

Calculation Features of the Combined Schemes of Cooling of Refrigeration Units Condensers

Fot A. N.

Omsk State Technical University
Omsk, Russian Federation

Abstract. Modern requirements for energy saving and decrease in environmental pollution demand revising classical technical and technology solutions of refrigeration unit production. Composite cooling application of refrigeration units allows condensers to reduce pollution of fresh waters, to reduce consumption of electric energy, to reduce condensation pressure, to use natural cold of the environment. In this work approach to thermal and mass balance determination of the refrigeration units with the combined cooling of condensers with intermediate discharge of liquid coolant between condensers of water and air cooling is offered. Definition of an enthalpy before a throttling expansion (mix of the saturated and overcooled liquid after condensation knot) taking into account dryness degree is specified. For influence assessment of this feature the numerical analysis on the example of the refrigeration units of the freon refrigeration units is carried out. Made change of refrigerating coefficient for the refrigerator with the combined cooling of rather classical scheme of condensation to 2.5%. Change of loadings on knot of condensation made 2.2%, on the evaporator of 2.5%. For calculation and the choice of the capital equipment of the refrigeration unit these changes will not exert decisive impact, and for regulation of refrigeration unit operating modes will have significant effect, especially at the large enterprises of oil processing branch and large transport objects. The received specification of refrigeration unit calculation is used in program modules of refrigeration unit calculation with the combined cooling of condensers and allowed to carry out the qualitative parametrical analysis of its work.

Keywords: combined cooling, condensing unit, water and air cooling, energy savings, mathematical model, chiller.

DOI: 10.5281/zenodo.1217251

Particularitățile calculului circuitelor de răcire combinate pentru a condensatoarele mașinilor frigorifice

Fot A. N.

Universitatea Tehnică de Stat din Omsk
Omsk, Federația Rusă

Rezumat. Cerințele moderne pentru economisirea energiei și reducerea poluării mediului necesită revizuirea soluțiilor tehnice și tehnologice clasice în domeniul producției de mașini frigorifice. Mașinile de răcire cu condensatoare răcite cu apă sunt implicate în poluarea cu apă potabilă, iar la utilizarea condensatoarelor răcite cu aer, compresoarele consumă mai multă energie electrică. Aplicarea răcirii combinate a condensatoarelor mașinilor frigorifice permite reducerea poluării apei potabile, reducerea consumului de energie electrică, reducerea presiunii de condensare (regimul de funcționare cu eficiență ridicată a compresoarelor), utilizarea frigului natural al mediului. Cu toate acestea, nu a fost posibilă implementarea completă a acestei răcirii, deoarece există incertitudini în metodele clasice de calcul al componentelor mașinilor frigorifice. În această lucrare propunem o abordare a determinării echilibrului de căldură și masă al unei mașini frigorifice cu o răcire combinată a condensatoarelor cu o scurgere intermediară de agent frigorific lichid între condensatoarele de apă și răcirea cu aer. Definiția entalpiei înainte de densitate (un amestec de lichid saturat și răcit sub răcire după unitate de condensare) este clarificată luând în considerare gradul de uscăciune. Schimbarea coeficientului de răcire pentru o mașină frigorifică cu răcire combinată față de schema clasică de condensare a fost de 2,5%. Schimbarea sarcinii (comparativ cu mașina clasică de refrigerare) cu unitatea de condensare a fost de 2,2%, la vaporizator 2,5%. Obținerea precizării calculului mașinii frigorifice a fost utilizată în modulele software pentru calculul mașinii frigorifice cu răcirea combinată a condensatoarelor a făcut posibilă efectuarea unei analize parametrice calitative a funcționării acestora.

Cuvinte-cheie: răcire combinată, unitate de condensare, răcire cu apă și aer, ecologie, economie de energie, mașină frigorifică.

Особенности расчета комбинированных схем охлаждения конденсаторов холодильных машин Фот А.Н.

Омский государственный технический университет
г. Омск, Российская Федерация

Аннотация. Современные требования по энергосбережению и снижению загрязнения окружающей среды требуют пересматривать классические технические и технологические решения в области производства холодильных машин. Холодильные машины с конденсаторами водяного охлаждения участвуют в загрязнении пресных вод, а при использовании конденсаторов воздушного охлаждения компрессоры затрачивают большее количество электрической энергии. Применение комбинированного охлаждения конденсаторов холодильных машин позволяет уменьшить загрязнение пресных вод, снизить потребление электрической энергии, снизить давление конденсации (режим работы с высоким КПД компрессоров), использовать естественный холод окружающей среды. Однако в полном объеме внедрить такое охлаждение не удавалось, поскольку есть неопределенности в классических методиках расчета компонентов холодильных машин. В данной работе предложен подход к определению теплового и массового баланса холодильной машины с комбинированным охлаждением конденсаторов с промежуточным сливом жидкого хладагента между конденсаторами водяного и воздушного охлаждения. Уточнено определение энтальпии перед дросселированием (смесь насыщенной и переохлажденной жидкости после узла конденсации) с учетом степени сухости. Для оценки влияния этой особенности проведен численный анализ на примере холодильной машины фреоновой холодильной машины. Изменение холодильного коэффициента для холодильной машины с комбинированным охлаждением относительно классической схемы конденсации составила до 2,5%. Изменение нагрузок (по сравнению с классической холодильной машиной) на узел конденсации составил 2,2 %, на испаритель 2,5%. Для расчета и выбора основного оборудования холодильной машины эти изменения не окажут решающего влияния, а для регулирования режимов работы холодильной машины окажет существенное влияние, особенно на крупных предприятиях нефтеперерабатывающей отрасли и крупных транспортных объектах. Полученное уточнение расчета холодильной машины использовано в программных модулях расчета холодильной машины с комбинированным охлаждением конденсаторов и позволило провести качественный параметрический анализ ее работы.

Ключевые слова: комбинированное охлаждение, узел конденсации, водяное и воздушное охлаждение, экология, экономия энергоресурсов, холодильная машина.

Введение

Современные тенденции повышения стоимости энергоресурсов требуют пересматривать классические подходы в холодильной технике. К наиболее интересным можно отнести предложение рассматривать совместно экономические и экологические параметры (выбросы CO₂) предлагаемой технологии с поиском оптимальной работы установки в течении года [1]. В работах [2], [3] предлагается рассматривать экономическую выгоду как следствие повышения энергетической эффективности, в том числе за счет комбинированного охлаждения энергоблоков. Так же много работ посвящены снижению загрязнения пресных вод. В работах [4]–[7] отмечается критический уровень состояния водных ресурсов в мире и значительное негативное влияние нефтегазового комплекса. Так же предлагается усилить вопрос вовлечения пресных вод в производство при проектировании новых и реконструкции действующих предприятий. Учитывая высокую энергоемкость холодильных машин и значительное

потребление воды для охлаждения конденсаторов внедрение комбинированного охлаждения конденсаторов является своевременным решением экономических и экологических задач.

Степень охлаждения в конденсаторах холодильной машины определяет давление конденсации и, как следствие нагрузку, потребляемую компрессором. Способы охлаждения конденсаторов водой и воздухом имеют различные термодинамические, эксплуатационные характеристики. Некоторые из них изменяются в течении года эксплуатации. Решения по охлаждению конденсаторов водой или воздухом будут оптимальными в ограниченном диапазоне температур охлаждающих сред. Поэтому целесообразно рассмотреть комбинированное охлаждение конденсаторов, однако это связано с трудностями их расчета и регулирования. В данной работе предлагается рассмотреть особенности комбинированной схемы охлаждения конденсаторов и ее расчета. Причем вопрос комбинированного охлаждения является актуальным не только для стационарных

наземных объектов, но и для холодильных машин объектов морского базирования [8].

Ключевые слова: комбинированное охлаждение, узел конденсации, водяное и воздушное охлаждение, экология, экономия энергоресурсов, математическая модель, холодильная машина.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе [9] предлагается комбинировать такие источники холода, как окружающий воздух, пресная подготовленная вода, холодильная машина. Предложены пути оптимизации таких схем для охлаждения нефтепродуктов. Работы [10], [11] посвящены холодильным машинам с конденсаторами воздушного охлаждения, что исключает необходимость в пресной воде, предложена схема регулирования холодильной машины с использованием возможности естественной циркуляции хладагента, вопросу эффективного регулирования производительности компрессоров. Так же

вопросам комбинированного охлаждения посвящен ряд работ [12]–[17], где отмечены особенности воздушного, водяного, комбинированного охлаждения и их влияние на энергетическую и экономическую эффективность охлаждаемых установок.

К рассмотрению принята запатентованная схема последовательного включения конденсаторов (рис. 1) [18]–[20]. Такая компоновка холодильной машины позволяет добиваться низкой температуры конденсации, как у ХМ с водяными конденсаторами, так же сокращается потребление пресной воды и возможно использовать естественный холод как в ХМ с конденсаторами воздушного охлаждения. Добиваясь оптимального регулирования работы компрессоров и расходов охлаждающих сред снижаются расходы электроэнергии и воды, повышается экологичность установки.

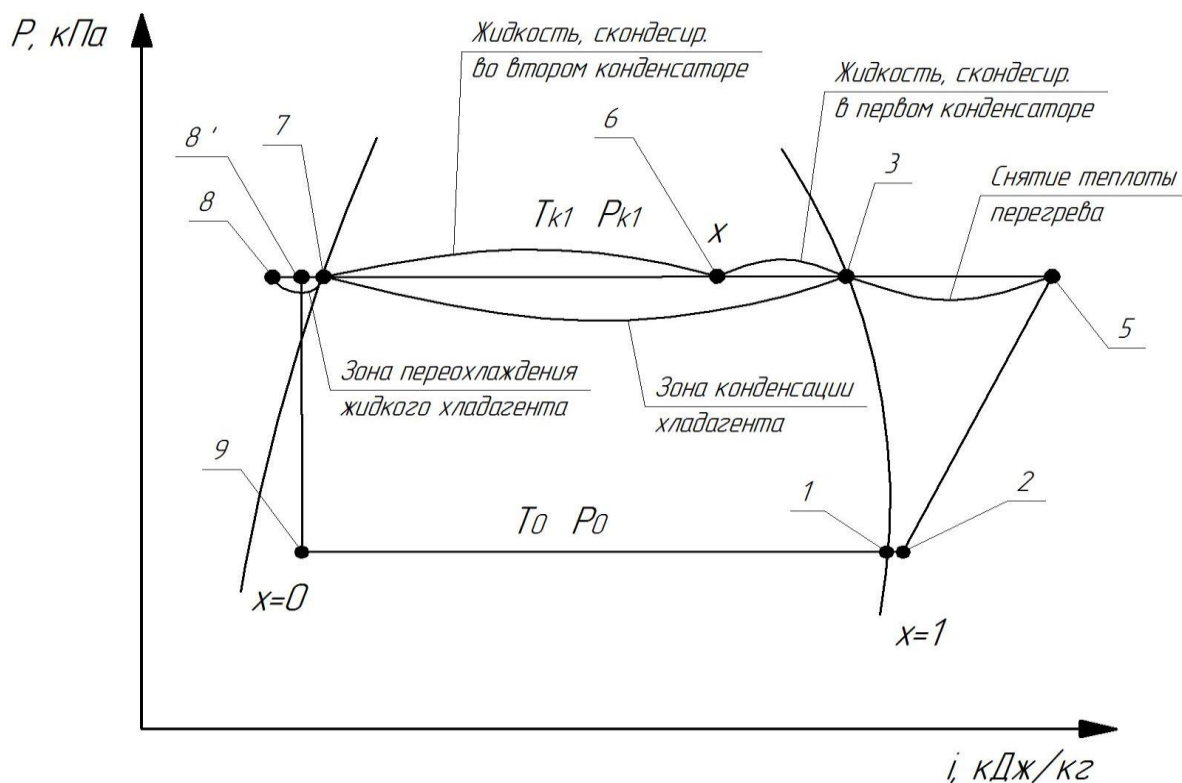


Рис. 1. Холодильный цикл с узлом конденсации комбинированного охлаждения.

Как видно из схемы конденсация паров может начинаться в конденсаторе воздушного или водяного охлаждения, и окончательно конденсироваться в следующем

конденсаторе. В виду использования отделителя жидкости жидкая часть хладагента сливается из первого конденсатора в состоянии насыщенной

жидкости (точка х рис.1). Насыщенный пар продолжает конденсироваться во втором конденсаторе и может достичь переохлажденного состояния на выходе из него. Эта особенность схемы с комбинированным охлаждением отличает от классических схем холодильных машин и требует уточнения методики расчета холодильного цикла в части массового и энергетического баланса.

При комбинированном охлаждении конденсаторов степень сухости холодильного агента на выходе из первого конденсатора может принимать значения от 0 до 1, поэтому количество сконденсированного хладагента может сильно изменяться. Для корректного расчета конденсаторов необходимо составить уравнения распределения массового расхода и тепловых нагрузок. В работе [21] показан подход математической реализации такой схемы холодильной машины.

II. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

В случае комбинированного охлаждения холодильный цикл принимает вид, как показано на рис.1, из чего следует, что классические формулы расчета нагрузки на узел конденсации не учитывают слив сконденсированного хладагента и не могут применяться для описания работы узла конденсации комбинированного охлаждения в целом.

Для составления уравнений распределения баланса узла конденсации комбинированного охлаждения необходимо учитывать выражение 1 для массы хладагента, слитого в отделитель жидкости.

$$G_x = G_a \cdot (1 - x), \quad (1)$$

где G_x – масса хладагента, слитого в отделитель жидкости, x – степень сухости хладагента.

Таким образом уравнения тепловых балансов узла конденсации комбинированного охлаждения примут вид выражений 2, 5, 6.

$$Q_k = G_a \cdot (i_5 - i_8'), \quad (2)$$

$$G_1 = G_a, \quad (3)$$

$$G_2 = G_a - G_x = G_a \cdot x, \quad (4)$$

$$Q_1 = G_1 \cdot (i_5 - i_6), \quad (5)$$

$$Q_2 = G_2 \cdot (i_3 - i_8), \quad (6)$$

где Q_1, Q_2 – теплота конденсации в первом и втором конденсаторах, G_1, G_2 – массовые расходы хладагента в первом и втором конденсаторах, i_{1-9} – энтальпия хладагента в характерных точках в соответствии с рис. 1.

Для определения энтальпии смеси жидкого хладагента после первого и второго конденсатора необходимо решить систему уравнений 3, 4, 5, 6. В результате получим выражение 7.

$$i_8' = i_7 - x \cdot (i_7 - i_8), \quad (7)$$

В целях численного анализа полученных зависимостей проведен расчет для холодильной машины с комбинированным охлаждением узла конденсации по предложенной схеме (рисунок 1) со следующими исходными параметрами:

- $t_0 = -8 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура кипения хладагента;
- $t_k = 24 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура конденсации хладагента;
- $t_{os1} = 13 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура охлаждающего воздуха;
- $t_{os2} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура охлаждающей воды;
- $G_a = 1 \text{ кг/с}$ – расчетный массовый расход хладагента;
- R134a – тип хладагента.

Расчет проведен в среде Mathcad с подключением к серверу вычислений кафедры НИУ МЭИ (tw.t.mpei.ac.ru) для автоматизированного определения термодинамических свойств хладагента в узловых точках цикла (рис.1).

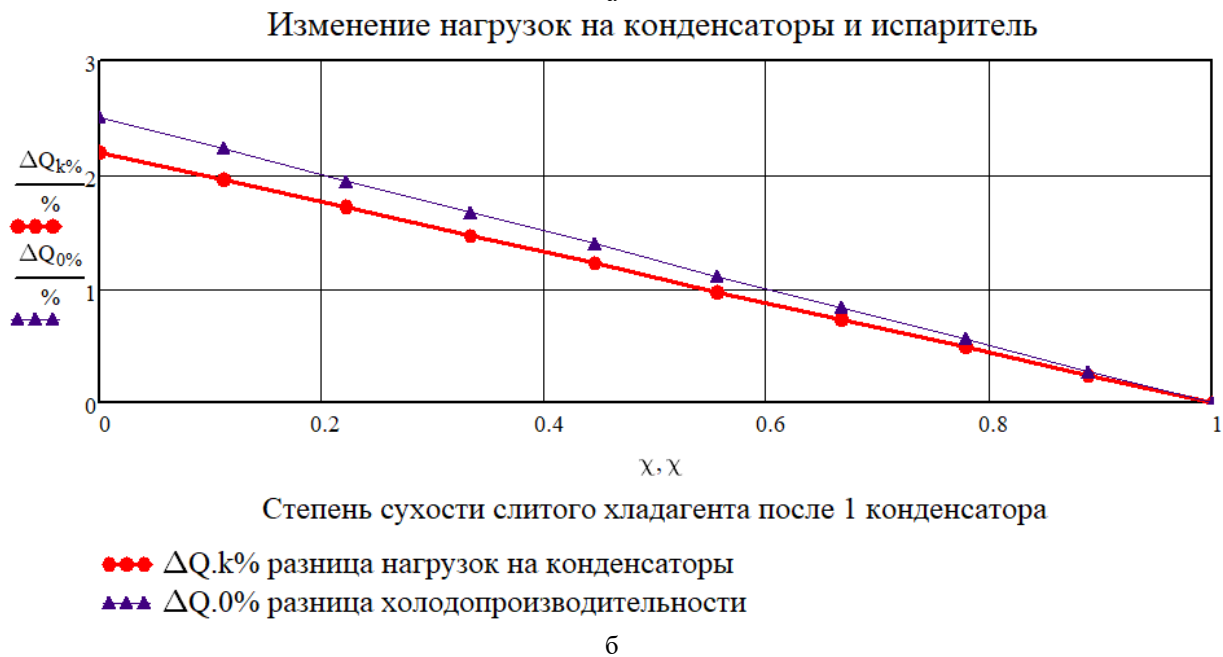
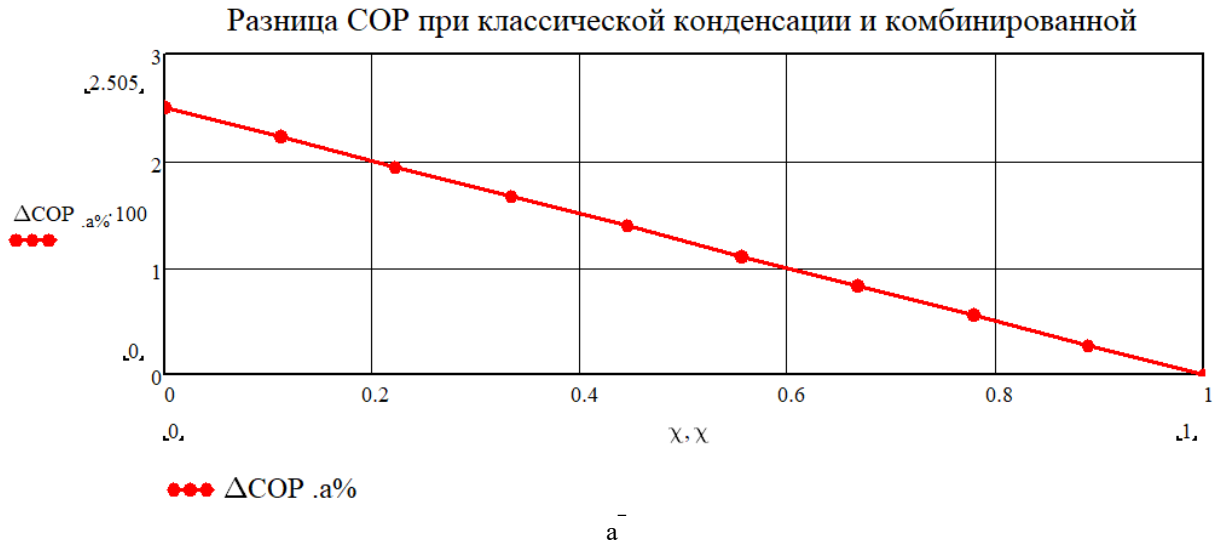


Рис. 2. Оценка влияния изменения x на работу холодильной машины.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет проведен для диапазона изменения степени сухости хладагента при переходе из первого конденсатора в последующий с интервалом 0,2. Оценка влияния уточненного расчета энтальпии переохлажденного хладагента (формула 7) видна на рис. 2а. При оценке энергетического выигрыша узла конденсации за счет уменьшения массы конденсируемого хладагента во втором конденсаторе по ходу хладагента приводит к таким же потерям холодопроизводительности за счет смешения насыщенной жидкости из состояния точек x и 8 (рис.1, точка 8') несмотря на то, что в процентном отношении нагрузки изменяются неравномерно.

Изменение нагрузок находится в пределах 2,5% что не может оказывать существенного влияния на выбор поверхностей теплообменных аппаратов холодильной машины, так как обычно закладывается 10% запас поверхности. Теоретический коэффициент преобразования (COP.a) холодильной машины при комбинированном охлаждении узла конденсации снижается при стремлении степени сухости к 0 (рис.2б) по сравнению с классическим охлаждением конденсаторов. Величина изменений находится так же в пределах 2,5%, что может оказаться не существенным для проектирования холодильной машины с комбинированным охлаждением конденсаторов, однако показывает

необходимость включения этой поправки в математическую модель расчета холодильной машины.

Проведенное исследование показало значимость уточненной методики расчета для холодильной машины с конденсаторами комбинированного охлаждения.

Предложенные уравнения 2 - 7 включены в математическую модель расчета расчета холодильной машины с узлом конденсации комбинированного охлаждения с промежуточным сливом жидкого рабочего тела после первого конденсатора по ходу хладагента. Это позволило повысить точность проводимых аналитических расчетов.

Параметрический анализ холодильной машины с конденсаторами комбинированного охлаждения проведен для регионов с различными температурами наружного воздуха и температурными периодами. Основные характеристики теплообменного оборудования приняты по данным предприятий «Пензенский завод энергетического машиностроения», «Теплохим» и по данным информационных ресурсов «Технопарк». Климатологические данные приняты из открытых

информационных источников на основе усредненных статистических данных (Госфонды ВНИИГМИ-МЦД) [22].

Результаты параметрического анализа (рис. 3) содержат рекомендованные значения расчетных температур конденсации для схемы холодильной машины с комбинированным охлаждением конденсаторов в сравнении с рекомендованными значениями для классических водяных и воздушных схем охлаждения конденсаторов.

Экономический критерий параметрического анализа холодильной машины с комбинированным охлаждением конденсаторов рассмотрен в статье [23].

Критерий, определяющий функцию поиска, заключается в минимальных экономических затратах холодильной машины для каждой текущей температуры охлаждающей среды и года эксплуатации холодильной машины в целом. Таким образом полученные результаты экономически обоснованы, включают в себя как эксплуатационные, так и капитальные затраты холодильной машины.

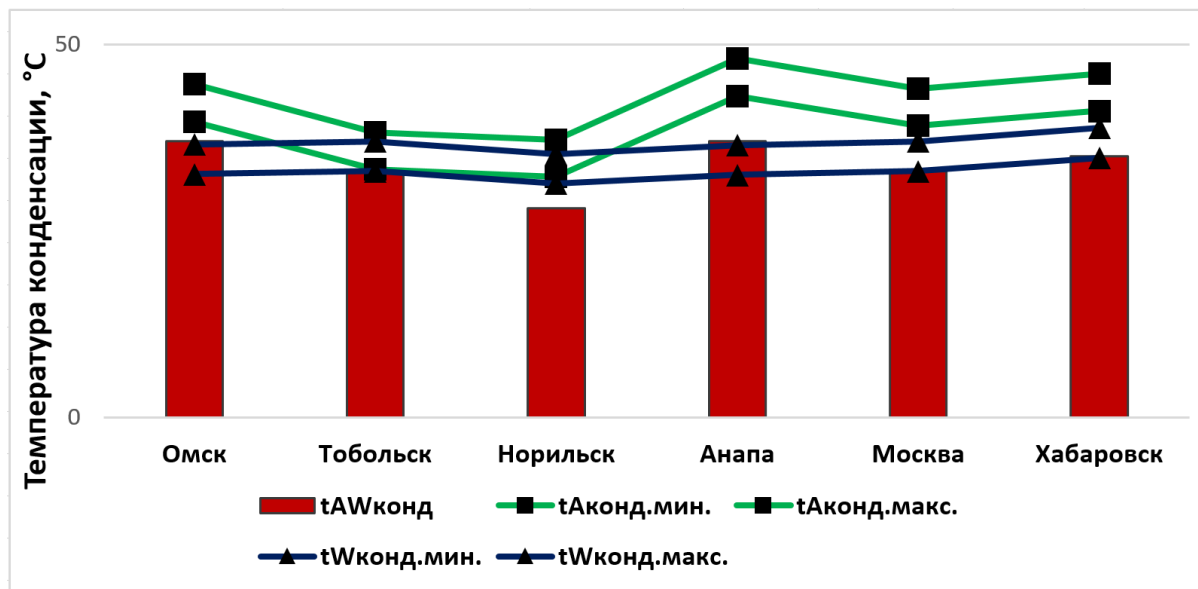


Рис. 3. Рекомендуемая расчетная температура конденсации. $t_{AW\text{конд}}$ – рекомендованные расчетные значения температуры конденсации для комбинированного охлаждения; $t_{A\text{конд.мин.}}$, $t_{A\text{конд.макс.}}$, $t_{W\text{конд.мин.}}$, $t_{W\text{конд.макс.}}$ – соответственно минимальные и максимальные значения температур конденсации для воздушного и водяного конденсатора по известным методикам расчета [22].

На рисунке 3 хорошо видно, что расчетная температура конденсации совпадает с рекомендованным диапазоном температур

для конденсаторов водяного охлаждения или даже ниже (для г. Норильск). Т.е. холодильная машина с узлом конденсации

комбинированного охлаждения обеспечивает более низкие температуры конденсации, чем при воздушном охлаждении конденсаторов, при этом тепловая нагрузка на конденсатор водяного охлаждения снижена [23].

Перераспределение нагрузок между конденсаторами воздушного и водяного охлаждения (оптимальное соотношение) определяется экономическим критерием работы холодильной машины и зависит от меняющихся характеристик охлаждающих сред. Так же меняется последовательность прохождения хладагента в конденсаторах для достижения более низкого давления конденсации [23].

IV. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Новый научный результат заключается в уточнении методики расчета холодильной машины с узлом конденсации комбинированного охлаждения с учетом промежуточного слива хладагента между конденсаторами водяного и воздушного охлаждения.

Рассмотрев особенность массового и теплового баланса холодильной машины с конденсаторами комбинированного охлаждения определена точка состояния хладагента перед дросселированием.

Разработаны уравнения для составления массового и теплового баланса. По составленным уравнениям проведен расчет. Результаты расчета подтвердили актуальность и необходимость уточнения методики расчета холодильной машины. Предложенные уравнения реализованы в математической модели такой холодильной машины.

Узел конденсации комбинированного охлаждения холодильной машины несомненно является более сложным в техническом исполнении и построении логики ее управления. Однако современные требования к повышению энергоэффективности вынуждают прибегать к более гибким комбинированным техническим решениям. Так же современный уровень программно-технического комплекса позволяет адекватно управлять такими сложными объектами и достигать лучших технико-экономических показателей.

Литература (References)

[1] Carvalho M., Lozano M. A., L. M. Serra L. M. Multicriteria synthesis of trigeneration

systems considering economic and environmental aspects, *Appl. Energy*, 2012, vol. 91, no. 1, pp. 245–254.

- [2] Fumo N., Mago P. J., Chamra L. M. Energy and economic evaluation of cooling, heating, and power systems based on primary energy. *Appl. Therm. Eng.*, 2009, vol. 29, no. 13, pp. 2665–2671.
- [3] Fumo N., Mago P. J., Chamra L. M. Emission operational strategy for combined cooling, heating, and power systems. *Appl. Energy*, 2009, vol. 86, no. 11, pp. 2344–2350.
- [4] Meshcheryakov S. V., Smirnova T. S. Problemy zagryazneniya prirodnyh vod predpriyatiyami neftegazovogo kompleksa i puti ih resheniya [Problems of pollution of natural waters by enterprises of the oil and gas complex and ways to solve them]. *EHkologiya i promyshlennost' Rossii*, 2008, no. 8, pp. 33–37. (In Russian).
- [5] CHernyh G. S., Starostin A. S., Analiz sovremennogo sostoyaniya i tendencij presnovodnyh resursov Rossii i mery po preduprezhdeniyu chrezvychajnyh situacij, svyazannyh s ih zagryazneniem i deficitom [Analysis of the current state and trends of freshwater resources in Russia and measures to prevent emergencies related to their pollution and shortages]. *Strategiya grazhdanskoj zashchity problemy i issledovaniya*, 2014, vol. 4, no. 1, pp. 75–84. (In Russian).
- [6] Ivannikova T. V., Social'nye i ehkologicheskie aspekty problemy vodnyh resursov [Social and ecological aspects of the water resources problem]. *Vestnik Donskogo Gosudarstvennogo Agrarnogo Universiteta*, 2015, vol. 15, no. 1–3, pp. 82–88. (In Russian).
- [7] Gribova E. V., EHkologicheski ustojchivoje upravlenie vodnymi resursami [Ecologically sustainable management of water resources] *Nacional'nye interesy priority i bezopasnost'*, 2015, vol. 287, no. 2, pp. 22–35.
- [8] Yusha V. L., N. A. Raikovski N. A., Fot A. N., The influence analysis of cooling medium and condensation node construction for refrigeration units specifications for the oil and gas offshore supply bases, *AIP Conf. Proc.*, 2017, vol. 1876.
- [9] Bulatova D. A., *Optimizaciya kombinirovannyh sistem ohlazhdeniya gazopererabatyvayushchih i neftepererabatyvayushchih proizvodstv*: Diss. kand. tekhn. Nauk [Optimization of combined cooling systems for gas processing and oil

- refineries: Cand. tech. sci. diss.]: 05.14.04 . Moscow., 2004. 224 p.
- [10] Petrov E. T. Perspektivnyye skhemy hladosnabzheniya s kondensatorami vozdušnogo ohlazhdeniya: Obzornaya informaciya [Perspective cold-supply schemes with air-cooled condensers: Overview]. Moscow.: AgroNIITEHIMMP, 1987. (In Russian).
- [11] Petrov E. T., Kruglov A. A. Analiz metodov snizheniya ehnergopotrebleniya sistem holodosnabzheniya predpriyatij v processe kruglogodichnoj ehkspluatatsii [Analysis of methods to reduce energy consumption of the cooling systems of enterprises in the course of year-round operation]. *Vestnik MAH*, 2015, no. 1, pp. 34–38. (In Russian).
- [12] Bustamante J. G., Rattner A. S., Garimella S. Achieving near-water-cooled power plant performance with air-cooled condensers. *Appl. Therm. Eng.*, 2016, no. 105, pp. 362–371.
- [13] O'Donovan A., Grimes R. A theoretical and experimental investigation into the thermodynamic performance of a 50 MW power plant with a novel modular air-cooled condenser. *Appl. Therm. Eng.*, 2014, no. 1, pp. 119–129.
- [14] O'Donovan A., Grimes R., Moore J. The influence of the steam-side characteristics of a modular air-cooled condenser on CSP plant performance. *Energy Procedia*, 2013, no. 49, pp. 1450–1459.
- [15] Dyreson A., Miller F. Night sky cooling for concentrating solar power plants. *Appl. Energy*, 2016, vol. 180. doi: doi:10.1016/j.apenergy.2016.07.118.
- [16] Wu D. W., Wang R. Z. Combined cooling, heating and power: A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2006, vol. 32, no. 5–6. pp. 459–495.
- [17] Bischi A., Taccari L., Martelli E., Amaldi E., Manzolini G., Silva P., Campanari S., Macchi E. A detailed MILP optimization model for combined cooling, heat and power system operation planning. *Energy*, 2014, vol. 74, pp. 12–26.
- [18] Maksimenko V. A., Fot A. N., Romanenko R. V., Evdokimov V. S. *Holodil'naya ustanovka* [Refrigeration unit]. Patent RF, no. 101158. *MPK F 25 B 1/00*. 2011.
- [19] Fot A. N. Economically reasonable calculation technique of cold producing machine with combined cooling condenser unit. *Mater. XII Int. Res. Pract. Conf. «Sci. Technol. High. Educ.*, 2017, vol. 123, no. April 4-5, pp. 41–49.
- [20] Maksimenko V. A. Fot A. N. The Calculation Features of Consecutively Switched on Condensers at their Composite Cooling. *Procedia Eng.*, 2016, vol. 152.
- [21] Fot A. N., Maksimenko V. A. Revisiting the research of floating condensation pressure for combined cooling circuits of refrigerating condensers. *AIP Conf. Proc.*, 2017, vol. 1876.
- [22] Fot A. N., “Raschetno-parametricheskij analiz vliyaniya regional'nyh faktorov na temperaturu kondensatsii dlya kombinirovannyh skhem ohlazhdeniya kondensatorov holodil'nyh mashin” [Calculation and parametric analysis of the regional factors influence on the condensation temperature for the combined cooling schemes of the refrigeration machines condensers]. *EHnergoberezhenie i vodopodgotovka*, unpublished.
- [23] Yusha V. L., Maksimenko V. A., Fot A. N. Osobennosti rascheta posledovatel'no vkluchennyh kondensatorov vodyanogo i vozdušnogo ohlazhdeniya s plavayushchim davleniem kondensatsii [Calculation features of sequentially switched on water and air cooling condensers with floating condensation pressure]. *Vestnik MAH*, 2017, no. 3, pp. 28–34. (In Russian).

Сведения об авторах.



Фот Андрей Николаевич. Старший преподаватель кафедры «Холодильная и компрессорная техника и технология» ОмГТУ. Область научных интересов: комбинированное охлаждение конденсаторов холодильных машин, снижение энергетических затрат на производство холода, снижение потребления пресной воды.
E-mail: hein@List.ru.