный подход способен обеспечить более высокую суммарную холодопроизводительность в разных условиях без активных затрат энергии. В последние годы появилось множество исследований, посвящённых таким гибридным системам.

Так, Farmahini-Farahani и Heidarinejad [2] изучили гибридную систему, объединяющую ночное радиационное охлаждение и двухступенчатое испарительное охлаждение, в разных климатических зонах Ирана. Экспериментально показано снижение температуры воздуха на 20-24°C (в зависимости от региона) при работе системы, а энергоэффективность (отношение охлаждающего эффекта к затратам на испарение) достигала ~50%. Другое исследование [3] продемонстрировало возможность охлаждать воду в аккумуляторе холода за одну ночь, сочетая излучающий радиатор и прямое испарительное охлаждение в климате Тегерана. Amir и Van Hout [3] разработали математическую модель для оптимизации такой гибридной системы, учитывающую погодные данные и циклы работы, модель позволила оценить энергозатраты и эффективность за длительный период.

Для повышения эффективности пассивного охлаждения в дневное время применяются специальные решения. Например, использование селективных покрытий и экранов, прозрачных в ИК-диапазоне, но отражающих солнечное излучение, позволяет радиаторам излучать тепло днём, минимизируя нагрев от солнца. Кесебас и соавторы [4] показали, что многослойные тонкопленочные покрытия с чередованием диэлектриков могут снизить поглощение солнечной энергии радиатором до минимальных значений, существенно повышая эффективность дневного излучательного охлаждения. В работе Li и др. [5] предложен двухслойный пассивный tandem-охладитель, сочетающий излучающую мембрану из ацетата целлюлозы и гигроскопичный гидрогель PVA-CaCl₂; такая система способна эффективно отражать солнечный свет и использовать испарение для охлаждения, обеспечивая как ночное, так и дневное пассивное охлаждение. Мао и др. [6] разработали трёхслойную испарительно-излучающую мембрану с прослойкой из пористого аэрогеля, которая пропускает пар и инфракрасное излучение, но задерживает тепло. Включение всего 2 мм аэрогеля позволило замедлить испарение воды и продлить действие охлаждения примерно в 11 раз, одновременно обеспечивая дополнительное радиационное охлаждение (~1,4°C спад температуры) [6]. Таким образом, «дышащая» теплоизоляция обеспечивает дозированное испарение и высокую эффективность комбинированного метода.

Обобщая литературные данные, можно отметить, что гибридные радиационно-испарительные системы достигают существенно большей холодопроизводительности по сравнению с отдельными методами. В пиковых режимах суммарный тепловой поток способен достигать 500-700 Вт/м², тогда как чисто радиационные охладители обычно ограничиваются ~100 Вт/м². Кроме того, комбинированный подход расширяет диапазон условий, в которых пассивное охлаждение эффективно (включая более влажный воздух ночью и солнечное излучение днём за счёт экранов и отражателей).

Отечественными исследователями также подтверждена перспектива использования эффективного излучения в системах охлаждения. В работах А.П. Цой и соавторов проведено моделирование кондиционера воздуха с радиационным охлаждением и показано существенное влияние климатических факторов (температуры и влажности окружающей среды) на его работу [7]. Эти исследования легли в основу разработки нового типа конденсатора, сочетающего излучение и испарение для достижения максимальной энергоэффективности.

Условия и методы исследования. Для оценки теплотехнических характеристик радиационно-испарительного конденсатора использовались обоснованные инженерные расчёты, базирующиеся на известных уравнениях теплообмена и данных из научной литературы. Расчёты учитывали основные механизмы отвода тепла – радиационное излучение и испарение воды – с учётом климатических факторов, таких как температура окружающей среды и относительная влажность воздуха. Такой подход позволил предварительно определить рабочие параметры установки и спрогнозировать её эффективность до проведения экспериментальных испытаний.

Выбор хладагента. В установке используется пропан (R290) – природный хладагент, обладающий нулевым озоноразрушающим потенциалом (ODP = 0) и крайне низким потенциалом глобального потепления (GWP ≈ 3). Это примерно в 600 раз меньше GWP широко

применяемого R134a, что существенно снижает климатическое воздействие системы. Кроме экологических преимуществ, R290 имеет благоприятные термодинамические свойства: высокая удельная теплота парообразования (≈ 426 кДж/кг, почти вдвое выше, чем у R134a) обеспечивает эффективное поглощение тепла при конденсации. Более низкая кинематическая вязкость пропана ($\approx 11,3$ мПа·с при 25°C против $13,6$ мПа·с у R134a) уменьшает гидравлические потери при течении по трубкам конденсатора. Эти свойства учитывались при моделировании рабочих процессов и выборе размеров теплообменника.

Расчёт радиационного теплоотвода. Радиатор, применяемый для охлаждения теплоносителя эффективным излучением в холодильной системе, находится во взаимодействии с окружающей средой. Поэтому радиационное охлаждение происходит в результате эффективного излучения пластины радиатора и конвективного теплопритока. В зависимости от температуры радиатора (теплоносителя) по сравнению с температурой окружающей среды, в отличие от постоянного отвода тепла за счет эффективного излучения q_{ef} , конвективный теплоприток q_{conv} может подводиться или отводиться.

$$q_{rad} = q_{ef} \pm q_{conv}. \quad (1)$$

В случае, если температура окружающей среды ниже температуры радиатора, то конвективное тепло отводится ($+q_{conv}$), выполняется условие:

$$q_{rad} = q_{ef} + q_{conv} \quad (2)$$

Практически применяется такой режим.

В случае, если температура окружающей среды выше температуры радиатора, то конвективное тепло будет подводиться ($-q_{conv}$), выполняется условие:

$$q_{rad} = q_{ef} - q_{conv} \quad (3)$$

Количество теплоты, передаваемое за счет конвекции с поверхности площадью 1 м^2 определяется по формуле [8].

$$q_{conv} = \alpha \cdot (T_{rad} - T_{amb}), \quad (4)$$

Конвективный теплоприток от излучающей поверхности, зависит от многих внешних и конструктивных параметров радиатора: скорости ветра, формы излучающей поверхности, расположения и других условий. Поэтому он может очень сильно изменяться.

Для проведения расчетов примем, что ветер не обдувает поверхность радиатора. Поэтому расчет ведем для теплообмена при естественной конвекции на плоской горизонтальной поверхности, обращенной лицевой стороной вверх. Для этого случая коэффициент теплоотдачи может быть определен по формуле [9]:

$$\alpha = 1,78(T_{rad} - T_{amb})^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

По заданным температурам излучающей поверхности и воздуха, можно определить коэффициент теплоотдачи и средний за ночь тепловой поток с поверхности излучающей пластины.

Тогда общее количество отведенного тепла, которое может быть произведено за одну ночь:

$$Q_n = 3600(q_{ef} \pm q_{конв})\tau_n, \quad (6)$$

где: q_{ef} – поток эффективного излучения, Вт/м²; τ_n – продолжительность ночи, равная времени между закатом и восходом солнца, часов.

Для расчета потока эффективного излучения будем использовать формулу предложенную в работе [10]:

$$E_{эф} = \delta_{ип}\sigma(T_{ип}^4 - T_n^4). \quad (7)$$

Для расчета условной температуры неба T_n используется следующая формула:

$$T_n = T_v \cdot (\delta_n + CF_{al})^{0,25} \cdot CF_{cl}^{0,25}, \quad (8)$$

$$CF_{cl} = 1 + 0,0224R_2 - 0,0035R_2^2 + 0,00028R_2^3 \quad (9)$$

$$CF_{al} = 0,12(p_{ат} - 1);$$

$$\delta_n = 0,787 + 0,764 \ln \ln \left(\frac{T_{ро}}{273} \right).$$

В формулах использованы следующие обозначения: $T_{ип}$, T_n , T_v , $T_{ро}$ – соответственно температуры излучающей поверхности радиатора, ночного неба, воздуха и точки росы воздуха, К; σ – постоянная Стефана-Больцмана, $5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); $\delta_{ип}$, δ_n – относительная излучательная способность поверхности радиатора и безоблачного ночного неба; $p_{ат}$ – атмосферное давление, бар; c – коэффициент показывающий, как изменяется влияние облачности на величину эффективного излучения в зависимости от географической широты местности, для которой проводятся расчеты; R_1 – общая степень облачности в долях единицы, $0 \leq R \leq 1$; R_2 – степень облачности ночного неба, баллов. Для безоблачного неба $R = 0$, а для полностью закрытого облаками неба $R = 10$; CF_{al} – коэффициент, учитывающий высоту расположения излучающей поверхности над уровнем моря. При подъеме на большую высоту уменьшается толщина атмосферы и увеличивается величина потока эффективного излучения. CF_{cl} – коэффициент, учитывающий влияние облачности на величину эффективного излучения в зависимости от географической широты местности, для которой производятся расчеты.

Общее количество холода, которое может быть произведено идеальной холодильной системой за одну ночь определим по формуле:

$$Q_n = 3600E_{эф}\tau_n, \quad (10)$$

где: $E_{\text{эф}}$ – поток эффективного излучения, Вт/м²; τ_n – продолжительность ночи, равная времени между закатом и восходом солнца, часов.

Применяя формулы для расчета потока эффективного излучения и подставляя значения температуры воздуха, точки росы, излучающей поверхности, облачности и атмосферного давления, рассчитаем средние ночные значения потока эффективного излучения. Далее по формуле (2) на основе данных о продолжительности ночи рассчитаем количество холода, получаемое за ночь. Аналогичные вычисления проведем для каждой ночи рассматриваемого периода. Просуммировав полученные количества холода за каждую из ночей, получим суммарное количество холода за месяц и за год в целом, при этом в расчет берутся только те дни, когда охлаждающий эффект был положительный.

Расчёт испарительного охлаждения. Испарительное охлаждение основано на физическом процессе поглощения теплоты при переходе жидкости в пар. Когда вода испаряется с поверхности, она поглощает значительное количество теплоты из окружающей среды (в основном из воздуха и поверхности, с которой испаряется), тем самым понижая её температуру.

Основное уравнение теплообмена при испарении [11]:

$$q = m_{\text{исп}} \cdot r \quad (11)$$

где: q – количество теплоты, отводимое за счёт испарения, Вт; $m_{\text{исп}}$ – масса испаряющейся воды в единицу времени, кг/с; r – удельная теплота парообразования (для воды при 25°C ≈ 2440 кДж/кг).

Испарительное охлаждение особенно эффективно в условиях сухого и тёплого климата, при низкой относительной влажности воздуха.

Процесс испарения сопровождается *массообменом между поверхностью жидкости и потоком воздуха*. Скорость испарения зависит от: разности парциальных давлений водяного пара на поверхности жидкости и в воздухе, скорости обдува (конвекции), температуры воздуха и жидкости, площади поверхности испарения.

Формула для расчёта массы испаряющейся воды [11]:

$$m_{\text{исп}} = A \cdot (T_s - T_a), \quad (12)$$

где: β – коэффициент массообмена, кг/(м²с·Па); A – площадь испарения, м²; T_s – давление насыщенного пара на поверхности воды; T_a – парциальное давление пара в окружающем воздухе.

В инженерной практике также используется аналог теплопередачи (формула Льюиса):

$$q = h_d \cdot A \cdot (T_s - T_a) \quad (13)$$

$$0,001 \cdot 0,4 \cdot (9600 - 1170) \cdot 1 = 3,372 \text{ кг}$$

где, h_d — эффективный коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К).

Испарение воды с поверхности конденсатора обеспечивает дополнительное охлаждение за счет поглощения теплоты испарения.

Количество теплоты, отводимой за счет испарения, можно рассчитать по формуле:[11]

$$Q_e = m_w * \lambda, \quad (14)$$

где: Q_e – тепловой поток за счет испарения; m_w – масса испаряемой воды; λ – теплота испарения воды.

$$Q_e = 3.372 \cdot 2260000 = 7620720 \text{ Дж}$$

$$Q_e = \frac{7620720 \text{ Дж}}{3600} = 2116,86 \text{ Вт} \cdot \text{ч}$$

Для эффективной работы испарительного охлаждения необходимо обеспечить следующие условия [12]:

1. Высокая температура поверхности (по отношению к температуре воздуха): чем выше температура жидкости, тем выше давление насыщенного пара, и тем интенсивнее испарение.

2. Низкая относительная влажность воздуха: чем суше воздух, тем выше градиент концентрации пара и, следовательно, интенсивность испарения.

3. Повышенная скорость воздуха: обдув поверхности снижает парциальное давление у границы фаз, способствуя испарению.

4. Большая площадь смачиваемой поверхности: повышает площадь фазового контакта и, следовательно, общую массу испарившейся воды.

5. Поддержание непрерывной подачи воды: обеспечивает стабильность процесса и компенсирует испаряющиеся потери.

Также важно учитывать: температуру воды, качество воды (наличие солей и загрязнений), наличие каплеуловителей, предотвращающих унос капель.

Суммарный тепловой расчет. Плотность общего теплового потока от конденсатора складывается из радиационной и испарительной составляющих: $q_{\text{сумм}} = q_{\text{рад}} + q_{\text{исп}}$. Аналогично, суммарный коэффициент теплоотдачи комбинированного конденсатора можно представить как $\alpha_{\text{кв}} = \alpha_{\text{рад}} + \alpha_{\text{исп}}$. Согласно моделированию, для традиционного воздушного конденсатора оценивался средний коэффициент теплопередачи порядка 25 Вт/(м²·К), тогда как для радиационно-испарительного – около 65 Вт/(м²·К) (в том числе ~15 Вт/(м²·К) за счет излучения и ~50 Вт/(м²·К) за счет испарения). Эти расчётные значения затем были уточнены экспериментально.

Дополнительно была проведена расчетно-аналитическая оценка работы холодильного цикла на R290 с двумя вариантами конденсатора (воздушным и радиационно-испарительным) при разных температурах окружающей среды. Модель позволила спрогнозировать изменение холодильного коэффициента (COP) в зависимости от внешних условий. Ожидалось, что благодаря более эффективному отводу тепла новый конденсатор позволит поддерживать более низкое давление конденсации, повышая COP особенно при высоких температурах наружного воздуха.

Экспериментальная установка. На основе проведенных расчетов разработан конструктивный прототип радиационно-испарительного конденсатора и собрана лабораторная установка для его испытаний (рис. 3).

Конструкция конденсатора включает вертикально ориентированный змеевик с хладагентом, заключённый в кожух, по внешней поверхности которого стекает пленка воды. Снаружи размещена излучающая панель-радиатор. Каркас изготовлен из профильных труб с оптимальным зазором между испарительным кожухом и излучающей поверхностью, что обеспечивает равномерное распределение воды по всей площади охлаждения. Для смачивания поверхности применена система орошения: на верхней части конденсатора установлены форсунки малого расхода, питаемые насосом. Подача воды управляется программируемым реле, периодически включая насос, это поддерживает тонкую непрерывную пленку воды на излучающей панели при минимальном расходе жидкости. Поверхность радиатора покрыта специальным высокоэмиссионным покрытием (на основе оксида алюминия с добавками), обладает коррозионной стойкостью к воде и атмосферным воздействиям.



Рис. 3. Конструкция радиационно-испарительного конденсатора

Оборудование стенда. Экспериментальная холодильная установка (рис. 4) собрана по схеме одноступенчатой парокомпрессионной машины с двумя конденсаторами, между которыми можно переключаться. В состав стенда входят: герметичный компрессор, разработанный специально под пропан R290 (холодопроизводительность ~238 Вт при -23°C), испаритель в виде охлаждаемой камеры объемом ~90 л (от бытового морозильника), стандартный воздушный конденсатор (теплообменник Алюминиевый, рассчитанный на ~980 Вт тепловой нагрузки) и ресивер хладагента объемом 1 л. Разработанный радиационно-испарительный конденсатор подключен параллельно воздушному через систему медных трубопроводов с вентилями. Переключая шаровые краны, можно направлять горячий газ от компрессора либо в штатный воздушный конденсатор, либо в радиационно-испарительный, что позволяет напрямую сравнить их работу в одинаковых условиях. Для контроля параметров в систему внедрено несколько точек отбора: установлены манометры и порты Шредера на линиях, термометры на входе и выходе конденсаторов, расходомер воды на входе оросителя и электроизмерительные приборы для мониторинга потребления компрессора и насоса. Такое исполнение обеспечивает сбор данных для расчета тепловых потоков и коэффициента холодопроизводительности установки.



Рис. 4. Конструкция экспериментального стенда

Проведение эксперимента. Испытания проводились в лабораторных условиях при окружающей температуре $\sim +25^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности $\sim 60\%$. Холодильная машина сначала выводилась на установившийся режим с воздушным конденсатором (этот режим служил контрольным). Затем конденсация переключалась на радиационно-испарительный конденсатор; при этом включалась система орошения: насос подавал воду к форсункам, смачивая панель. Ночью излучающая поверхность была направлена в зенит для максимального обзора небосвода. Измерялось давление конденсации, температура конденсатора, расход воды и энергопотребление насоса. Эксперименты проводились сериями, в том числе варьировался режим работы системы орошения (непрерывная подача воды vs. циклическая с паузами), чтобы найти оптимальный баланс между интенсивностью охлаждения и расходом воды/электроэнергии. Длительность каждого режима была достаточной для установления квазистационарной работы системы. Полученные данные сравнивались с расчетными прогнозами модели. Гидравлическая схема установки приведена на рисунке 5.

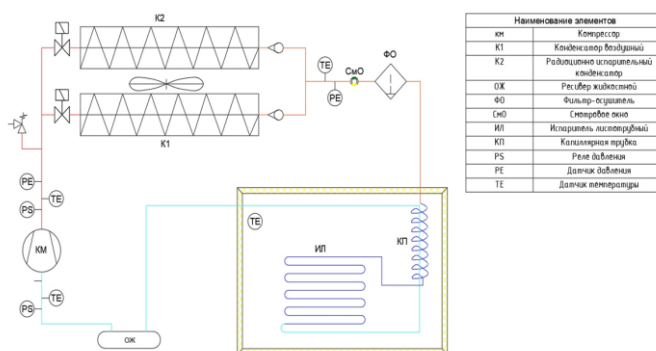


Рис. 5. Гидравлическая схема установки

Методика эксперимента. Программирование режимов испытаний. Настройка параметров старта: первоначальная температура камеры (+9°C). Условия для достижения целевых значений (–5...–20°C).

Порядок проведения испытаний:

- Этап I: Запуск стенда;
- Этап II: фиксирование данных при стабилизации температуры;
- Этап III: динамическое понижение и замеры в заданные интервалы времени.

Варианты смены внешних условий. Изменение окружающей температуры ($T_{окр} = 5, 10, 20^\circ\text{C}$). Варьирование расхода воды на радиационно-испарительном конденсаторе. В эксперименте использовались адресные температурные датчики с точностью измерения 0,1°C. Электронный манометрический коллектор имеет точность 0,05 для давления и для температуры.

Результаты исследований и их обсуждение. Сравнение производительности конденсаторов. Эксперименты подтвердили преимущество комбинированного метода охлаждения. При наружном воздухе +25°C и влажности 60% радиационно-испарительный конденсатор обеспечил отвод тепла до 650 Вт/м² поверхности (рис. 6). Для сравнения, штатный воздушный конденсатор аналогичной площади отводил до 500 Вт/м² в тех же условиях. Таким образом, достижение ~30%-го прироста теплоотдачи соответствует ожиданиям, полученным ранее в теоретических оценках. В таблице 1 показана динамика теплотоков.

Таблица 1

Динамика теплотоков

$T_{окр},$ °C	Время, мин	$\Delta T_{исп},$ К	$\alpha_{исп},$ Вт/(м ² ·К)	$\dot{Q}_{исп},$ Вт	$A_{воздух},$ Вт/(м ² ·К)	$\dot{Q}_{cond,возд.},$ Вт	$\alpha_{rad+evap},$ Вт/(м ² ·К)	$\dot{Q}_{cond,rad},$ Вт
5,0	0,0	4,0	27,6	110,4	18,9	208	51,9	110
5,0	10,0	5,0	33,0	164,9	18,9	208	51,9	164,9
5,0	20,0	15,0	40	185,5	18,9	208	51,9	185,5
5,0	30,0	20,0	48	200	18,9	208	51,9	200
5,0	40,0	25,0	50	220,3	18,9	208	51,9	220,3
10,	0,0	1,0	9,1	9,1	25,0	275	55,0	9,1
10,	10,0	10,0	57,4	103	25,0	275	55,0	103
10,	20,0	20,0	48	147,7	25,0	275	55,0	147,7
10,	30,0	25,0	50	173,2	25,0	275	55,0	173,2
10,	40,0	30,0	60	194,8	25,0	275	55,0	194,8
20,	0,0	11,0	40	102,2	33,0	362	160,0	102,2
20,	10,0	20,0	65	126,0	33,0	362	160,0	126,0
20,	20,0	30,0	69	158,9	33,0	362	160,0	158,9
20,	30,0	35,0	75	177,4	33,0	362	160,0	177,4
20,	40,0	40,0	76	189,7	33,0	362	160,0	189,7

Давление конденсации при работе комбинированного конденсатора оказалось существенно ниже, чем при воздушном (например, при 25°C наружного воздуха снижение на ~0,5-0,7 бар), что привело к уменьшению энергопотребления компрессора (рис. 7). Холодильный коэффициент установки (COP) возрос примерно на 10-15% благодаря снижению температуры конденсации. Визуально наблюдалось интенсивное испарение воды с панели (температура поверхности панели поддерживалась ниже температуры воздуха). В ночные часы радиационное охлаждение

способствовало дополнительному охлаждению панели: разность температур поверхности панели и окружающего воздуха достигала 3-5°C в лучшие моменты ясной ночи (рис. 8).

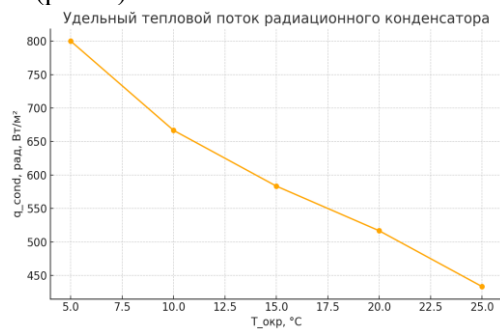


Рис. 6. Зависимость теплового потока от температуры окружающей среды

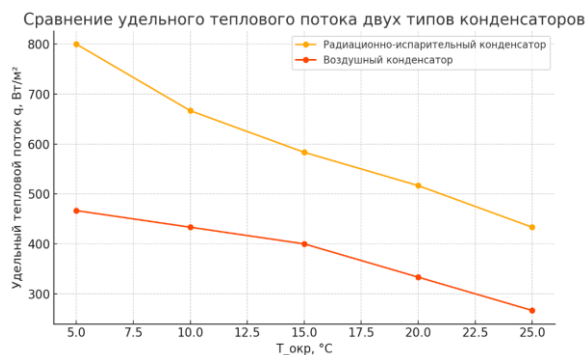


Рис. 7. Сравнение удельного теплового потока радиационно-испарительным и воздушным конденсатором

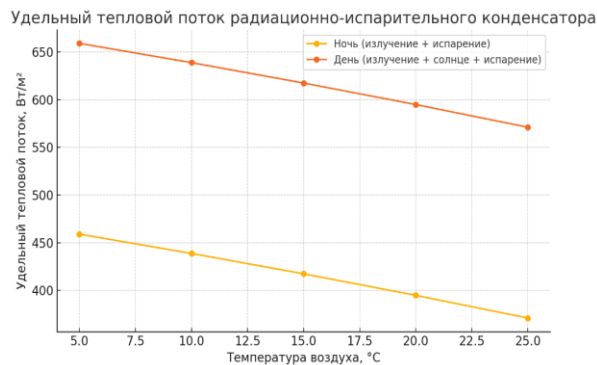


Рис. 8. Сравнение удельного теплового потока в ночное и дневное время

Влияние режимов орошения. В ходе испытаний варьировался расход воды и периодичность ее подачи. Установлено, что существует оптимальный режим прерывистого орошения: непрерывная подача давала незначительный выигрыш в теплоотводе, но приводила к избыточному расходу воды, тогда как слишком длительные паузы вызывали пересыхание панели и снижение охлаждающей способности. Оптимальным оказался режим циклического орошения с интервалом ~ 3-5 минут между подачами, при котором удавалось

поддерживать тонкий водяной слой без перерывов. Этот режим обеспечил минимальный расход воды ($\sim 0,3$ л/ч) при сохранении высокой эффективности охлаждения. Также выяснилось, что температура подаваемой воды влияет на производительность: охлаждение оросительной воды ночью (за счёт радиации) слегка повышало общий эффект. Таким образом, правильно настроенная система орошения позволяет достичь компромисса между интенсивностью испарения и затратами воды/энергии.

Энергоэффективность и экология. Применение нового конденсатора позволило сократить время работы компрессора, необходимое для отвода заданной тепловой нагрузки. В результате суммарное энергопотребление холодильной установки снизилось. По расчетным оценкам и данным испытаний, годовая экономия электроэнергии может составлять $\sim 15-20\%$ при эксплуатации системы в жарком климате за счет более эффективного отвода тепла и уменьшения потерь. Кроме того, использование пропана R290 в качестве хладагента исключает выбросы фторсодержащих парниковых газов, тем самым снижая углеродный след холодильной установки. Комбинированное использование пассивных методов охлаждения означает, что для отвода части тепла не требуется вентилятор или насос (кроме маломощного насоса орошения), а значит уменьшаются и прямые затраты энергии на процесс конденсации. С учетом экономии электроэнергии на компрессоре ($\sim 25-30\%$) и небольших затрат на насос орошения, радиационно-испарительный конденсатор демонстрирует высокую энергоэффективность.

Следует отметить и ограничения метода. Эффективность радиационного охлаждения снижается в облачную погоду и при высокой влажности воздуха, а испарительного – в сырую и дождливую погоду. В условиях повышенной влажности (более $\sim 80\%$) ночное излучение и вовсе становится основным действующим фактором, тогда как испарение замедляется. Поэтому максимальный эффект комбинирования проявляется в засушливом климате, либо при использовании системы преимущественно ночью. Тем не менее, даже в относительно влажных условиях комбинированный конденсатор будет работать не хуже обычного воздушного, а в благоприятные периоды – значительно лучше. Экспериментально подтверждена существенная зависимость охлаждающей способности от параметров оросительной воды (ее расхода, температуры) и от интенсивности радиационного охлаждения окружающей среды. Это означает, что для поддержания оптимальной работы в меняющихся условиях необходима система управления (например, датчики влажности/температуры, регулирующие подачу воды). Данный вопрос выходит за рамки базового эксперимента и относится к дальнейшим исследованиям.

Заключение. Проведенная работа продемонстрировала возможность эффективной интеграции радиационного и испарительного охлаждения в одном теплообменном устройстве – радиационно-испарительном конденсаторе. Разработана и экспериментально проверена конструкция пассивного конденсатора на хладагенте R290, показывающая высокую производительность и энергетическую эффективность. Основные выводы и результаты исследования:

1. Создан работоспособный прототип конденсатора, объединяющего излучение тепла в небо и испарение воды для отвода теплоты конденсации. Показано, что при $+25^\circ\text{C}$ наружного воздуха и 60% относительной влажности комбинированный конденсатор обеспечивает теплоотдачу до 650 Вт/м^2 , что

на 25-30% выше, чем у традиционного воздушного конденсатора того же габарита.

2. Благодаря снижению давления конденсации достигается экономия электроэнергии: компрессор работает менее нагруженно, сокращается его рабочее время. Оценочно годовое энергопотребление системы с радиационно-испарительным конденсатором на 15-20% ниже, чем с обычным конденсатором. Это прямо влияет на экономическую эффективность и уменьшает выбросы CO₂. Применение природного хладагента пропана (R290) полностью исключает использование высоко-GWP хладагентов, повышая экологическую безопасность системы.

3. Разработаны конструктивные решения, обеспечивающие стабильную работу комбинированного конденсатора: специальный излучающий радиатор с высоким коэффициентом черноты, система оросительных форсунок для поддержания равномерной водяной пленки, коррозионностойкие материалы. Эти решения доказали свою эффективность в условиях эксперимента, позволив поддерживать режим испарения без перебоев и достичь максимального эффекта охлаждения.

4. Перспективы применения радиационно-испарительного конденсатора обширны. Он может использоваться в энергоэффективных системах кондиционирования и охлаждения, особенно в районах с жарким и сухим климатом, где его преимущества проявляются наиболее ярко. Полученные результаты и рекомендации могут быть внедрены в промышленное и бытовое холодильное оборудование для повышения его энергоэффективности и устойчивости к климатическим условиям Средней Азии.

В дальнейшем планируется провести исследования по автоматизации системы орошения (внедрение датчиков температуры и влажности для адаптивного управления подачей воды), а также изучить долговременную надёжность и коррозионную стойкость материалов радиационной панели при длительной эксплуатации. Кроме того, интерес представляет масштабирование технологии для более мощных холодильных систем и интеграция радиационно-испарительного охлаждения с солнечными коллекторными установками, что могло бы обеспечить полностью пассивные энергосберегающие системы охлаждения. В целом, выполненное исследование подтверждает, что комбинированные радиационно-испарительные конденсаторы являются перспективным направлением развития холодильной техники, позволяющим существенно снизить энергопотребление и обеспечить экологическую устойчивость без потери эффективности.

Список литературы

1. Amir A., Van Hout R. A transient model for optimizing a hybrid nocturnal sky radiation cooling system // *Renewable Energy*. – 2019. – Vol. 132. – P. 370-380.
2. Farmahini-Farahani M., Heidarinejad G. Increasing effectiveness of evaporative cooling by pre-cooling using nocturnally stored water // *Applied Thermal Engineering*. – 2012. – Vol. 38. – P. 117-123.
3. Heidarinejad G., Sabetghadam F., Zahmatkesh I. Investigation of a hybrid system of nocturnal radiative cooling and direct evaporative cooling // *Building and Environment*. – 2010. – Vol. 45. – P. 1521-1528.
4. Kecebas M.A., Aydin A.A., Yilbas B.S., Sahin A.Z. Passive radiative cooling design with broadband optical thin-film filters // *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. – 2017. – Vol. 198. – P. 179-186.

5. Li J., Tang X., Zhong Y., et al. A tandem radiative/evaporative cooler for weather-insensitive and high-performance daytime passive cooling // *Science Advances*. – 2022. – Vol. 8. – No. 32. – P. eabq0411.
6. Mao M., Feng C., Pei J., Liu H., Jiang H. A triple-layer membrane with hybrid evaporation and radiation for building cooling // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – No. 6. – P. 2750.
7. Цой А.П. Моделирование работы установки с радиационным охлаждением для кондиционирования воздуха [Текст] / А.П. Цой, А.С. Грановский, Д.А. Цой, А.В. Бараненко // *Вестник Международной академии холода*. – 2019. – № 3. – С. 3–14.
8. Исаев С.И., Кожин И.А., Кофанов В.И. Теория тепломассообмена [Текст]: учебник для вузов / С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов. – М.: Высшая школа, 1979. – 495 с.
9. Anderson T., Duke M., Carson J. Performance of an unglazed solar collector for radiant cooling // *Australian Solar Cooling 2013 Conference*. – Sydney: Australian Solar Cooling Interest Group, 2013.
10. Samuel D.G.L., Nagendra S.M.S., Maiya M.P. Passive alternatives to mechanical air conditioning of building: a review // *Building and Environment*. – 2013. – Vol. 66. – P. 54-64.
11. ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment. – 2016. – Chapter 8, Section 4.
12. Jones W.P. Air Conditioning Engineering. – 5th ed. – London: Routledge, 2000. – Section 3.

Материал поступил в редакцию 29.05.25, принят 27.06.25.

Н.М. Весельский¹, А.П. Цой¹, Д.Е. Лоенко¹

¹*Алматы технологиялық университеті, Алматы қ., Қазақстан*

РАДИАЦИЯЛЫҚ-БУЛАНДЫРҒЫШ КОНДЕНСАТОРДЫ ЖОБАЛАУ ЖӘНЕ ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа. Бұл жұмыс табиғи хладагент R290 негізінде жұмыс істейтін тоңазытқыш жүйеге арналған біріктірілген радиациялық-буландырғыш конденсаторды жобалауға арналған. Бұл құрылғыда екі пассивті салқындату әдісі біріктірілген: «суық аспанға» сәуле шығару арқылы жылу әкету және судың булануы. Эксперименттік үлгі жасалып, сынақтан өткізілді. Нәтижелер көрсеткендей, сыртқы температура +25°C және салыстырмалы ылғалдылық шамамен 60% болған жағдайда, біріктірілген конденсатор 1 м² беттен 650 Вт-қа дейін жылуды әкетуге қабілетті, бұл дәстүрлі ауа конденсаторына қарағанда 25-30%-ға жоғары тиімділікті көрсетеді. Компрессор жүктемесі мен энергия тұтынуы (~15-20% жылдық үнем) азайтылды, бұл ұсынылған тәсілдің болашағы бар екенін дәлелдейді.

Тірек сөздер: радиациялық-буландырғыш конденсатор, пассивті салқындату, радиациялық салқындату, буландырғыш салқындату, энергия тиімділігі, салқындату сыйымдылығы, R290 (пропан).

N.M. Veselsky¹, A.P. Tsoi¹, D.E. Loenko¹

¹*Almaty Technological University, Almaty, Kazakhstan*

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A RADIATIVE-EVAPORATIVE CONDENSER

Abstract. This study is dedicated to the development of a combined radiative-evaporative condenser for a refrigeration system operating with the natural refrigerant R290. The proposed device integrates two passive cooling methods: heat removal through

radiation to the “cold sky” and water evaporation. An experimental prototype was developed and tested. The results showed that at an ambient temperature of +25°C and relative humidity of about 60%, the combined condenser was capable of removing up to 650 W/m² of heat, which is 25-30% more efficient than a conventional air-cooled condenser. A reduction in compressor load and energy consumption (~15-20% annual savings) was achieved, confirming the potential of the proposed approach.

Keywords: radiative-evaporative condenser, passive cooling, radiative cooling, evaporative cooling, energy efficiency, cooling capacity, R290 (propane).

References

1. Amir A., Van Hout R. A transient model for optimizing a hybrid nocturnal sky radiation cooling system // *Renewable Energy*. – 2019. – Vol. 132. – P. 370-380.
2. Farmahini-Farahani M., Heidarinejad G. Increasing effectiveness of evaporative cooling by pre-cooling using nocturnally stored water // *Applied Thermal Engineering*. – 2012. – Vol. 38. – P. 117-123.
3. Heidarinejad G., Sabetghadam F., Zahmatkesh I. Investigation of a hybrid system of nocturnal radiative cooling and direct evaporative cooling // *Building and Environment*. – 2010. – Vol. 45. – P. 1521-1528.
4. Kecebas M.A., Aydin A.A., Yilbas B.S., Sahin A.Z. Passive radiative cooling design with broadband optical thin-film filters // *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. – 2017. – Vol. 198. – P. 179-186.
5. Li J., Tang X., Zhong Y., et al. A tandem radiative/evaporative cooler for weather-insensitive and high-performance daytime passive cooling // *Science Advances*. – 2022. – Vol. 8. – No. 32. – P. eabq0411.
6. Mao M., Feng C., Pei J., Liu H., Jiang H. A triple-layer membrane with hybrid evaporation and radiation for building cooling // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – No. 6. – P. 2750.
7. Tsoy, A.P., Granovskiy, A.S., Tsoy, D.A., Baranenko, A.V. Modelirovanie raboty ustanovki s radiatsionnym okhlazhdeniem dlya konditsionirovaniya vozdukh [Modeling the operation of a system with radiative cooling for air conditioning] // *Journal of the International Academy of Refrigeration*. – 2019. – No. 3. – P. 3-14. [in Russian].
8. Isaev, S.I., Kozhinov, I.A., Kofanov, V.I. Teoriya teplomassoobmena [Theory of Heat and Mass Transfer]: textbook for Universities. – Moscow: Higher school, 1979. – 495 p. [in Russian].
9. Anderson T., Duke M., Carson J. Performance of an unglazed solar collector for radiant cooling // *Australian Solar Cooling 2013 Conference*. – Sydney: Australian Solar Cooling Interest Group, 2013.
10. Samuel D.G.L., Nagendra S.M.S., Maiya M.P. Passive alternatives to mechanical air conditioning of building: a review // *Building and Environment*. – 2013. – Vol. 66. – P. 54-64.
11. ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment. – 2016. – Chapter 8, Section 4.
12. Jones W.P. Air Conditioning Engineering. – 5th ed. – London: Routledge, 2000. – Section 3.