

УДК 662.995

*Беляновская Е.А.^а, Пустовой Г.Н.^а, Скляренко А.И.^а, Сухой М.П.^а, Сухой К.М.^а,
Еремин А.О.^б, Прокопенко Е.М.^б*

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРОВОЙ КОМПРЕССОРНОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С АДсорбЦИОННЫМ ХОЛОДИЛЬНЫМ МОДУЛЕМ

^а ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», г. Днепр, Украина

^б Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр, Украина

Работа посвящена разработке эффективного алгоритма расчета эксплуатационных характеристик паровой компрессорной холодильной установки с адсорбционным холодильным модулем, который включает холодильную камеру, адсорбер, испаритель и конденсатор. В качестве холодильного агента в адсорбционном холодильном модуле предложено использовать воду. Разработан алгоритм расчета эксплуатационных характеристик установки, который включает определение холодопроизводительности паровой компрессорной холодильной установки, тепловой загрузки на конденсатор, мощности потребляемой компрессором, холодильного коэффициента паровой компрессорной холодильной установки, а также расчет массы воды, массы адсорбента, холодопроизводительности, холодильного коэффициента адсорбционного холодильного модуля и коэффициента полезного использования энергии паровой компрессорной холодильной установки с адсорбционным холодильным модулем. Оценены холодопроизводительность и холодильный коэффициент адсорбционного холодильного модуля в условиях эксплуатации типичной пароконденсационной холодильной установки. Проанализированы основные факторы, влияющие на эффективность адсорбционного холодильного модуля. Установлено, что холодопроизводительность, холодильный коэффициент адсорбционного холодильного модуля и коэффициент полезного использования энергии установки определяются тепловой нагрузкой на конденсатор, и, следовательно, массой воды, которая десорбируется и испаряется. Оценен холодильный коэффициент адсорбционного холодильного модуля и коэффициент полезного использования паровой компрессорной холодильной установки с адсорбционным холодильным модулем, равные 0,878 и 4,64. Проанализированы критерии подбора адсорбентов для адсорбционного модуля – температура регенерации, которая определяется температурами в конденсаторе, и предельная адсорбция, которая влияет на массу адсорбента и размеры адсорбера. Проведено сравнение эффективности адсорбционных холодильных модулей на основе силикоалюмофосфатов и композитных адсорбентов «силикагель – натрий ацетат». Показана перспективность использования композитов «силикагель – CH_3COONa ». Установлен оптимальный состав композита (80% натрия ацетата и 20% силикагеля), который соответствует минимальным размерам адсорбера. Показана перспективность использования адсорбционного преобразования тепловой энергии для утилизации низко-потенциальной тепловой энергии при эксплуатации паровых компрессионных холодильных установок.

Ключевые слова: адсорбционное преобразование тепловой энергии, композитный адсорбент, паровая компрессионная холодильная установка, адсорбция, адсорбционная емкость.

DOI: 10.32434/2521-6406-2020-8-2-3-9

© Беляновская Е.А., Пустовой Г.Н., Скляренко А.И., Сухой М.П., Сухой К.М., Еремин А.О., Прокопенко Е.М., 2020

Calculation algorithm for operating parameters of steam-compressive chilling machine with adsorptive chilling unit

Постановка проблемы

Для охлаждения и хранения сельскохозяйственной продукции широкое распространение получили паровые компрессионные холодильные установки, в которых холодильным агентом является жидкости с низкими температурами кипения, главным образом, различные фтор-хлор-бром-производные метана и этана, а также пропана и бутана (так называемые хладагенты или фреоны) [1]. Подобные системы включают испаритель, где происходит отвод теплоты от охлаждаемой среды, компрессор, который сжимает пары хладагента, конденсатор, в котором происходит охлаждение хладагента и отвода теплоты от хладагента к окружающей среде, и дроссель [2]. При эксплуатации подобных систем довольно значительное количество теплоты выбрасывается в окружающую среду, что приводит к тепловому загрязнению. Это стимулирует разработку мер по утилизации низко-потенциальной тепловой энергии, одной из которых является адсорбционное преобразование низко-потенциальной тепловой энергии. Однако, для внедрения подобных систем необходим алгоритм расчета, который позволил бы дать интегральную оценку эффективности эксплуатации подобных устройств.

Анализ последних исследований и публикаций

Перспективным решением является адсорбционные преобразователи тепловой энергии, в частности, адсорбционные холодильные установки. Основными элементами их конструкции является солнечный коллектор, адсорбер, конденсатор и испаритель, который установлен возле холодильной камеры [3]. Обычно адсорбционная холодильная установка работает в две стадии: адсорбция и испарения хладагента, которая способствует снижению температуры в холодильной камере, и регенерация адсорбента, то есть десорбция холодильного агента, и его конденсация.

Одним из перспективных хладагентов, благодаря экологической безопасности и нетоксичности, является вода. В качестве адсорбентов предлагались различные типы силикагелей [3–5], цеолитов [6,7], металлоорганических координационных полимеров MOF [8] и композитных материалов типа «соль в пористой матрице» [9,10].

Очевидно, ключевым фактором, который влияет на конструктивные характеристики и эффективность адсорбционной холодильной установки, являются свойства адсорбента.

Целесообразно рассмотреть возможность

внедрения адсорбционного модуля в паровую компрессорную холодильную установку.

Формулирование цели исследования

Представленная работа посвящена разработке алгоритма расчета эксплуатационных характеристик паровой компрессорной холодильной установки с адсорбционным модулем.

Изложение основного материала исследования

Схема предлагаемой установки представлена на рис. 1. Данная система включает два контура. Первый соответствует традиционной пароконпрессорной холодильной установке, включая компрессор 1, конденсатор 2, дроссель 3 и испаритель 4. В качестве хладагента в первом контуре предлагается использовать любой традиционный хладагент, например, R407C. Второй контур включает адсорбер 5, заполненный адсорбентом, в котором размещен теплообменник 6, дополнительную холодильную камеру 7, конденсатор 8 и испаритель 9. Во втором контуре в качестве хладагента предлагается использовать воду.

В отличие от традиционных установок цикла теплоту от конденсатора 2 предлагается использовать для подогрева адсорбента и его регенерацию. Эксплуатация адсорбционного холодильного модуля осуществляется в два этапа – получения холода и регенерация адсорбента. На первом этапе пары воды диффундируют через конденсатор 8 до адсорбера 5. Адсорбция воды адсорбционным материалом способствует ее испарению в испарителе, что создает холодильный эффект в дополнительной холодильной камере 7. На втором этапе нагревают адсорбент, используя теплоту конденсации. Вода десорбируется и собирается в конденсаторе 8, дальше сливается в испаритель 9 и начинается процесс получения холода.

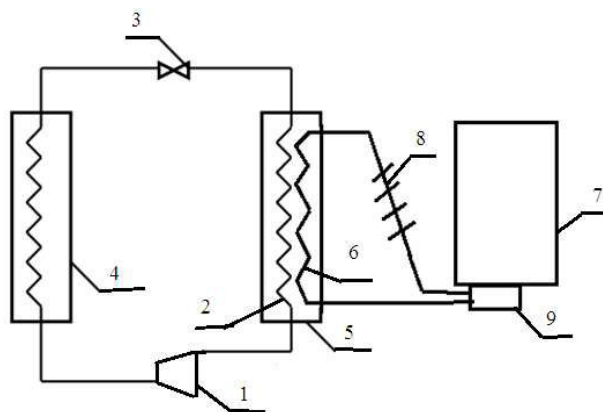


Рис. 1. Схема паровой компрессорной холодильной установки с адсорбционным холодильным модулем

Очевидно, ключевым фактором, определяющим эффективность работы адсорбционного модуля, является, прежде всего, свойства адсорбента, в частности, его адсорбционная емкость и температура регенерации. В то же время выбор адсорбентов по этим критериям ограничен эксплуатационными характеристиками паровых компрессионных холодильных установок.

Так, согласно результатам расчета по традиционной методике [11], при эксплуатации типичной пароконденсаторной холодильной установки холодопроизводительностью 322,7 кВт тепловая нагрузка на воздушный конденсатор составляет 434,18 кВт при температуре конденсации на уровне 40°C. Другим техническим решением является использование в качестве конденсатора погружного кожухотрубчатого теплообменника, в котором хладагент будет передавать теплоту перегрева и конденсации теплоносителя, то есть воде, будет циркулировать в системе теплоснабжения. При этом холодильный коэффициент составляет 3,56, а коэффициент полезного использования энергии составляет 2,89. При температуре хладагента в конденсаторе на уровне 70°C тепловая нагрузка на конденсатор составит 484,7 кВт. Холодильный коэффициент и коэффициент полезного использования энергии данной установки снижаются до 2,8 и 1,99 соответственно.

Далее проведен расчет адсорбционного модуля, массы воды и холодопроизводительности дополнительной холодильной камеры. Расчет проводился по методике, которая является обратной, разработанной в [10].

На первой стадии предлагается проводить расчет массы воды:

$$M_{H_2O} = \frac{Q_1 \tau}{\Delta H_{des}},$$

где M_{H_2O} – масса воды, кг; Q_1 – тепловая нагрузка на конденсатор, кВт; τ – продолжительность цикла, с; ΔH_{des} – теплота десорбции, кДж/кг.

Далее производится расчет массы адсорбента, как отношение массы воды к предельной адсорбции:

$$M_{ads} = \frac{M_{H_2O}}{A_{max}},$$

где M_{ads} – масса адсорбента, кг; A_{max} – предельная адсорбция, кг/кг.

Далее производится расчет количества теп-

лоты, которое отведено от холодильной камеры:

$$Q'_2 = (M_{H_2O} \cdot \Delta H_{ev}) / \tau,$$

где Q'_2 – количество теплоты, которое отведено от дополнительной холодильной камеры, кВт; ΔH_{ev} – удельная теплота испарения, кДж/кг.

Холодильный коэффициент адсорбционного холодильного модуля предлагается определять как отношение количества теплоты, которое отведено от дополнительной холодильной камеры, к тепловой нагрузке на конденсатор, а коэффициент полезного использования энергии паровой компрессорной холодильной установки с адсорбционным холодильным модулем – как отношение суммы холодопроизводительности основной и дополнительной холодильных камер к мощности, потребляемой компрессором.

Блок-схема алгоритма представлена на рис. 2.

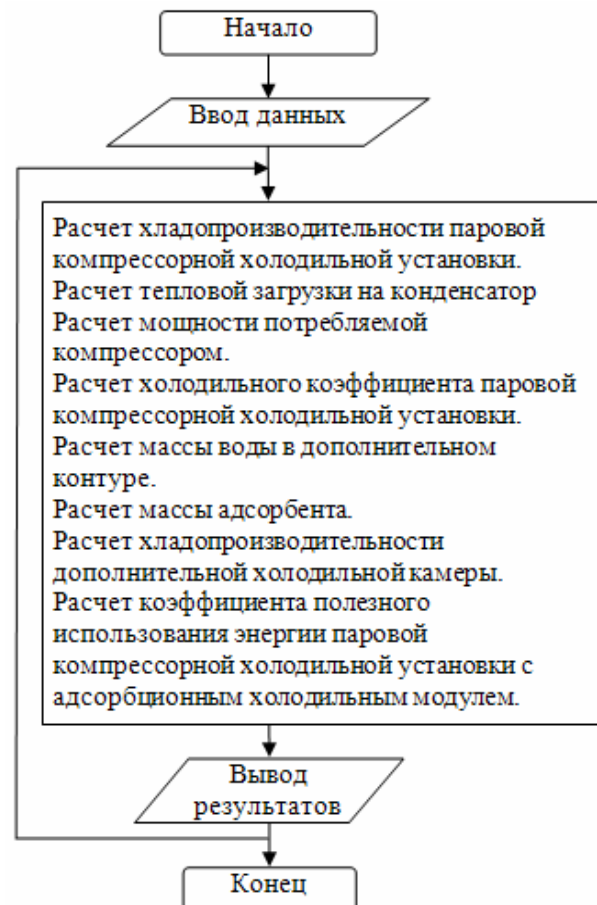


Рис. 2. Блок-схема алгоритма расчета эксплуатационных характеристик паровой компрессорной холодильной установки с адсорбционным холодильным модулем

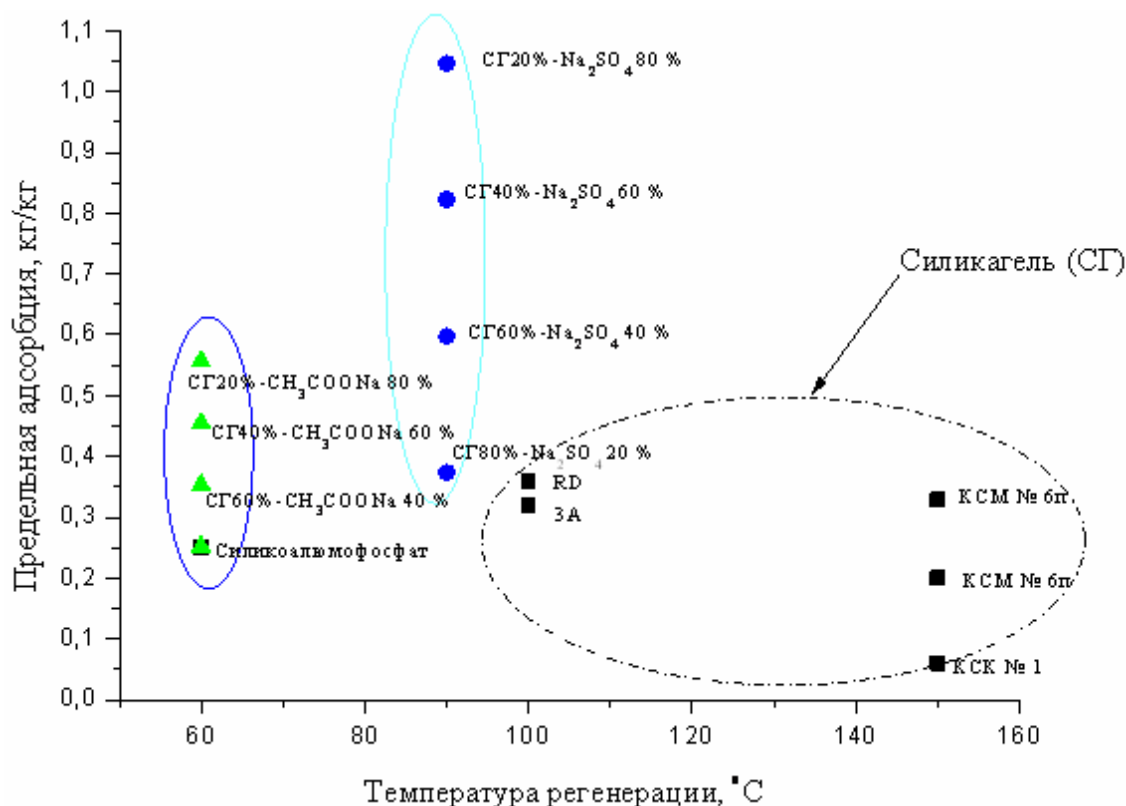


Рис. 3. Предельная адсорбция и температура регенерации адсорбентов (использованы данные [12,13] и ГОСТ 3956-76)

Основными критериями выбора адсорбента являются их температура регенерации и предельная адсорбция. При условии температуры в конденсаторе 70°C , целесообразно использовать адсорбенты с температурой регенерации порядка 60°C .

Этим требованиям отвечают (рис. 3) силикоалюмофосфаты [11] и композитные адсорбенты «силикагель – натрий ацетат» [12]. Результаты расчетов приведены в таблице. Тепловой

нагрузке на конденсатор $484,7$ кВт при продолжительности адсорбционного цикла 1 ч соответствует масса воды $306,13$ кг.

Холодопроизводительность и холодильный коэффициент адсорбционного холодильного модуля для силикоалюмофосфатов и композитов «силикагель – натрий ацетат» остаются практически идентичными, поскольку они определяются, прежде всего, тепловой нагрузкой на конденсатор, которое определяет массу воды,

Эксплуатационные характеристики адсорбционного холодильного модуля

Адсорбент	$M_{\text{H}_2\text{O}}$, кг	A_{max} , кг	M_{ads} , кг	Q_2 , кВт	Холодильный коэффициент адсорбционного холодильного модуля, ϵ	Коэффициент полезного использования энергии паровой компрессорной холодильной установки с адсорбционным модулем
Силикоалюмофосфат [12]	306,13	0,250	1224,51	425,35	0,878	4,64
Композит «Силикагель (20 %) – ацетат натрия (80 %)» [13]	306,13	0,756	404,93	425,35	0,878	4,64
Композит «Силикагель (40 %) – ацетат натрия (60 %)» [13]	306,13	0,596	513,63	425,35	0,878	4,64
Композит «Силикагель (60 %) – ацетат натрия (40 %)» [13]	306,13	0,462	662,61	425,35	0,878	4,64
Композит «Силикагель (80 %) – ацетат натрия (20 %)» [13]	306,13	0,330	927,66	425,35	0,878	4,64

испаряется. Но масса адсорбента определяется, очевидно, предельной адсорбцией.

Наименьшая предельная адсорбция и максимальная масса адсорбента соответствуют адсорбционному модулю на основе силикоалюмофосфата, который является наименее эффективным.

Несколько меньшая масса адсорбента, которая необходима для поглощения заданного количества воды, установлена для композита, который содержит 80% силикагеля и 20% натрия ацетата. Рост содержания соли, которая образует кристаллогидрат, то есть натрий ацетат, способствует повышению предельной адсорбции и, следовательно, уменьшению массы адсорбента. Наименьшая масса адсорбента, и, следовательно, объем адсорбционного модуля соответствует композиту, содержащему 20% силикагеля и 80% натрия ацетата, который целесообразно использовать в качестве адсорбционного материала.

Выводы

Разработан алгоритм расчета эксплуатационных характеристик паровой компрессионной холодильной установки с адсорбционным холодильным модулем.

Оценена холодопроизводительность адсорбционного холодильного модуля в условиях эксплуатации типичной пароконпрессионной холодильной установки. Показано, что холодопроизводительность и холодильный коэффициент адсорбционного холодильного модуля определяются тепловой нагрузкой на конденсатор и, следовательно, массой воды, которая десорбируется и испаряется.

Рассмотрены критерии подбора адсорбентов для адсорбционного модуля – температура регенерации, которую определяют температуры в конденсаторе, и предельная адсорбция, которая определяет массу адсорбента и размеры адсорбера.

Оценена эффективность адсорбционных холодильных модулей на основе силикоалюмофосфатов и композитных адсорбентов «силикагель – натрий ацетат». Подтверждена перспективность использования композитов «силикагель – CH_3COONa ». Установлен оптимальный состав композита (80% натрия ацетата и 20% силикагеля), который соответствует минимальным размерам адсорбера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мааке В., Эккерт К.Ю., Кошнен Ж.Л. Учебник по холодильной технике. – М.: Издательство Московского университета, 1998. – 1142 с.
2. Calm J.M. Comparative efficiencies and implications for greenhouse gas emissions of chiller refrigerants // International Journal of Refrigeration. – 2006. – Vol.29. – P.833-841. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.08.017>
3. Improved cooling capacity of a solar heat driven adsorption chiller / Rouf R.A., Jahan N., K.C.A. Alam, A.A. Sultan, B.B. Saha, S.C. Saha // Case Studies in Thermal Engineering. – 2020. – Vol.17. – P.100568. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100568>
4. Characterization of silica gel-based composites for adsorption cooling applications / Mohamed M. Younes, Ibrahim I. El-Sharkawy, A.E. Kabeel, Kutub Uddin, Takahiko Miyazaki, Bidyut Baran Saha // International Journal of Refrigeration. – 2020. – Volume 118. – October 2020. – P.345-353. In Press. Journal Pre-Proof. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.04.002>
5. Progress in silica gel – water adsorption refrigeration technology / D. Wang, J. Zhang, X. Tian, D. Liu, K. Sumathy // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – Vol.30. – P.85-104. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.023>
6. Wang L.W., Wang R.Z., Oliveira R.G. A review on adsorption working pairs for refrigeration // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2009. – Vol.13. – P.518-534. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.12.002>
7. Kayal S., Baichuan S., Saha B.B. Adsorption characteristics of AQSOA zeolites and water for adsorption chillers // Int. J. Heat Mass Transf. – 2016. – Vol.92. – P.1120-1127. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.060>
8. Novel technique for improving the water adsorption isotherms of metal-organic frameworks for performance enhancement of adsorption driven chillers / M.L. Palash, I. Jahan, T.H. Rupam, S. Harish, B.B. Saha // Inorganica Chimica Acta. – 2020. – Vol.501. – P.119313. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2019.119313>
9. Modelling and Performance Assessment of a Thermally-Driven Cascade Adsorption Cycle Suitable for Cooling Applications / M. Aprile, A. Freni, T. Toppi, M. Motta // Thermal Science and Engineering Progress. – 2020. – Journal Pre-proofs. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100602>
10. Адсорбционные холодильные установки на основе композитных адсорбентов «силикагель – сульфат натрия» / Е.А. Белянская, Г.Н. Пустовой, К.М. Сухой, Е.В. Коломиец, М.П. Сухой // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – 2018. – № 39(1315). – С.38-42.
11. Руководство по расчету теплового баланса холодильных камер и выбору основных проектных параметров холодильных установок. – М.: Остров, 1999. – 56 с.

12. Comparative analysis of promising adsorbent/adsorbate pairs for adsorptive heat pumping, air conditioning and refrigeration / A. Freni, G. Maggio, A. Sapienza, A. Frazzica, G. Restuccia, S. Vasta // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol.104. – P.85-95.

<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.036>

13. The study of properties of composite adsorptive materials “silica gel – crystalline hydrate” for heat storage devices / K. Sukhyu, E. Belyanovskaya, V. Kovalenko, V. Kotok, M. Sukhyu, E. Kolomiyets, M. Gubynskyi, O. Yeromin, O. Prokopenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol.91. – № 1. – P.52-58.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123896>

Поступила в редакцію 24.11.2020

АЛГОРИТМ РОЗРАХУНКУ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРОВОЇ КОМПРЕСІЙНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ З АДСОРБЦІЙНИМ ХОЛОДИЛЬНИМ МОДУЛЕМ

Беляновська О.А., Пустовой Г.М., Скляренко О.І., Сухий М.П., Сухий К.М., Єрмін О.О., Прокопенко О.М.

Робота присвячена розробці ефективного алгоритму розрахунку експлуатаційних характеристик парової компресійної холодильної установки з адсорбційним холодильним модулем, який включає холодильну камеру, адсорбер, випарник і конденсатор. В якості холодильного агента в адсорбційному холодильному модулі запропоновано використовувати воду. Розроблено алгоритм розрахунку експлуатаційних характеристик установки, який включає визначення холодопродуктивності парової компресійної холодильної установки, теплового навантаження на конденсатор, потужності споживаної компресором, холодильного коефіцієнта парової компресійної холодильної установки, а також розрахунок маси води, маси адсорбенту, холодопродуктивності, холодильного коефіцієнта адсорбційного холодильного модуля і коефіцієнта корисного використання енергії парової компресійної холодильної установки з адсорбційним холодильним модулем. Оцінені холодопродуктивність і холодильний коефіцієнт адсорбційного холодильного модуля в умовах експлуатації типової парової компресійної холодильної установки. Проаналізовано основні фактори, що впливають на ефективність адсорбційного холодильного модуля. Встановлено, що холодопродуктивність, холодильний коефіцієнт адсорбційного холодильного модуля і коефіцієнт корисного використання енергії установки визначаються тепловим навантаженням на конденсатор, і, отже, масою води, яка десорбується і випаровується. Оцінений холодильний коефіцієнт адсорбційного холодильного модуля і коефіцієнт корисного використання парової компресійної холодильної установки з адсорбційним холодильним модулем, які дорівнюють 0,878 і 4,64. Проаналізовано критерії підбору адсорбентів для адсорбційного модуля – температура регенерації, яка визначається температурами в конденсаторі, і гранична адсорбція, яка впливає на масу адсорбенту і розміри адсорбера. Проведено порівняння ефективності адсорбційних холодильних модулів на основі сілікоалюмофосфатів і композитних адсорбентів «сілікагель – натрій ацетат». Показана перспективність використання композитів «сілікагель – CH_3COONa ». Встановлено

оптимальний склад композиту (80% натрію ацетату і 20% сілікагелю), який відповідає мінімальному розміру адсорбера. Показана перспективність використання адсорбційного перетворення теплової енергії для утилізації низько-потенційної теплової енергії при експлуатації парових компресійних холодильних установок.

Ключові слова: адсорбційне перетворення теплової енергії, композитний адсорбент, парова компресійна холодильна установка, адсорбція, адсорбційна ємність.

CALCULATION ALGORITHM FOR OPERATING PARAMETERS OF STEAM-COMPRESSIVE CHILLING MACHINE WITH ADSORPTIVE CHILLING UNIT

Belyanovskaya E.A.^a, Pustovoy G.M.^a, Sklyarenko A.I.^a, Sukhyu M.P.^a, Sukhyu K.M.^a, Yeromin O.O.^b, Prokopenko O.M.^b

^a Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine

^b National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, Ukraine

The work is focused on the development of an effective algorithm for calculating the operational characteristics of a steam-compressive chilling machine with an adsorptive chilling unit, which involves a cold box, an adsorber, an evaporator and a condenser, water being used as a refrigerant. An algorithm for calculating the operating parameters of the adsorptive chilling unit has been developed, which includes the determination of the cooling capacity of the steam compressor refrigeration unit, the heat load on the condenser, the power consumed by the compressor, the coefficient of performance of the steam compressor refrigeration unit, as well as the calculation of the mass of water, the mass of the adsorbent, the refrigerating capacity, the coefficient of performance of the adsorptive chilling unit and the coefficient of useful energy utilization of a steam compressive chilling machine with an adsorption chilling unit. The chilling capacity and the coefficient of performance of the adsorption chilling unit are estimated under the operating conditions of a typical steam compression chilling machine. The crucial factors affecting the efficiency of the adsorptive chilling unit are analyzed. It has been established that the chilling capacity, the coefficient of performance of the adsorption refrigeration module and the energy efficiency of the installation are determined by the thermal load on the condenser, and, therefore, by the mass of water that is desorbed and evaporated. The coefficient of performance of the adsorption chilling unit and the efficiency of the steam compressor chilling machine with the adsorptive chilling unit are estimated to be 0.878 and 4.64. The criteria for the selection of adsorbents for the adsorption module are analyzed. The temperature of regeneration is determined by the temperatures in the condenser, and the limit adsorption affects the mass of the adsorbent and the size of the adsorber. A comparison of the efficiency of adsorptive chilling unit based on silicoaluminophosphates and composite adsorbents «silica gel – sodium acetate» is carried out. The prospects of using composites «silica gel – CH_3COONa » are shown. The optimal composition of the composite was established, which corresponds to the minimal size of the adsorber, (80% sodium acetate and 20% silica gel). The prospects of using adsorptive conversion of thermal energy for utilization of low-potential thermal energy during the operation of steam compressive chilling machine are shown.

Keywords: adsorptive conversion of heat energy, composite adsorbent, steam compressive chilling unit, adsorption, adsorptive capacity.

REFERENCES

1. Maake V., Ekkert K.Yu., Koshpen Zh.L. *Uchebnyk po kholodilnoi tekhnike* [Textbook of chilling technique]. Moscow, Izdatelstvo Moskovskogo universiteta, 1998, 1142 p. (in Russian).
2. Calm J.M. Comparative efficiencies and implications for greenhouse gas emissions of chiller refrigerants. *International Journal of Refrigeration*, 2006, vol. 29, pp.833-841. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.08.017>
3. Rouf R.A., Jahan N., Alam K.C.A., Sultan A.A., Saha B.B., Saha S.C. Improved cooling capacity of a solar heat driven adsorption chiller. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2020, vol. 17, pp.100568. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2019.100568>
4. Mohamed M. Younes, Ibrahim I. El-Sharkawy, A.E. Kabeel, Kutub Uddin, Takahiko Miyazaki, Bidyut Baran Saha Characterization of silica gel-based composites for adsorption cooling applications. *International Journal of Refrigeration*, 2020, Volume 118, October 2020, pp.345-353. In Press. *Journal Pre-Proof*. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.04.002>
5. Wang D., Zhang J., Tian X., Liu D., Sumathy K. Progress in silica gel – water adsorption refrigeration technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, vol. 30, pp.85-104. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.023>
6. Wang L.W., Wang R.Z., Oliveira R.G. A review on adsorption working pairs for refrigeration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, vol. 13, pp.518-534. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.12.002>
7. Kayal S., Baichuan S., Saha B.B. Adsorption characteristics of AQSOA zeolites and water for adsorption chillers. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2016, vol. 92, pp.1120-1127. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.09.060>
8. Palash M.L., Jahan I., Rupam T.H., Harish S., Saha B.B. Novel technique for improving the water adsorption isotherms of metal-organic frameworks for performance enhancement of adsorption driven chillers. *Inorganica Chimica Acta*, 2020, vol. 501, pp.119313. <https://doi.org/10.1016/j.ica.2019.119313>
9. Aprile M., Freni A., Toppi T., Motta M. Modelling and Performance Assessment of a Thermally-Driven Cascade Adsorption Cycle Suitable for Cooling Applications. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, *Journal Pre-proofs*. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100602>
10. Belyanovskaya E.A., Pustovoi G.N., Sukhyy K.M., Kolomiyets E.V., Sukhyy M.P. *Adsorbtsionnye kholodilnye ustanovki na osnove kompozitnykh adsorbentov «silikagel – sulfat natriya»* [Adsorptive chilling machines based on composite adsorbents ‘silica gel – sodium sulphate’]. *Visnik Natsionalnogo tekhnichnogo universitetu «KhPI» Seriya: Khimiya, khimichna tekhnologiya ta ekologiya*, 2018, no 39(1315), pp.38-42. (in Russian).
11. *Rukovodstvo po raschetu teplovogo balansa holodilnykh kamer i vyboru osnovnykh proektnykh parametrov holodilnykh ustanovok* [Guidelines for calculating the heat balance of refrigeration chambers and the selection of the main design parameters of refrigeration units]. Moscow, Ostrov, 1999, 56 p. (in Russian).
12. Freni A., Maggio G., Sapienza A., Frazzica A., Restuccia G., Vasta S. Comparative analysis of promising adsorbent/adsorbate pairs for adsorptive heat pumping, air conditioning and refrigeration. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 104, pp.85-95. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.036>
13. Sukhyy K., Belyanovskaya E., Kovalenko V., Kotok V., Sukhyy M., Kolomiyets E., Gubynskyi M., Yeromin O., Prokopenko O. The study of properties of composite adsorptive materials “silica gel – crystalline hydrate” for heat storage devices. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, vol. 91, no 1, pp.52-58. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.123896>