



УДК 628.853

А. Н. ГВОЗДКОВ, канд. техн. наук, доц., ст. науч. сотрудник

**К ВОПРОСУ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛО- И ВЛАГООБМЕНА В СИСТЕМЕ «ВОЗДУХ – LiCl»**

ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН»
Россия, 127238, г. Москва, Локомотивный проезд, д. 21. Тел.: (495) 482-40-76;
эл. почта: angvo@mail.ru

Ключевые слова: хлористый литий, концентрация, тепло- и влагообмен, коэффициент влагообмена.

Рассматриваются особенности реализации процессов тепло- и влагообмена между воздухом и раствором хлористого лития (LiCl) с учетом влияния поверхностной фазы, формирующейся на границе раздела сред. Приведены результаты исследований изменения концентрации раствора в поверхностной фазе в условиях сорбции влаги из воздуха и расчетные зависимости для определения коэффициентов тепло- и влагообмена.

Современные стандарты в области кондиционирования воздуха и вентиляции предъявляют повышенные требования к качеству воздуха в помещениях, снижению уровня выбросов парниковых газов, постепенный отказ от хлорсодержащих хладагентов, а также повышению энергетической эффективности процессов обработки воздуха [1].

В настоящее время разрабатываются новые технологии адсорбционного осушения и охлаждения воздуха на основе использования адсорбентов, в частности, водного раствора хлористого лития ($H_2O/LiCl$), которые могут быть реализованы в системах утилизации теплоты и влаги низкопотенциальных вентиляционных выбросов [2, 3, 4].

Для утилизации теплоты и влаги ВЭР (вторичных энергетических ресурсов) довольно часто применяют системы с промежуточным теплоносителем на базе контактных аппаратов, в которых осуществляются процессы осушки воздуха и регенерации раствора хлористого лития [4, 6, 8].

Основная проблема использования таких систем состоит в накоплении влаги в циркуляционном контуре раствора адсорбента в результате дисбаланса между интенсивностью поглощения влаги в осушителе и удаления влаги в регенераторе, что приводит к нарушению работы системы при утилизации.

Следует также отметить, что описание процессов тепло- и влагообмена при использовании растворов адсорбентов в основном носит эмпирический характер, а при обобщении результатов экспериментальных исследований не учитываются термодинамические особенности их реализации, в частности не рассматриваются условия на границе раздела контактирующих сред, ввиду чего получаемые значения обменных коэффициентов имеют большой разброс значений (до 40 %) [2, 9, 10].

Учитывая данное обстоятельство, возникла необходимость проведения исследований по изучению процессов тепло- и влагообмена между воздухом и

раствором LiCl на основе термодинамического подхода, основанного на теории потенциала влажности.

С термодинамической точки зрения потенциал влажности представляет собой полный термодинамический потенциал влаги, определяющий ее состояние во всех фазах системы «воздух – жидкость» при различных значениях температуры и влажности [5, 7].

При этом в качестве движущей силы процесса влагообмена используется разность потенциалов влажности. Она определяет возможность, направление переноса и предел переходного процесса влагообмена для взаимодействующих сред.

Для характеристики состояния влаги в системе «воздух – жидкость» используется единое термодинамическое уравнение относительно изменения свободной энергии в виде [7]:

$$dF = -SdT + \theta dm \quad (1)$$

где S – энтропия гетерогенной системы; θ – полный термодинамический потенциал состояния влаги в системе, потенциал влажности.

Общее выражение для потенциала влажности имеет вид:

$$\theta = -\frac{P}{\rho} + \mu + \sum \mu_i + \theta_e + \sum \theta_i, \quad (2)$$

где $\mu = RT \ln \phi$ – химический потенциал влаги; $\sum \mu_i$ – составляющие химического потенциала влаги за счет наличия в ней растворенных веществ; θ_e – потенциал влаги в результате действия гравитационного поля; $\sum \theta_i$ – потенциал влаги за счет действия других силовых полей.

На рис. 1 показана термодинамическая модель системы «воздух – жидкость». На границе раздела контактирующих сред находится переходная область, включающая в себя пограничные и поверхностные фазы со стороны воздуха и жидкости, в пределах которой характеристики сред изменяются от значений в одной до значений в другой объемных фазах (рис. 1) [5, 7, 9].

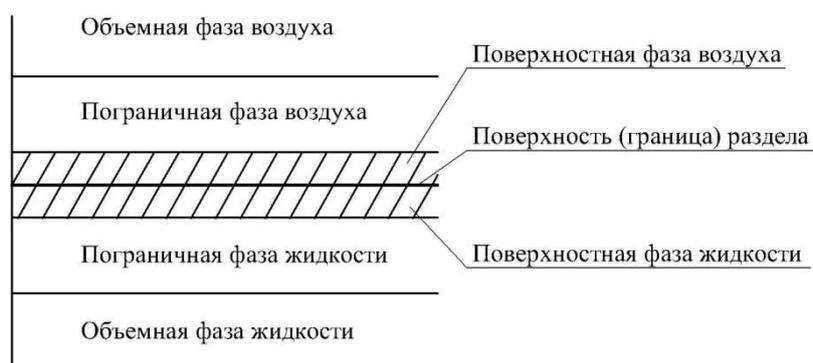


Рис. 1. Термодинамическая модель системы «воздух – жидкость»

На специальном экспериментальном стенде были проведены экспериментальные исследования процессов тепло- и влагообмена между воздухом и раствором хлористого лития с последующим получением

критериальных зависимостей для обменных коэффициентов, учитывающих особенности формирования поверхностной фазы на контакте сред.

При изучении особенностей реализации процессов тепло- и влагообмена в системе «воздух – LiCl» моделировались политропические состояния начальных параметров воздуха и жидкости, характерные для условий сорбции влаги из воздуха.

При проведении экспериментальных исследований системы «воздух – LiCl» основными факторами, влияющими на протекание процессов тепло- массообмена, рассматривались: скорость движения воздушного потока над поверхностью раствора LiCl, а также физические свойства обменивающихся сред с учетом поверхностных явлений на линии раздела фаз, что учитывалось симплексом $k=T_c/T_{нов}$.

Эксперименты проводились при скоростях воздуха от 0,79 до 2,14 м/с, при его температуре от 18 до 30 °С, концентрация раствора изменялась от 4 до 39 %, а температура его поверхности от 16 до 24 °С.

Для исследования процесса переноса влаги в поверхностных слоях и фазах в системе «воздух – LiCl» использовался единый потенциал состояния влаги – потенциал влажности Θ .

Для примера на рис. 2 показаны кривые распределения температуры и потенциала влажности в пограничных слоях воздуха и раствора LiCl на расстояниях 0,1; 0,2; 0,3 м от начала поверхности раздела при скорости воздушного потока 0,79 м/с и концентрации раствора LiCl $\varepsilon_p = 39\%$.

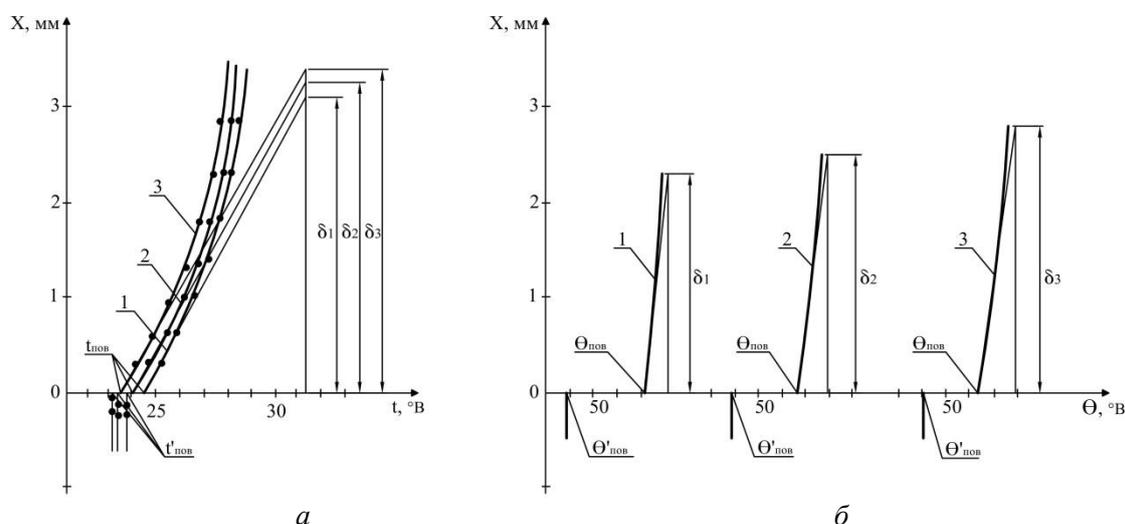


Рис. 2. Распределение температуры (а) и потенциала влажности (б) в пограничных слоях воздуха и раствора LiCl ($\varepsilon_p = 39\%$, $V = 79$ м/с) при различном расстоянии от передней кромки ванны 1: $l = 0,1$ м; 2: $l = 0,2$ м; 3: $l = 0,3$ м

Из построений видно, что с увеличением протяженности контакта растет толщина ламинарного пограничного слоя, вследствие чего уменьшается интенсивность процессов тепло- и влагообмена.

Значения коэффициентов теплообмена составили соответственно: 5,58; 5,0 и 4,53 Вт/м²К, а влагообмена – 16,2 10⁻³; 15 10⁻³ и 13,5 10⁻³ кг/м²°В.

Из полученных построений также видно, что скачок температуры на границе раздела сред незначителен ($0,5\text{--}0,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), а скачок потенциала влажности имеет большое значение – $25\text{--}32^{\circ}\text{B}$, причем при увеличении протяженности поверхности контакта эти разности параметров уменьшаются.

Нанесение точек замеров на поле I - d -диаграммы (рис. 3) показало, что в поверхностной фазе имеет место большое изменение значения концентрации раствора LiCl , в частности в приведенном опыте оно составило от 20 до 23 % при концентрации в объемной фазе 39 %.

При увеличении протяженности контакта наблюдается рост концентрации в поверхностной фазе, что объясняется уменьшением количества сорбируемой влаги из воздуха ввиду увеличения толщины ламинарного пограничного слоя и, как следствие, уменьшения коэффициентов влагообмена.

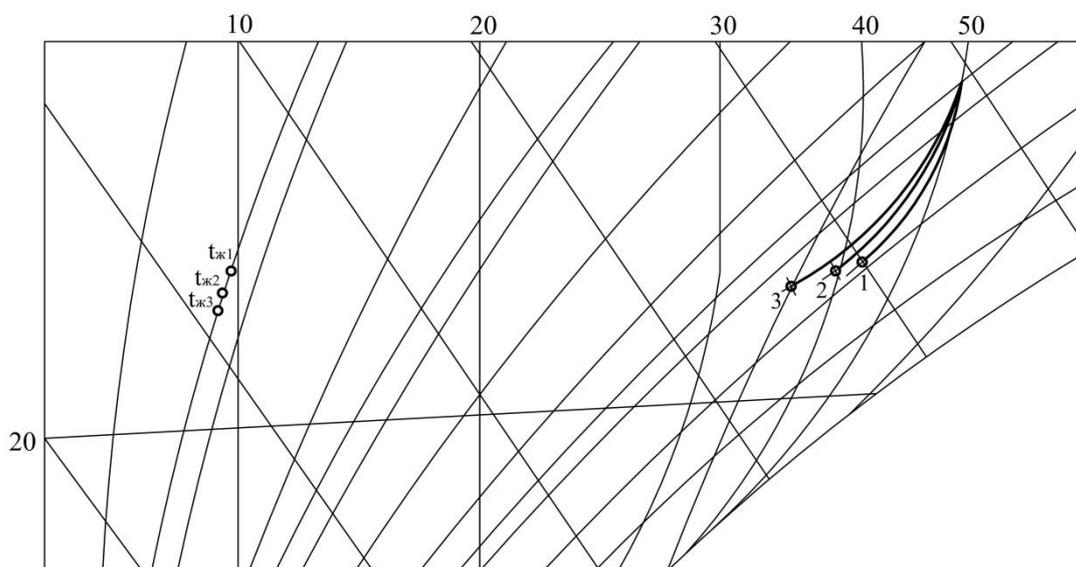


Рис. 3. Изображение на I - d -диаграмме распределения параметров в пограничном слое воздуха по данным рис. 1, где 1, 2, 3 – параметры состояния поверхностной фазы на расстояниях от передней кромки ванны 0,1 м; 0,2 м и 0,3 м

На рис. 3 точками 1, 2 и 3 обозначены параметры состояния поверхностной фазы.

Необходимо отметить, что в ранее выполненных экспериментальных работах [2, 3, 6, 8] при использовании в качестве рабочей жидкости хлористого лития, изменение концентрации в поверхностной фазе не учитывалось.

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что в условиях сорбции влаги из воздуха при концентрации раствора в его объемной фазе 10, 20, 30 и 39 % концентрация в поверхностной фазе со стороны раствора хлористого лития составила 6, 12, 16 и 19 % соответственно.

По результатам экспериментальных исследований были получены эмпирические зависимости в виде критериев Nu и Nu'_o , которые могут быть использованы для расчета процессов тепло- и влагообмена между воздухом и раствором хлористого лития:



– теплообмен:

$$Nu = c_1 \cdot Pr^{0,33} \cdot Re^{0,81} \cdot \varepsilon_p^{-0,1} \cdot k^{0,6} \quad (3)$$

при $k=1,013-1,026$ $c_1=0,012-0,02$;

– влагообмен:

при значении $\varepsilon_p = 0-30$ %

$$Nu'_\theta = c_2 \cdot (Pr'_\theta)^{-2} \cdot Re^{1,07} \cdot \varepsilon_p^{0,34} \cdot k^{-0,06} \quad (4)$$

при $k=1,02-1,025$ $c_2=0,00082-0,00078$;

при значении $\varepsilon_p = 30-42$ %

$$Nu'_\theta = c_3 \cdot (Pr'_\theta)^{-2} \cdot Re^{1,07} \cdot \varepsilon_p^{0,72} \cdot k^{-0,1} \quad (5)$$

где Nu , Nu'_θ – тепловой и диффузионный критерии Нуссельта, Re – критерий Рейнольдса, ε_p – концентрация раствора LiCl.

Зависимости (3) – (5) определены при значениях критерия Re от 2×10^3 до 20×10^3 и концентрациях раствора $\varepsilon_p = 0-42$ %.

В формулах 3–5 использован параметрический критерий $k=T_c/T_{нов}$, учитывающий соотношение температуры по «сухому» термометру в объемной фазе воздуха к температуре поверхности контакта.

Было экспериментально установлено возрастание интенсивности протекания процессов влагообмена при взаимодействии воздуха с раствором LiCl концентрации более 30 %, поэтому приводятся две зависимости для определения диффузионного критерия Нуссельта Nu'_θ , которые могут быть использованы для определения коэффициентов влагообмена.

Таким образом, установлено, что в поверхностной фазе со стороны раствора LiCl имеет место значительное изменение концентрации адсорбента. Этот факт требует учета при использовании водного LiCl в качестве промежуточного теплоносителя в системах осушки и утилизации ВЭР.

Зависимости, полученные для определения коэффициентов тепло- и влагообмена, могут быть использованы при определении потоков теплоты и влаги при использовании водных растворов хлористого лития.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Qi Ronghui. A review of liquid desiccant air dehumidification: From system to material manipulations. *Energy and Buildings* / Qi Ronghui, Dong Chuanshuai, Zhang Li-Zhi. – Volume 215, 15 May 2020, 109897. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109897>.
2. Longo, G. A. Experimental and theoretical analysis of heat and mass transfer in a packed column dehumidifier/regenerator with liquid desiccant. *International Journal of Heat and Mass Transfer* / G. A. Longo, A. Gasparella. – 2005. – Volume 48, Issues 25–26. – P. 5240-5254. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.07.011>.
3. Theo Elmer, Mark Worall, Shenyi Wu, Saffa Riffat. An experimental study of a novel integrated desiccant air conditioning system for building applications. *Energy and Buildings* / Theo Elmer, Mark Worall, Shenyi Wu, Saffa Riffat. – Volume 111. – 1 January 2016. – P. 434-445. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.065>.
4. Niemann, P. Air conditioning system with enthalpy recovery for space heating and air humidification : an experimental and numerical investigation. *Energy* / P. Niemann, G. Schmitz.



– Volume 213. – 15 December 2020, 118789. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118789>.

5. Gvozdkov, A. Some aspects of improving of air treatment in the contact units of HVAC systems / A. Gvozdkov, O. Suslova : proceedings 10-th International conference on environmental engineering, ICEE 2017.10. 2017. С. enviro.2017.258.

6. Богословский, В. Н. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / В. Н. Богословский, И. Я. Поз. – Москва : Стройиздат. – 1983. – 320 с. – (ЭТЭ. Экономия топлива и электроэнергии).

7. Гвоздков, А. Н. Применение потенциала влажности к расчету тепловлагообмена между воздухом и жидкостью / А. Н. Гвоздков, В. Н. Богословский // Водоснабжение и санитарная техника. – Москва : Стройиздат. – 1985. – № 10. – С. 8–9.

8. Карпис, Е. Е. Энергосбережение в системах кондиционирования воздуха / Е. Е. Карпис. – Москва : Стройиздат, 1986. – 267 с. – (ЭТЭ. Экономия топлива и электроэнергии).

9. Гвоздков, А. Н. Описание процессов тепло- и влагообмена в контактных аппаратах с использованием сорбентов / А. Н. Гвоздков, М. А. Гвоздиков // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды : материалы 3-й Международной научной конференции, 14-17 сентября, 2004 год, Волгоград / Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет. – Волгоград, 2004. – С. 123–127.

10. Джейкок, М. Химия поверхностей раздела фаз / М. Джейкок, Д. Паффей. – Москва : Мир. – 1984. – С. 10–50.

GVOZDKOV Aleksandr Nikolaevich, candidate of technical sciences, associate professor, senior researcher

ON THE ISSUE OF PROCESS IMPLEMENTATION OF HEAT AND MOISTURE EXCHANGE IN THE "AIR - LiCl" SYSTEM

Scientific Research Institute of Building Physics RAASN

21, Locomotivniy proezd, Moscow, 127238, Russia. Tel.: +7 (495) 482 40 76;

e-mail: angvo@mail.ru

Key words: Lithium chloride, concentration, heat and moisture exchange, moisture exchange coefficient.

The article discusses the features of the implementation of the processes of heat and moisture exchange between air and a solution of lithium chloride (LiCl), taking into account the influence of the surface phase formed at the interface of media. The results of studies of changes in the concentration of the solution in the surface phase under conditions of moisture sorption from the air and calculated dependences for determining the coefficients of heat and moisture exchange are presented.

REFERENCES

1. Qi Ronghui, Dong Chuanshuai, Zhang Li-Zhi. A review of liquid desiccant air dehumidification: From system to material manipulations. Energy and Buildings. Vol. 215, 15 May 2020, 109897. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109897>.

2. Longo G. A., Gasparella A. Experimental and theoretical analysis of heat and mass transfer in a packed column dehumidifier/regenerator with liquid desiccant. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 48, Issues 25–26, 2005, P. 5240–5254. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.07.011>.



3. Elmer Theo, Worall Mark, Wu Shenyi, Riffat Saffa. An experimental study of a novel integrated desiccant air conditioning system for building applications. *Energy and Buildings*. Vol. 111, 1 January 2016, P. 434-445. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.065>.
4. Niemann P., Schmitz G. Air conditioning system with enthalpy recovery for space heating and air humidification: An experimental and numerical investigation. *Energy*. Vol. 213, 15 December 2020, 118789. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118789>.
5. Gvozdkov A., Suslova O. Some aspects of improving of air treatment in the contact units of HVAC systems. *Proceedings of the 10-th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2017.10*. 2017. С. enviro.2017.258.
6. Bogoslovskiy V. N., Poz I. Ya. *Термофизика аппаратов утилизацiи тепла system otopeniya, ventilyatsii i konditsionirovaniya vozdukhа* [Thermophysics of machines of heat recovery systems, heating, ventilation and air conditioning]. Moscow : Sroyizdat. – 1983. 320 p. – (ETE. Ekonomiya topliva i elektroenergii).
7. Bogoslovsky V. N., Gvozdkov A. N. *Primenenie potentsialа vlazhnosti k raschyotu teplovлагообмена mezhdu vozdukhom i zhidkostyu* [Application of moisture potential to the calculation of heat and moisture exchange between air and liquid]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika* [Water Supply and Sanitary Equipment]. – Moscow : Sroyizdat. 1985. № 10. P. 8–9.
8. Karpis E. E. *Energosberezhenie v sistemakh konditsionirovaniya vozdukhа* [Energy saving in air conditioning systems]. – Moscow : Sroyizdat, 1986. – 267 p. – (ETE. Ekonomiya topliva i elektroenergii).
9. Gvozdkov A. N., Gvozdkov M. A. *Opisanie protsessov teplo- i vlagoобмена v kontaktnykh apparatakh s ispolzovaniem sorbentov* [Description of heat and moisture exchange processes in contact devices using sorbents]. *Kachestvo vnutrennego vozdukhа i okruzhayushchey sredy* [Indoor air and environmental quality] : materialy 3-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, 14-17 sentyabryа, 2004 god, Volgograd / Volgograd. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. – Volgograd. – 2004. – P.123-127.
10. Jaycock M. J., Parfitt G. D. *Himiya poverkhnostey razdela faz* [Chemistry of phase separation surfaces]. – Moscow : Mir. – 1984. – P. 10–50.

© А. Н. Гвоздков, 2024

Полечено: 10.04.2024 г.