

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF643527>

EDN: NICMBV

Эффективная система охлаждения питательного раствора на базе адсорбционной холодильной машины в гидропонных технологиях тепличных хозяйств

И.Н. Мирмов¹, Н.И. Мирмов², С.А. Щипцов³¹ Институт ядерных исследований РАН, Москва, Российская Федерация;² Компания 3R-Технологии, Хайфа, Израиль;³ Интер РАО – Центр управления закупками, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Эффективность сельскохозяйственного производства напрямую зависит от правильного увлажнения почвы. Питательный раствор, используемый для увлажнения, должен иметь оптимальную температуру (19–24°C), обеспечивающую достаточно высокое содержание кислорода в растворе и в целом благоприятный климатический режим для растений. Особое значение температура питательного раствора имеет в странах и регионах с сухим и жарким климатом, где основной задачей становится охлаждение почвы при увлажнении. На охлаждение питательного раствора тратится большое количество ресурсов, что существенно повышает себестоимость продукции.

Цель работы — разработка эффективной, экономичной и достаточно универсальной системы охлаждения питательного раствора для тепличного растениеводства.

Методы. Методом решения задачи выбрано использование для охлаждения усовершенствованной адсорбционной холодильной машины (АдХМ), работающей на вторичных и бросовых источниках тепла, а также — ряда инноваций в ранее разработанные тепловые агрегаты.

Результаты. Использование в качестве холодильного агента метилового спирта (метанол) дало возможность снизить температуру греющего источника до 60–75°C и, таким образом, существенно вариативность использования АдХМ и сделать её более независимой от поставщиков энергии. В качестве адсорбента в холодильной машине использован упрочненный активированный уголь. Эти усовершенствования позволили увеличить производительность машины в два раза (при одинаковых габаритах адсорберов) и получать значительно более низкую температуру кипения в испарителе (–5°C...–2°C) по сравнению с имеющимися коммерческими аналогами (например, АдХМ фирмы SorTechAG (Германия)).

С целью интенсификации процесса охлаждения питательного раствора модернизированы некоторые конструкции охладителей. Разработана компактная и высокоэффективная конструкция охладителя гидропонного раствора, в котором применены тепловые трубки (двухфазные термосифоны). Применение в охладителе гидропонного раствора тепловых трубок позволяет увеличить количество передаваемого тепла в несколько раз. В конструкции охладителя раствора предусмотрена рециркуляция раствора или его перемешивание винтовой мешалкой, что значительно увеличивает коэффициент теплопередачи при охлаждении раствора.

Заключение. Разработана высокоэффективная система охлаждения питательного раствора в гидропонных технологиях с применением холодильной машины адсорбционного типа, в которой холодильным агентом является метиловый спирт, а в качестве адсорбента использован активированный уголь. За счет использования вторичных и достаточно низкопотенциальных тепловых источников достигается значительная экономия электроэнергии.

Ключевые слова: тепличное растениеводство; охлаждение питательных растворов; сорбционные холодильные машины; холодильный агент; метанол; вторичные источники теплоты; тепловые трубки.

Как цитировать:

Мирмов И. Н., Мирмов Н. И., Щипцов С.А. Эффективная система охлаждения питательного раствора на базе адсорбционной холодильной машины в гидропонных технологиях тепличных хозяйств // Холодильная техника. 2024. Т. 113, № 3. С. 137–146. DOI: 10.17816/RF643527 EDN: NICMBV

DOI: <https://doi.org/10.17816/RF643527>

EDN: NICMBV

Efficient Nutrient Solution Cooler Based on Adsorption Refrigeration System for Hydroponic Greenhouses

Ilya N. Mirmov¹, Naum I. Mirmov², Sergey A. Shchiptsov³¹ Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Science, Moscow, Russian Federation;² Company 3R-Technology, Haifa, Israel;³ Inter RAO LLC – Procurement Management Center, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Agriculture performance is directly related to the proper soil moistening. The moistening nutrient solution should have an optimal temperature (19–24°C), providing a sufficiently high oxygen content in the solution and a generally favorable climate for plants. The temperature of the nutrient solution is of particular importance in countries and regions with dry and hot climate, where the main task is to cool the soil when moistened. A large amount of resources is used to cool the nutrient solution, which significantly increases the production cost.

AIM: To develop an efficient, cost-effective, and sufficiently versatile nutrient solution cooling system for greenhouse crop production.

METHODS: To achieve the aim, we used an advanced adsorption refrigeration system (ARS) powered by secondary and waste heat sources for cooling and some previously developed innovative thermal units.

RESULTS: The use of methyl alcohol (methanol) as a refrigerating agent allowed to reduce the temperature of the heating source to 60–75°C, significantly increase operational flexibility of the ARS, and make it more independent of energy supplies. Hardened activated carbon is used as an adsorbent for the refrigeration system. These improvements allowed to double the system's performance (with the same adsorber dimensions) and reach a significantly lower boiling point in the evaporator (–5°C...–2°C) compared to the existing commercial alternatives (e.g. adsorption chillers by SorTechAG, Germany).

To intensify the nutrient solution cooling, some cooler designs have been upgraded. We developed a compact, high-performance design of a hydroponic solution cooler, which uses heat pipes (two-phase thermosiphons). Heat pipes in the hydroponic solution cooler allow to increase the amount of transferred heat by several times. The solution cooler design provides for solution recirculation or its mixing using a screw agitator, significantly increasing the heat transfer coefficient when cooling the solution.

CONCLUSION: A high-performance nutrient solution cooler has been developed using hydroponic technologies and an adsorption refrigeration system, where methyl alcohol is used as the refrigerating agent and activated carbon is used as an adsorbent. Significant power savings are achieved through the use of secondary and sufficiently low-potential heat sources.

Keywords: greenhouse crop production; nutrient solution cooling; adsorption refrigeration systems; refrigerating agent; methanol; secondary heat sources; heat pipes.

To cite this article:

Mirmov IN, Mirmov NI, Shchiptsov SA. Efficient nutrient solution cooler based on adsorption refrigeration system for hydroponic greenhouses. *Refrigeration Technology*. 2024;113(3):137–146. DOI: 10.17816/RF643527 EDN: NICMBV

ОБОСНОВАНИЕ

Для охлаждения питательного раствора в гидропонных технологиях применяют различного типа охладители воды — чиллеры. В чиллерах используют фреоновые холодильные машины с установленной мощностью электрических двигателей 0.25 кВт для охладителя на 100 литров в час и 3.5 кВт — для охладителя в 2000 литров в час. Указанные охладители снабжены компрессорной холодильной машиной и ванной для охлаждения гидропонного раствора. В ванну помещается змеевик, по которому прокачивают или холодильный агент или холодоноситель.

В гидропонных теплицах, базирующихся в жарких и сухих климатических условиях, используют охладители фирм: Carrier (USA), E2PS-GmbH (Germany), DEGA SPA (Italia). Указанные компании поставляют компрессорные тепловые насосы, которые охлаждают питательный раствор в емкостях или ваннах.

Компания TAICH (China) изготавливает промышленные охладители воды и растворов с винтовыми компрессорами. При охлаждении чистой воды, когда скорости охлаждаемой жидкости и холодоносителя соизмеримы и находятся в пределах энергетической эффективности, указанные охладители достаточно эффективны. При охлаждении гидропонных растворов, у которых расход небольшой и очень низкая скорость течения, все применяемые охладители имеют низкий КПД. Кроме того, на снижение интенсивности охлаждения влияют отложения органических и неорганических частиц на поверхности теплообмена охладительных батарей.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью представленной работы была разработка эффективной, экономичной и достаточно универсальной системы охлаждения питательного раствора на базе адсорбционной холодильной машины, работающей на вторичных и бросовых источниках тепла. В том числе в разработанной системе охлаждения предусмотрена установка фильтрации раствора перед подачей его в охладитель.

ОБЗОР

Температура питательного раствора играет важнейшую роль в успешном выращивании растений. Имеется два существенных фактора, которые зависят от температуры раствора — растворимость кислорода в воде и потребность растений в кислороде. Чем выше температура раствора, тем меньше кислорода в растворе. При росте температуры от 0 до 30°C вода теряет примерно половину своего кислорода. В чистой воде при 20°C содержится около 9.5 мг/л растворенного кислорода. При 30°C содержание кислорода падает до 7.6 мг/л. Но эти значения справедливы только для чистой воды. Повышение температуры питательного раствора приводит к усилению

метаболизма растений. Вследствие этого повышается потребность в кислороде в корневой зоне. Растения в грунте смыкают свои устьица, чтобы экономить воду, когда температура чересчур повышается (более 30°C). В гидропонике растения могут расти и при более высоких температурах. Но это возможно только при хорошей циркуляции воды, что обеспечивает высокий уровень кислорода [1–3].

Нормальным интервалом принято считать температуру раствора от 18°C до 24°C. В тепличных хозяйствах гидропонными технологиями, например, в Индии дневная температура достигает 35–40°C, что замедляет рост растений, а после цветения не появляются плоды. Кроме того, в теплицах используется метод «питательной пленки» NFT (Nutrient Film Technique). Этот метод подходит для культур с меньшим потреблением воды, таких как руккола, салат, а также для выращивания томатов с высокими требованиями.

Для южных областей России и республик Средней Азии при выращивании овощных культур в теплицах требуется поддержание таких же температурно-влажностных режимов [4]. В работе [3] подробно рассмотрены проблемы климат-контроля и различные системы охлаждения в теплицах, которые одинаковы как для теплиц с грунтом, так и с гидропонными технологиями. Процесс охлаждения разделяют на две основные категории: «пассивные» и «активные» системы. «Пассивное» охлаждение в теплице относится к конструктивному подходу (форма, материалы укрытия, проемы, ночное охлаждения почвы или питательного раствора). При этом снижение температуры внутри теплицы происходит без дополнительной подачи воды или электрической энергии. «Активное» охлаждение относится ко всем системам охлаждения, в которых используется электрическое оборудование, такое как насосы, вентиляторы, холодильные машины и тепловые насосы. Интеграция методов пассивного охлаждения с последующим активным охлаждением может одновременно обеспечить адекватные условия для роста сельскохозяйственных культур и снижение электропотребления [3].

Компрессорные холодильные машины и тепловые насосы используют для охлаждения и нагрева в тепличных хозяйствах. Большинство исследований сходятся во мнении, что с такими машинами можно эффективно контролировать температуру, влажность и выбросы CO₂. Но потребление энергии очень интенсивное и неэкономичное.

Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы широко используются в промышленности и строительстве, но очень мало проведено исследований по интеграции указанных машин для охлаждения теплиц и питательного раствора в гидропонных теплицах. В работе [5] использовали бромисто-литиевую абсорбционную холодильную машину для охлаждения воздуха в теплице. Была достигнута существенная экономия электрической энергии. Проведено несколько экспериментальных и численных исследований использования солнечной энергии для работы абсорбционных машин [6–8].

Бромисто-литиевые, а также водоаммиачные абсорбционные холодильные машины требуют для своей работы горячий источник тепла высокого потенциала порядка 110–130°C. Получить такую температуру с помощью солнечных тепловых панелей сложно и дорого.

МЕТОДЫ

Авторы в составе нескольких инновационных компаний в течение ряда лет разрабатывали и создавали сорбционные холодильные машины для широкого интервала низких и отрицательных температур [9–12]. Эти машины (абсорбционные — АбХМ и адсорбционные — АдХМ) могут использоваться в различных областях промышленности и сельского хозяйства, а также для бытовых нужд. Отличительной особенностью этих аппаратов является применение предлагаемых сорбционных машин в качестве холодильного агента метилового спирта (метанола). Использование метанола позволяет снизить температуру греющего теплоносителя до 60–65°C. Это дает возможность использовать для работы сорбционных холодильных машин обычные солнечные подогреватели или любые вторичные тепловые источники низкого потенциала (60–75°C). Для сельского хозяйства, особенно для тепличных хозяйств, сорбционные машины вполне доступны, дают

большую экономию электроэнергии, просты и дешевы в эксплуатации.

Для тепличных хозяйств, в которых требуется постоянная работа системы охлаждения (нагрева) целесообразно применять **абсорбционные** холодильные машины. В хозяйствах, в которых охлаждение требуется только в дневное время или необходимо периодически прекращать процесс охлаждения, наиболее целесообразно использовать **адсорбционные** холодильные машины.

Адсорбционные холодильные машины имеют ряд преимуществ перед абсорбционными. В АдХМ отсутствует циркуляционный насос, и нет каких-либо механизмов (самодействующие клапаны обратного действия открываются при минимальной разности давлений, а закрываются простой пружиной), работают без остановки 20–25 лет.

Применение в АдХМ более стойкого адсорбента, например, упрочненного активированного угля, а в качестве холодильного агента — метанола, позволяет увеличить производительность машины в два раза (при одинаковых габаритах адсорберов) и получать температуру кипения в испарителе порядка $-5^{\circ}\text{C} \dots -2^{\circ}\text{C}$. Вакуум в аппаратах адсорбционной холодильной машине не ниже 35–40 мм рт. ст. Это позволяет не увеличивать толщины стенок аппаратов, а обходиться установкой укрепляющих

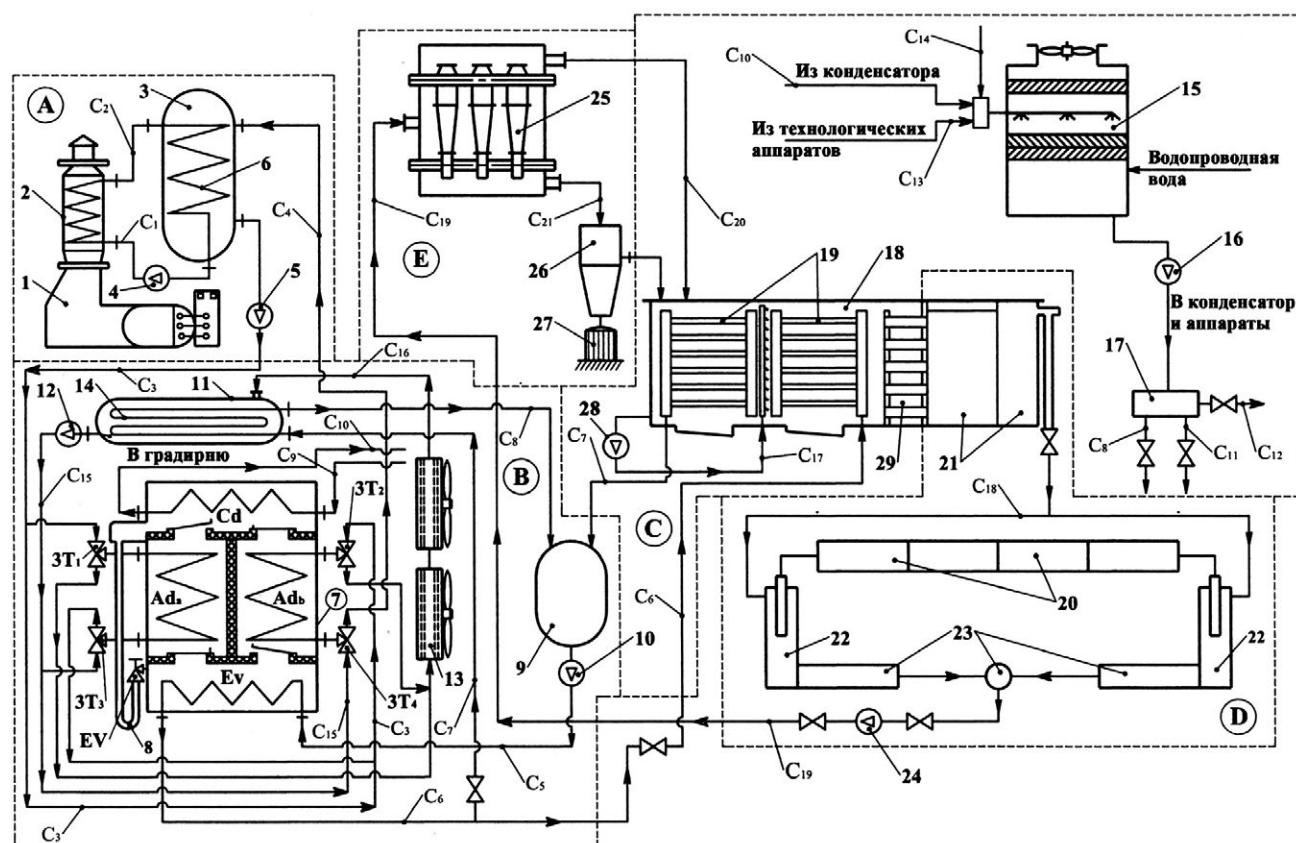


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема системы охлаждения гидропонного раствора с применением адсорбционной холодильной машины (АдХМ).

Fig. 1. Basic flow chart of a hydroponic solution cooling system with an adsorption refrigeration system (ARS) (see the text for the details).

бандажей. Разработанную авторами АдХМ сравнивали с адсорбционной машиной фирмы SorTechAG (Германия). В этой машине в качестве холодильного агента использовалась вода, адсорбент — силикагель. Немецкая машина смогла обеспечить минимальную температуру охлажденной воды не ниже 12–13°C. При этом температура горячей воды для подогрева должна была быть не менее 95°C.

Авторами разработана и успешно продвигается эффективная система охлаждения питательного раствора для сельскохозяйственных теплиц с гидропонными технологиями с использованием сорбционных холодильных машин. На разработанную систему охлаждения питательного раствора получен патент Российской Федерации [13].

Система состоит из нескольких блоков: (А, В, С, D, Е). **Блок (А)** предназначен для подготовки греющего теплоносителя для адсорбционной холодильной машины (7). **Блок (А)** состоит из дизель-генератора (1) теплообменника типа газ-жидкость (2), бака (3) со змеевиком (6) для подготовки греющего теплоносителя, циркуляционного насоса (4) и насоса (5), предназначенного для подачи горячего теплоносителя в адсорберы (Ad_a) и (Ad_b) холодильной машины (7).

Блок (В) представляет собой **адсорбционную холодильную машину (7)**. Кроме холодильной машины (7) в блок (В) включены: ресивер (9) с насосом (10), первичный

теплообменник (11) с насосом (12) и вторичный теплообменник (13), а также вентиляторная градирня (15). Вторичный теплообменник (13) воздушного охлаждения, в котором охлаждают воду, отводимую из адсорбера по окончании процесса адсорбции паров холодильного агента. Теплообменник (13) предназначен для дополнительного охлаждения воды, которая периодически подается в адсорберы (Ad_a) и (Ad_b) в процессе адсорбции паров холодильного агента.

Блок (С) состоит из охладителя гидропного раствора (18), внутри которого размещено несколько секций охладительных батарей (19). Охлажденный в испарителе (Ev) холодоноситель, подают в батареи (19), а затем возвращают в испаритель через ресивер (9). Циркуляция холодоносителя осуществляется насосом (10).

Блок (D) — это гидропонная установка, которая содержит лотки (20) для выращивания растений и напорный бак (21). Лотки (20) трубопроводом (C18) соединены с напорным баком (21). Дозированную подачу питательного раствора в лотки (20) осуществляют, например, с помощью эрлифтов (22). Охлажденный питательный раствор из напорного бака (21) по трубопроводу (C₁₈) поступает в гидропонные лотки (20). Из лотков раствор через коллекторы (23) по трубопроводу (C₁₉) насосом (24) подают в фильтровальную установку **блока (E)**.

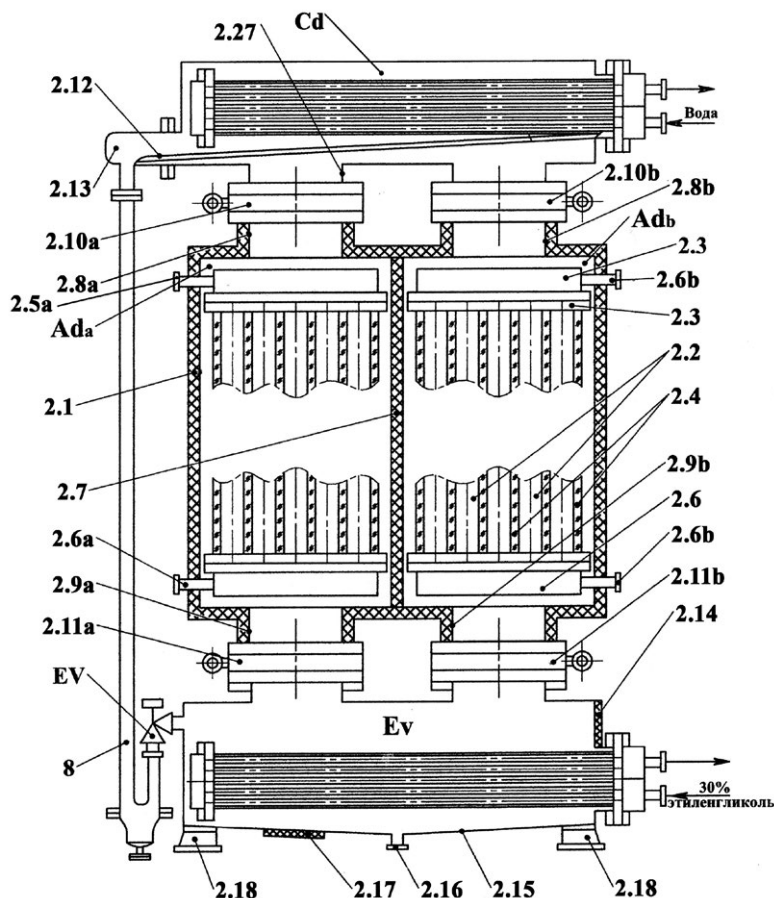


Рис. 2. Адсорбционная холодильная машина нового поколения на метаноле.

Fig. 2. New generation methanol adsorption refrigeration system (see the text for the details).

Блок (Е) — это фильтровальная установка, состоящая, например, из мульти гидроциклона (25), отстойника (26) и сборника шлама (27). Отделенный в гидроциклонах осадок поступает в отстойник (26). Шлам отводят в бочку (27), а чистый раствор сливают в охладитель (18).

На рис. 2 приведена принципиальная конструктивная схема усовершенствованной АдХМ. Холодильная машина содержит: адсорберы (Ad_a) и (Ad_b), конденсатор (Cd) и испаритель (Ev). Конденсатор соединен с испарителем сифоном (8). Холодильным агентом в данной машине является метиловый спирт (метанол). Для обеспечения непрерывной работы холодильной машины в ней установлено **два адсорбера**. Это сглаживает цикличность работы адсорбера (цикл адсорбции паров холодильного агента адсорбентом и цикл десорбции паров из адсорбента). Каждый адсорбер представляет собой герметичный коробчатый корпус (2.1), в котором размещен одноходовой теплообменник (2.2). Теплообменник помещен в патрон (2.3), выполненный из сетчатого материала, например, сетка из нержавеющей стали. В межтрубное пространство теплообменника (2.2) засыпают адсорбент (2.4). В качестве адсорбента используют гранулированный или упрочненный активированный уголь, или сорбент на основе активированного волокнистого угольного материала (Бусофит).

Имеется вариант конструктивного исполнения адсорбера — это нанесение адсорбента непосредственно на поверхность теплообменных трубок. Адсорберы снабжены патрубками (2.5а, б) и (2.6а, б) для подсоединения 3-х ходовых вентилей ($3T_1$, $3T_2$, $3T_3$ и $3T_4$). Адсорберы (Ada) и (Adb) разделены теплоизолированной перегородкой (2.7). Адсорберы снабжены паровыми патрубками (2.8а, б) и (2.9а, б), к которым подсоединены самодействующие обратные клапана (2.10а, б) и (2.11а, б).

Конденсатор (Cd) холодильной машины имеет прямоугольную форму и представляет собой теплообменник с плавающей трубной решеткой. Под трубным пучком установлен сливной поддон (2.12), по которому конденсат холодильного агента поступает в горло (2.13) сифона (8).

Испаритель (Ev) предназначен для охлаждения холодоносителя, например, **30% раствора этиленгликоля**. Также в качестве холодоносителя можно использовать

водные растворы хлористого натрия или хлористого кальция. Испаритель — затопленного типа, так как трубный пучок расположен в жидком холодильном агенте нижней части прямоугольного корпуса (2.14). Верхний ряд трубного пучка находится в паровом пространстве аппарата. Охлаждение холодоносителя происходит в трубках при кипении холодильного агента на их поверхности. Теплообменные трубки трубного пучка имеют накатные ребра, которые обеспечивают повышение коэффициента теплоотдачи при кипении холодильного агента. В торцевой стенке корпуса (2.14) закреплен дросселирующий вентиль (EV), через который холодильный агент поступает из конденсатора (Cd) в испаритель. Днище (2.15) испарителя выполнено с небольшим уклоном в сторону сливного штуцера (2.16). Так как данная холодильная машина предназначена для получения отрицательных температур, то корпус испарителя и адсорберы снабжены тепловой изоляцией (2.17). К корпусу (2.14) крепится опорная рама (на конструктивной схеме не показана), которая установлена на опорах (2.18).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В описанной выше АдХМ произведены следующие усовершенствования: заменён адсорбент (силикагель на активированный уголь); испаритель заполнен холодильным агентом метанолом вместо воды. Вместо охлаждающей воды использован 35% раствор этиленгликоля. На выходе получены отрицательные температуры до $-2...-5^{\circ}\text{C}$ при температуре греющей воды не выше 70°C . Достигнута производительность АдХМ до 20 кВт при температуре кипения метанола $-6...-10^{\circ}\text{C}$. Расход в контуре горячей воды изменялся в пределах 2,8–3,2 м³/час с температурой $70-75^{\circ}\text{C}$. В контуре отвода тепла при десорбции расход был порядка 7,8–8,0 м³/час с температурой $65-75^{\circ}\text{C}$. Расход в контуре охлаждения этиленгликоля $-3,5-4,0$ м³/час. Температура воды после испарителя холодильной машины от $+4^{\circ}\text{C}$ до -5°C .

В некоторых странах (например, в Индии) в тепличных комплексах часто используют дизель-генераторы, поэтому нами, как вариант, было предложено греть воду выхлопными газами [17]. Применялся дизель-генератор

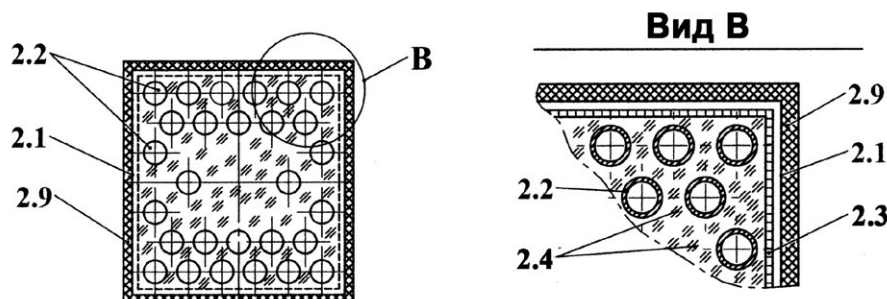


Рис. 3. Поперечное сечение адсорбера (Adb) для холодильной машины с засыпным адсорбентом.

Fig. 3. Cross-section of the adsorber (Adb) for the refrigeration system with a loose fill adsorbent.

мощностью 400 кВт. Количество выхлопных газов 0,9–1,1 м³/сек. Температура газов зависит от нагрузки на генератор и составляет 400–500°C. Приведенная в статье технологическая схема разрабатывалась для теплицы, в которой выращивают салат. В этой теплице охлаждение питательного раствора осуществляли с помощью компрессорной холодильной машины производительностью по холоду 15 кВт. Электродвигатель компрессора — 6,4 кВт. Охладитель питательного раствора представлял собой бак емкостью 10 м³. В баке размещен змеевик 2,5 м². Холодильная машина работала по 10 часов в сутки. Однако в течение 3-х месяцев охладить раствор до требуемой температуры не удалось. Эффективность предлагаемой авторами системы охлаждения в первую очередь заключается в большой экономии электроэнергии, поскольку компрессорная машина расходует энергию на подключение насосов и вентиляторов при наличии предварительного охлаждения воды в теплообменнике воздушного охлаждения. Эти расходы составляют порядка 0,5–0,6 кВт. А двигатель холодильного компрессора имеет мощность 6,4 кВт.

Помимо применения инновационной АдХМ в нашем проекте разработаны охладители питательного раствора для теплиц с различной производительностью. Основное внимание было уделено интенсификации теплообмена при охлаждении.

В охладителе усовершенствованной конструкции (рис. 4) применена рециркуляция раствора с помощью насоса и струйного коллектора, размещенного в центральной части аппарата. Данная конструкция применена в технологической схеме, показанной на рис. 1. Для другой теплицы использовали охладитель раствора с перемешивающим устройством винтового типа с диффузорной насадкой (рис. 5).

В этой конструкции охладителя раствор перемешивается и перемещается от входа к разделительной стенке. В обеих конструкциях коэффициент теплопередачи был в 2,5–3,0 раза выше, чем в традиционно применяемых охладителях. В конструкциях предлагаемых охладителей предусмотрены желоба (3.5) с крышками (3.6), которые предназначены для улавливания частиц грязи из охлаждаемого раствора. Желоба (3.5) установлены в днище (3.4) корпуса (3.1) охладителя. К желобам (3.5) подсоединен трубопровод (C₂₁) для подвода промывочной воды и трубопровод (C₂₂) для отвода грязевой смеси.

Разработана инновационная конструкция охладителя питательного раствора. Подробно конструкция этого охладителя изложена в работе [14]. На рис. 6 приведена конструктивная схема нового охладителя питательного раствора.

В предлагаемой конструкции охладителя раствора использована двухкорпусная компоновка аппарата,

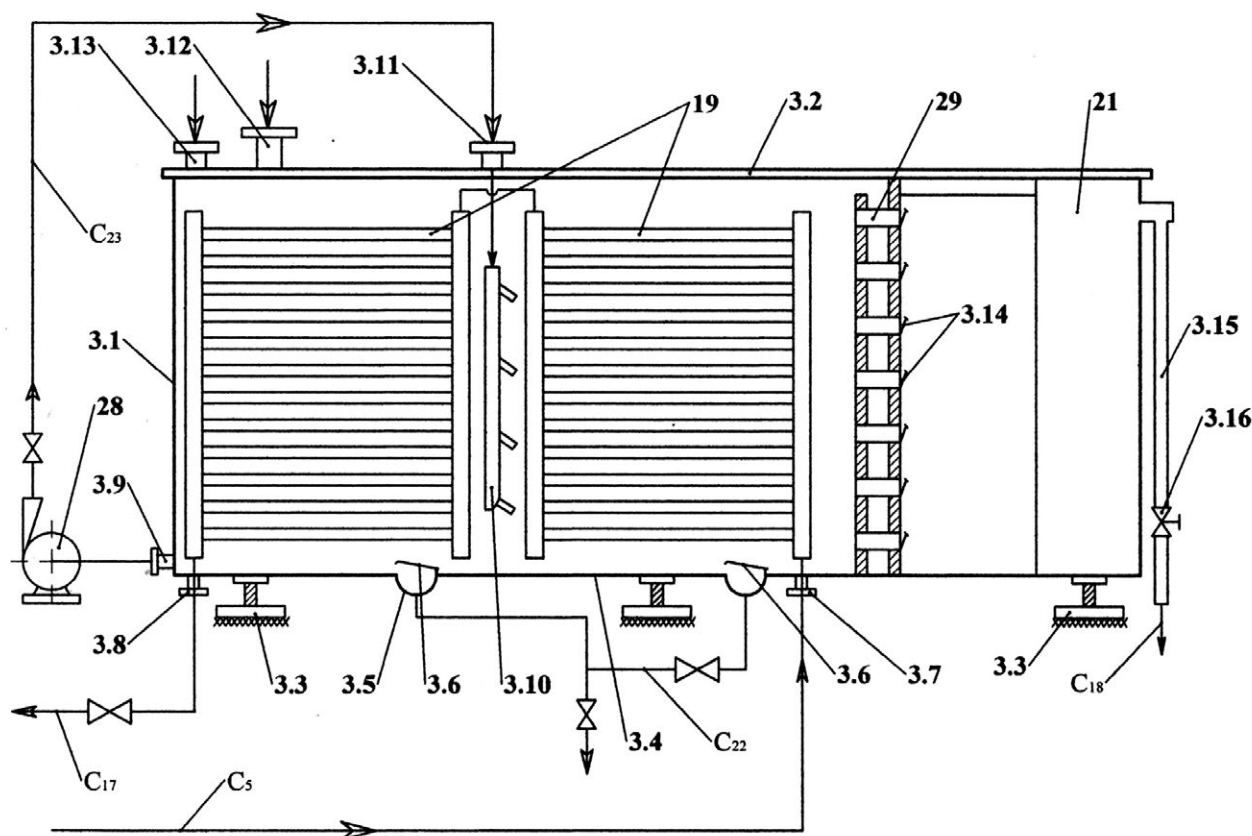


Рис. 4. Охладитель питательного раствора с рециркуляцией охлаждаемого раствора.

Fig. 4. Nutrient solution cooler with cooled solution recirculation.

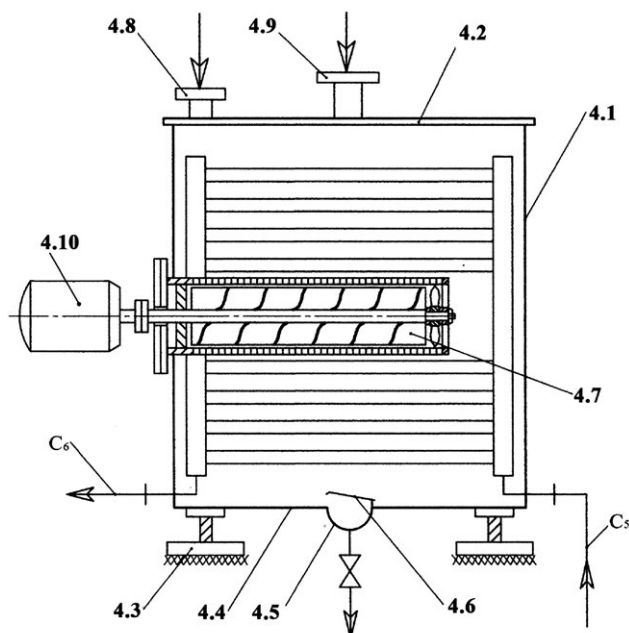


Рис. 5. Охладитель раствора с перемешивающим устройством винтового типа с диффузорной насадкой.

Fig. 5. Solution cooler with a screw-type mixing device and a diffuser nozzle.

а в качестве теплопередающих элементов использованы тепловые трубки (НР — heatpipe) или замкнутые двухфазные термосифоны (СТФТ — closed two-phase thermosiphon) с промежуточным теплоносителем. Внутренний аппарат имеет квадратную форму, что позволяет разместить в стенках максимально возможное количество теплопередающих элементов. Наружный аппарат имеет в плане форму шестигранника (рис. 6 а). Тепловые трубки размещены в стенках внутреннего аппарата. Теплый питательный раствор подают в полость внутреннего аппарата через отверстия в верхней крышке. В силу того, что скорость подачи раствора во внутренний аппарат очень низкая и не превышает 0,125 м/сек, то интенсификацию теплообмена на тепловоспринимающей поверхности тепловых трубок повышают за счет вращения внутреннего аппарата. Это позволяет увеличить коэффициент теплопередачи в 2,5–3,0 раза.

Теплоотдающие участки тепловых труб размещены в кольцевом пространстве, которое находится между стенками внутреннего и наружного аппарата. Теплоотводящие участки омываются потоком холодоносителя с температурой +2°C или -2°C. Температура теплоносителя на входе в кольцевое пространство зависит от требуемого интервала охлаждения. Для предотвращения попадания холодоносителя в питательный раствор на крышках внутреннего аппарата и на сопряженной поверхности кольцевых фланцев наружного аппарата установлены лабиринтные уплотнения. В нижнем фланце внутреннего аппарата закреплен пустотелый вал, через который охлажденный раствор сливают в отстойник. Применение элементов со сверхвысокой теплопроводностью позволило уменьшить габариты

и снизить вес охладителя в несколько раз, по сравнению с известными конструкциями охладителей. Учитывая, что рабочие давления циркулирующего охлаждаемого раствора и холодоносителя близки к атмосферному давлению, то аппараты можно изготавливать из пластиковых материалов. Такой вариант дополнительно снижает вес конструкции охладителей и их изготовление значительно дешевле.

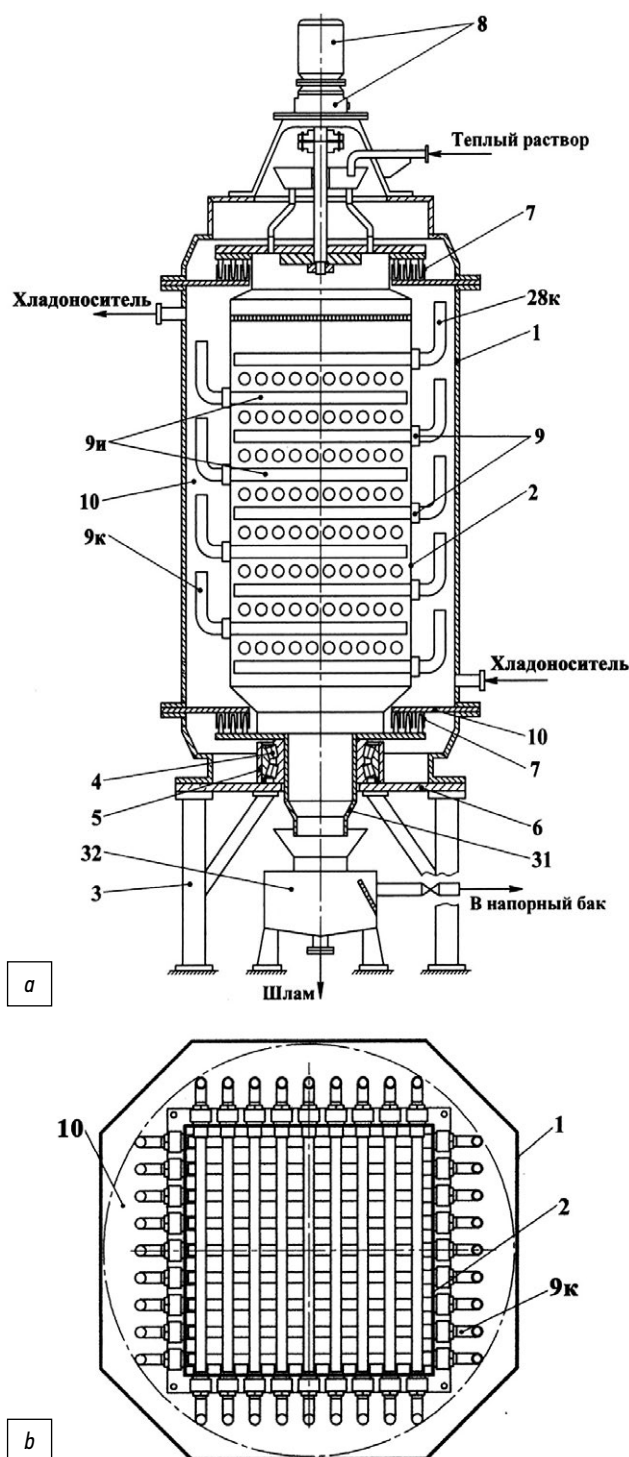


Рис. 6. Высокоэффективный охладитель раствора на тепловых трубках.

Fig. 6. High-performance heat pipe solution cooler.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана высокоэффективная система охлаждения раствора в гидропонных технологиях с применением холодильной машины адсорбционного типа, в которой холодильным агентом является метиловый спирт, а в качестве адсорбента использован активированный уголь.

В конструкции охладителя раствора предусмотрена рециркуляция раствора или его перемешивание винтовой мешалкой, что значительно увеличивает коэффициент теплопередачи при охлаждении раствора.

Применение в охладителе гидропонного раствора тепловых трубок позволяет увеличить количество передаваемого тепла в несколько раз.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов: И.Н.Мирмов — соавтор идеи использования сорбционных холодильных машин для охлаждения питательных растворов, участник исследований сорбционных холодильных машин, написание текста и редактирование статьи; И.И. Мирмов — соавтор идеи использования адсорбционных холодильных машин для охлаждения питательных растворов, изготовитель и исследователь сорбционных холодильных машин на метаноле, обзор литературы, сбор и анализ литературных источников, написание текста; С.А. Щипцов — участник исследований сорбционных холодильных машин на метаноле, сбор литературных источников, оценка экономической эффективности сорбционных холодильных машин

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Texier W. *Hydroponics for Everyone. All About Home Gardening*. Moscow: HydroScope; 2013. (In Russ.)
2. Bentley MB. *Industrial Hydroponics*. Moscow: Kolos; 1965. (In Russ.)
3. Soussi IM, Chaibi MT, Buchholz M, Saghrouti Z. Comprehensive Review on Climate Control and Cooling Systems in Greenhouses under Hot and Arid Conditions. *Agronomy*. 2022;12:626. (In Russ.) doi: 10.3390/agronomy EDN: MGCOSQ
4. Uzakov GN, Aliyarova LA, Toshmamatov BM. Thermal Engineering Calculation of Air Humidity Treatment Systems in Greenhouses with an Air Solar Collector. *Universum: tekhnicheskienauki: elektron. nauchn. zhurn*. 2021;3(84). (In Russ.) Accessed: 28.12.2024. Available from: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/11418>
5. Campiotti CA, Morosinotto G, Puglisi G, et al. Performance Evaluation of a Solar Cooling Plant Applied for Greenhouse Thermal Control. *Agric. Sci. Procedia*. 2016;8:664–669. doi: 10.1016/j.aaspro.2016.02.076
6. Buchholz M. Innovative technologies and practices to reduce water consumption. In: *Unlocking the Potential of Protected Agriculture in the Countries of the Gulf Cooperation Council Saving Water and Improving Nutrition; FAQ: Cairo, Egypt*. Cairo; 2021:85–95.
7. Soussi M, Balghouthi M, Guizani A. Energy performance analysis of a solar-cooled building in Tunisia: Passive strategies impact and improvement techniques. *Energy Build*. 2013;67:374–386. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.08.033
8. Soussi M, Balghouthi M, Guizani AA, Bouden C. Model performance assessment and experimental analysis of a solar assisted cooling system. *Sol. Energy*. 2017;143:43–62.
9. Mirmov IN, Mirmov NI. Use of solar energy and secondary heat sources for obtaining cold. *Refrigeration Technology*. 2011;9:44–48. (In Russ.) EDN: PGQCIH
10. Mirmov NI, Mirmov IN. Absorption refrigeration machines for obtaining negative temperatures. *Proceedings of BSTU, Scientific journal*. 2017;1(2(198)):328–339. (In Russ.)
11. Mirmov IN, Mirmov NI, Shiptsov SA. Two-stage combined-type refrigeration machines. *Refrigeration Technology*. 2018;9:42–46. (In Russ.) EDN: MGFXJJ
12. Mirmov IN, Mirmov NI. A new generation of sorption refrigeration machines and heat pumps. *kriofrost.academy*. November 23, 2023. Accessed: 28.12.2024. Available from: <https://kriofrost.academy/lenta/blog/novoe-pokolenie-sorbcionnyh-holodilnyh-mashin-i-teplovyyh-nasosov/?ysclid=m6tbv67c7o634705595>
13. Patent RUS 2827276 / 23.09.2024. Mirmov IN, Mirmov NI, Shchiptsov SA. Cooling system for nutrient solution in hydroponic technologies for growing crops. (In Russ.) EDN: CAIKJM
14. Patent RUS 2827279 / 23.09.2024. Mirmov IN, Mirmov NI. Nutrient solution cooler. (In Russ.) EDN: QSETHC

на метаноле, редактирование статьи. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Финансирование. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования и подготовке публикации.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: Ilya N. Mirmov: methodology, investigation, writing—original draft, writing—review & editing; N.I. Mirmov: methodology, investigation, formal analysis, writing—original draft; S.A. Shchiptsov: investigation, validation, writing—review & editing. All authors confirm that their authorship meets the international ICMJE criteria (all authors made substantial contributions to the conceptualization, investigation, and manuscript preparation, and reviewed and approved the final version prior to publication).

Funding source: This study was not supported by any external sources of funding.

Disclosure of interests: The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

ОБ АВТОРАХ

*** Мирмов Илья Наумович,**

канд. техн. наук;
адрес: Российская Федерация, 108840, Москва, Троицк,
ул. Физическая, вл. 27;
ORCID: 0009-0001-2434-7661;
eLibrary SPIN: 7958-6128;
e-mail: miily@yandex.ru

Мирмов Наум Исакович,

канд. техн. наук;
e-mail: naumir@yandex.ru

Щипцов Сергей Александрович;

e-mail: pd6@bk.ru

AUTHOR'S INFO

*** Ilya N. Mirmov,**

Cand. Sci. (Engineering);
address: 27 Fizicheskaya st, Troitsk, Moscow,
Russian Federation, 108840;
ORCID: 0009-0001-2434-7661;
eLibrary SPIN: 7958-6128;
e-mail: miily@yandex.ru

Naum I. Mirmov,

Cand. Sci. (Engineering);
e-mail: naumir@yandex.ru

Sergey A. Shchiptsov;

e-mail: pd6@bk.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author