

УДК 621.565

Хмельнюк М.Г., д-р техн. наук, проф.,
Остапенко А.В.,
Яковлева О.Ю., канд. техн. наук

Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса, Украина,
e-mail: studbk@mail.ru, hmel_m@ukr.net,
olgasarja@gmail.com

АНАЛИЗ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ КОМПЛЕКСА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Khmelniuk M.G., Dr. Sci. (Tech.), Prof.,
Ostapenko A.V.,
Yakovleva O.Y., Cand. Sci. (Tech.)

Odessa national academy of food technology,
Odessa, Ukraine, e-mail: studbk@mail.ru,
hmel_m@ukr.net, olgasarja@gmail.com

ANALYSIS OF THE EXERGY LOSSES OF LOW-TEMPERATURE CONDENSATION COMPLEX REFRIGERATION UNIT

Цель. Определить эксергетические потери в теплообменных аппаратах холодильной установки комплекса низкотемпературной конденсации природного газа, а также оптимальную концентрацию смеси рабочего тела (R290/R170). Оценить холодопроизводительность холодильной установки с разделением потока хладагента на фракции при использовании различной концентрации рабочего тела.

Методика. В процессе определения потерь применен эксергетический метод термодинамического анализа. Данный метод термодинамического анализа является наиболее подходящим для определения потерь в элементах установки с двумя и более температурными уровнями.

Результаты. Был проведен анализ эксергетических потерь в аппаратах и элементах холодильной установки. Определена холодопроизводительность холодильной установки с разделением хладагента на фракции при работе на различных концентрациях смеси «пропан/этан». На основании результатов эксергетического анализа определены эксергетические потери в теплообменных аппаратах, величина эксергетического КПД, а также концентрация смеси «пропан/этан» при наименьших эксергетических потерях установки.

Научная новизна. Определена концентрация смеси «пропан/этан» для наиболее эффективной работы установки с разделением потока хладагента на фракции. С учетом особенностей работы турбокомпрессора и теплообменных аппаратов, данные эксергетического анализа позволяют судить о наиболее эффективном режиме работы холодильной установки.

Практическая значимость. Рассмотрена возможность применения результатов эксергетического анализа холодильной установки с разделением хладагента на фракции с целью повышения эффективности отдельных узлов и компонентов системы. Величина эксергетических потерь позволяет судить о целесообразности применения той или иной концентрации рабочего тела для данной холодильной установки.

Ключевые слова: эксергетический анализ, низкотемпературная конденсация природного газа, потери эксергии, R290/R170, переохладитель хладагента.

Постановка проблемы. В соответствии с Энергетической стратегией Украины на период до 2030 года приоритетными направлениями развития энергетического сектора экономики страны являются создание высокоэффек-

тивных энергетических систем и комплексов и решение задач рационального использования энергетических ресурсов в энергоёмких отраслях. Согласно стратегии развития и модернизации энергетики системы обеспечения энергетическими ресурсами предприятий по переработке газа и газового конденсата будут развиваться в направлении газосбережения и создания совершенных энергетических комплексов на основе автономных источников электроснабжения и теплоснабжения. Одновременно требует решения проблема совершенствования энергетического комплекса действующих газоперерабатывающих предприятий (ГПП), представляющего собой многоуровневую техническую систему взаимосвязанных по потокам энергетических ресурсов внутрипроизводственных энергоустановок различных типов и назначений и технологических агрегатов, потребляющих одни и генерирующих другие виды энергоресурсов.

Объектом настоящего исследования являются системы охлаждения технологических потоков газо- и нефтеперерабатывающих производств, включающие аппараты воздушного охлаждения, системы водяного охлаждения, а также холодильные системы на специальных хладагентах.

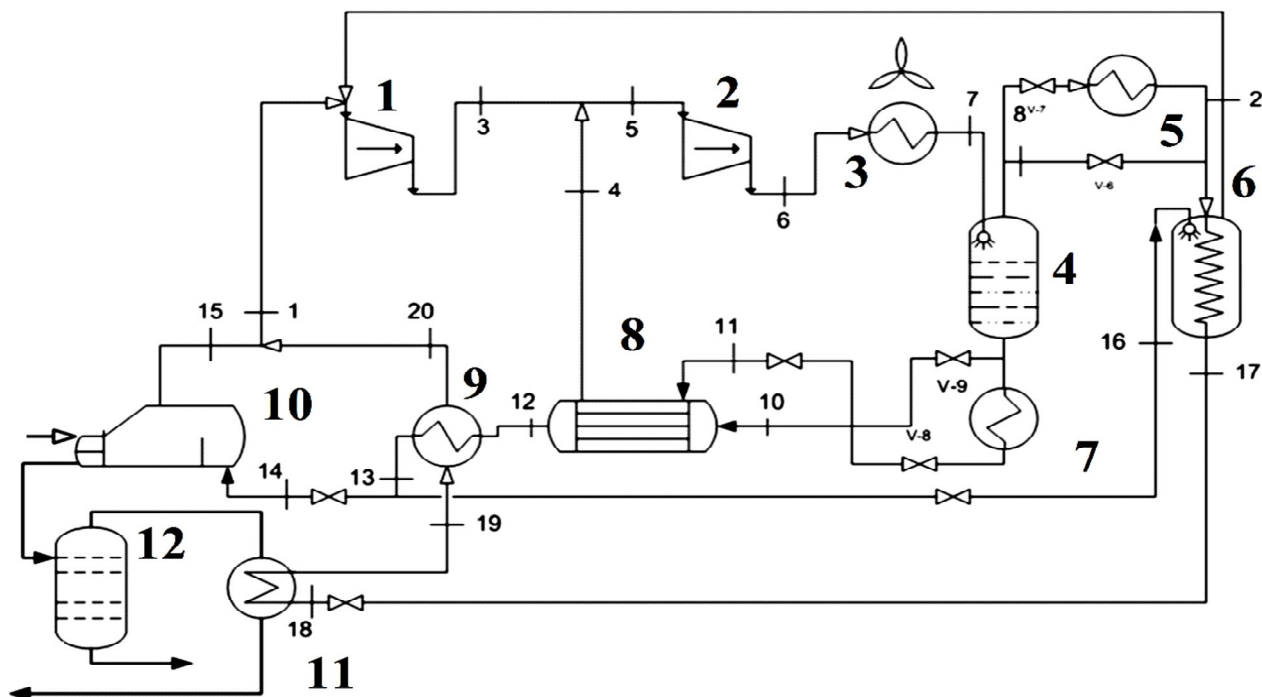
Изучением проблемы повышения эффективности существующих ГПЗ, а также совершенствованием процессов переработки газового сырья занимается множество зарубежных и отечественных компаний, таких как: Ortloff, IPSI, Bechtel, НИИ ОАО "Газпром", ВНИИГАЗ и др. Эти компании предлагают различные технологии и модификации, направленные на повышение степени извлечения целевых углеводородов, энергосберегающие технологии, использование вторичных энергоресурсов в технологических процессах, потенциала окружающей среды, а также многие другие. Отдельно следует отметить исследования, направленные на повышение эффективности схемных решений первого и второго поколения. Научно-исследовательские компании предоставляют различные пути модернизации технологических процессов. Некоторые разработки направлены на повышение эффективности холодильной системы: модификация процесса ConocoPhillips (для более эффективного извлечения пропана (IPSI)), процесс дополнительной ректификации (SRP, Ortloff), процесс переохлаждения газа (GSP, Ortloff) и др. [1; 2].

При производстве холода в установках НТК тратится значительное количество энергии. Данное обстоятельство вынуждает различные организации и предприятия, использующие холодильные установки, искать пути повышения их энергетической эффективности. Одним из путей повышения эффективности является снижение энергетических потерь, совершенствование процессов охлаждения, поступающего на переработку ПНГ, повышение эффективности существующего оборудования. Охлаждение потока природного газа до более низкой температуры на установках НТК позволяет повысить эффективность процесса переработки ПНГ путём повышения количества извлекаемых углеводородов и снижения сжигаемого на факелах газа.

Одним из путей повышения эффективности является снижение энергетических потерь, совершенствование процессов охлаждения, поступающего на переработку ПНГ, повышение эффективности существующего оборудования, использование потенциала окружающей среды.

В рассматриваемой схеме холодильной установки в составе комплекса низкотемпературной конденсации используется пропан. Снижение температуры кипения пропана ниже $t_0 = -38^\circ\text{C}$ невозможно из-за недопустимого режима работы турбокомпрессора. Добавление в пропан некоторого количества более низкокипящих углеводородов (например, этана) позволяет при сохранении давления кипения на требуемом уровне получить более низкую температуру кипения.

Представленная на рисунке 1 схема холодильной установки использует смесь углеводородов «пропан/этан» (R290/R170) в качестве рабочего тела.



1 – первая секция компрессора; 2 – вторая секция компрессора; 3 – воздушный конденсатор; 4 – сепаратор; 5 – конденсатор низкокипящего хладагента; 6 – переохладитель низкокипящего хладагента; 7 – воздушный переохладитель высококипящего хладагента; 8 – переохладитель высококипящего хладагента; 9 – регенеративный теплообменник; 10 – испаритель высококипящего хладагента; 11 – испаритель низкокипящего хладагента; 12 – промежуточный сепаратор конденсата.

Рисунок 1 – Упрощённая схема холодильной установки с разделением хладагента на фракции

Рассматривалось применение смеси с различным массовым соотношением 80/20, 85/15, 90/10, 95/15 мас.%. При использовании смеси «пропан/этан» (R290/R170) концентрации 85/15 мас.% данный вариант схемного решения позволяет получить 2,24 МВт холода от высококипящего хладагента на уровне $-42,5^\circ\text{C}$ и 1,794 МВт холода от низкокипящего хладагента на температурном уровне $-49,5^\circ\text{C}$. Данная холодопроизводительность в суммарном своём значении составляет 4 МВт при принятой температуре окружающего воздуха $+30^\circ\text{C}$. Отметим, что номинальная полезная холодопроизводительность ПХУ в цикле на пропане составляет 5,4 МВт при изотерме кипения -38°C . Очевидно значительное снижение холодопроизводительности, а также холодильного коэффициента

ента, поскольку работа сжатия компрессора практически не изменилась. Причина кроется в том, что необходимо конденсировать низкокипящий хладагент исключительно за счёт внутреннего холода установки. Однако в случае, если температура окружающего воздуха ниже либо равна $+6^{\circ}\text{C}$, то низкокипящий хладагент можно полностью сконденсировать за счёт холода окружающего воздуха в аппаратах воздушного охлаждения (при давлении 1,5 МПа температура конденсации составляет $+16^{\circ}\text{C}$).

В этом случае холодопроизводительность установки возрастает до 5,9 МВт. Холодопроизводительность по низкокипящему хладагенту при этом останется прежней – 1,794 МВт, а по высококипящему – возрастёт на величину холода, требовавшегося ранее на конденсацию низкокипящего хладагента. Весь поток переохлаждённого высококипящего хладагента будет идти на испарение в испаритель полезной нагрузки.

На рисунке 2 а показана зависимость полезной холодопроизводительности испарителя высококипящего хладагента ($Q_{o,v}$) и испарителя низкокипящего хладагента ($Q_{o,n}$) от концентрации этана. Холодопроизводительность установки в данном случае составляет от 3,8 до 4,2 МВт. В случае, если охлаждение потока низкокипящего хладагента осуществляется за счёт условий окружающей среды, суммарная холодопроизводительность системы (рисунок 2 б) возрастает на величину холодопроизводительности цикла переохлаждения. При этом холодопроизводительность находится в пределах от 5,5 до 5,9 МВт.

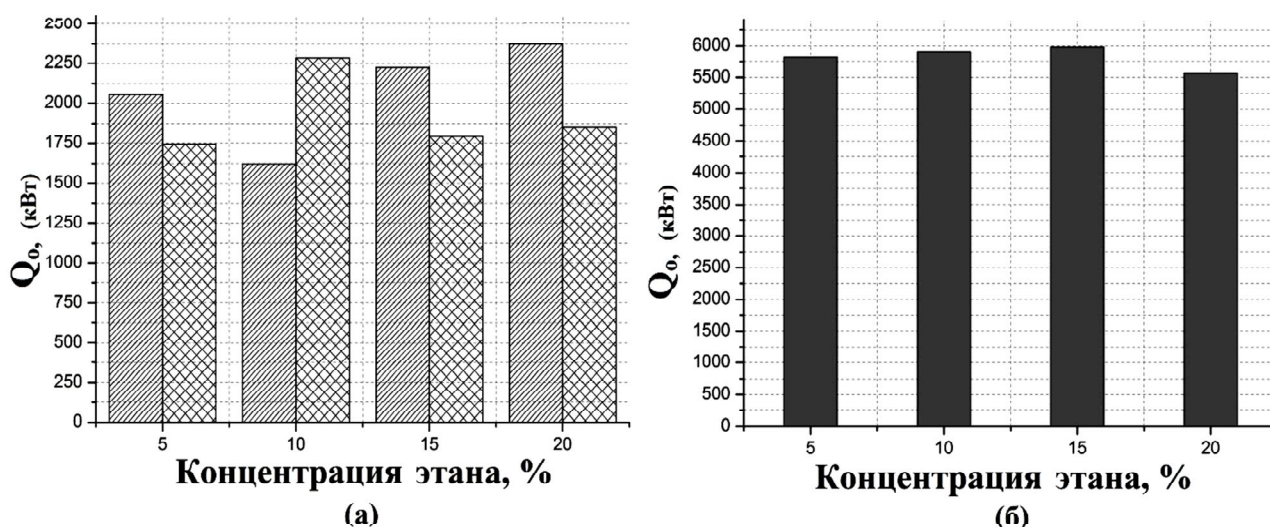


Рисунок 2 – Зависимость полезной холодопроизводительности от концентрации этана

Вследствие того, что применение эксергетического анализа является более целесообразным для оценки потерь холодильной установки с двумя и более температурными уровнями, проводим ее эксергетический анализ.

Предыдущие исследования были направлены на определение величины эксергетических потерь аппаратов воздушного охлаждения, а также на определение оптимальной концентрации смеси рабочего тела R170/R290.

Оптимальной к использованию была определена концентрация смеси «пропан/этан» 85/15 мас.%. Выбор объясняется более высокими холодопроизводительностью и холодильным коэффициентом.

Наименьшие эксергетические потери в АВО-Т/АВО-Л от теплообмена с окружающей средой наблюдаются при использовании смеси R170/R290 с большим содержанием этана, поскольку температура конденсации смеси «пропан / этан» понижается вместе с увеличением доли низкокипящего компонента в смеси [3].

Рассмотрим эксергетические потери в переохладителях высококипящего и низкокипящего хладагентов (ТА-Т, ТА-Л), а также регенеративном теплообменнике (РТО). В переохладителе высококипящего хладагента ТА-Т поток из сепаратора переохлаждается за счет испарения части этого же потока. Определим величину эксергетических потерь переохладителя высококипящего хладагента, а также оптимальную концентрацию смеси R290/R170.

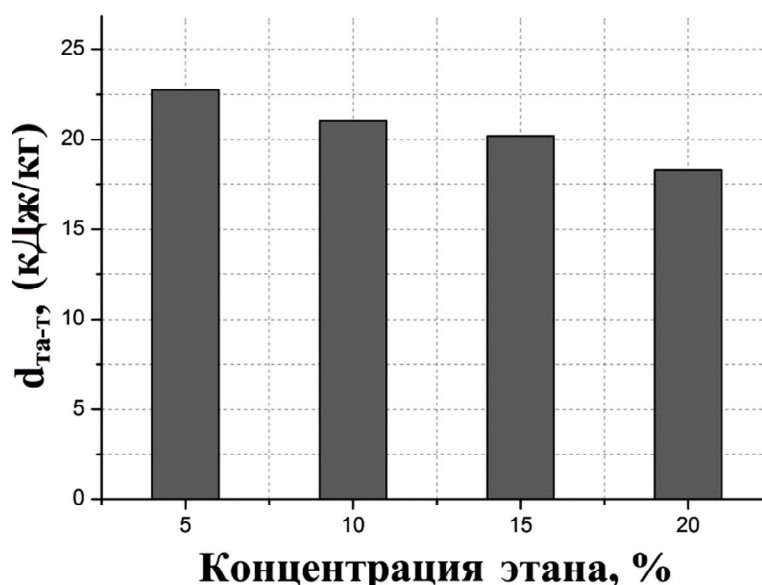


Рисунок 3 – Эксергетические потери в переохладителе высококипящего хладагента ТА-Т $d_{та-т}$, кДж/кг в зависимости от % добавки этана в пропан

Эксергетические потери в переохладителе высококипящего хладагента ниже при использовании хладагента R290/R170 концентрации 80/20 мас.%. Разность температур потока высококипящего хладагента, идущего на переохлаждение в ТА-Т, при данной концентрации ниже. Температура переохлаждающего потока также более низкая. Однако стоит предположить, что при данной концентрации эксергетические потери от необратимости процесса теплообмена будут наибольшими.

Переохладитель низкокипящего хладагента ТА-Л представляет собой теплообменник типа «газ-газ». С нагревающей стороны поступают несконденсированные пары хладагента из сепаратора, которые могут быть охлаждены в аппарате воздушного охлаждения АВО-Л при соответствующих условиях окру-

жающей среды. Охлаждающая сторона представляет собой часть потока высококипящего хладагента, сдросселированного до давления кипения, после регенеративного теплообменника РТО-1.

На рисунке 4 показана величина эксергетических потерь переохладителя низкокипящего хладагента в зависимости от концентрации этана. В процессе конденсации потока низкокипящего хладагента за счет потока из РТО-1 (рисунок 4 а) величина эксергетических потерь будет равна величине эксергетических потерь исходя из-за необратимости теплообмена между потоками. При охлаждении потока низкокипящего хладагента за счет условий окружающей среды величина эксергетических потерь будет состоять из потерь от необратимости теплообмена и потерь от теплообмена с окружающей средой [4].

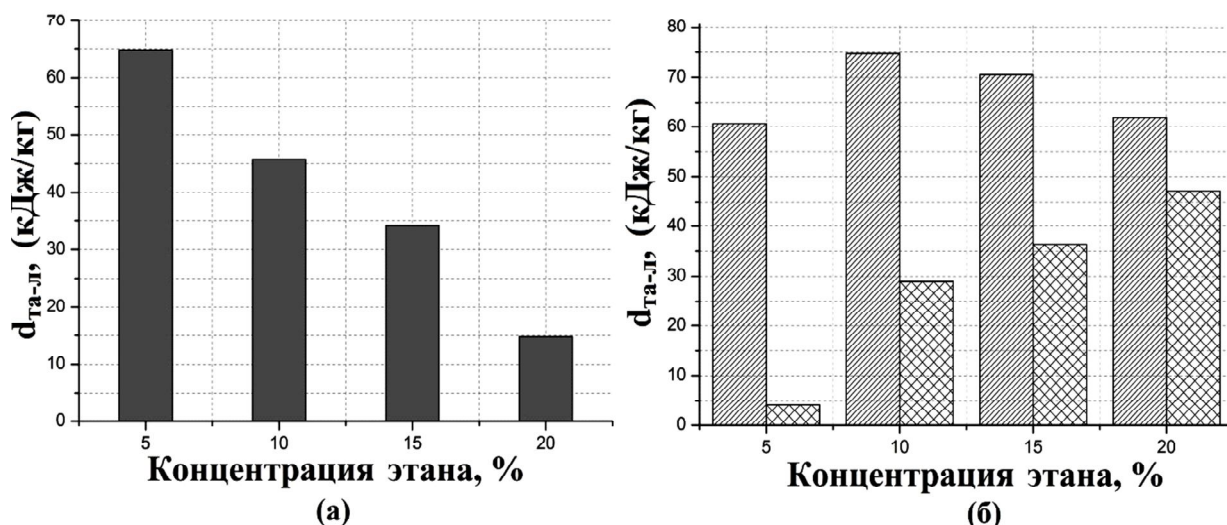


Рисунок 4 – Эксергетические потери в переохладителе низкокипящего хладагента $d_{та-л}$, кДж/кг

Эксергетические потери в переохладителе низкокипящего хладагента могут быть снижены на величину потерь в аппарате воздушного охлаждения АВО-Л, если конденсировать поток низкокипящего хладагента после сепаратора за счет температуры окружающей среды.

Эксергетический КПД ТА-Л, согласно рисунку 5, имеет большие значения при концентрации этана 15-20%, поскольку эксергетические потери от теплообмена с окружающей средой более низкие. Если мы переохлаждаем низкокипящий ХА за счет потока высококипящего хладагента, эксергетический КПД может быть ниже. При этом также будут иметь место потери от теплопроводности между потоками хладагентов.

Эксергетический КПД компрессора имеет наибольшую величину при концентрации этана 15%. Снижение величины эксергетического КПД компрессора с увеличением концентрации этана свыше 18% связано со значительным падением массового расхода. Как результат смесь обладает большим значением удельного объема на всасывании при одинаковом объемном расходе (значение объемного расхода на всасывании не является произвольным и зависит от режима работы турбокомпрессора).

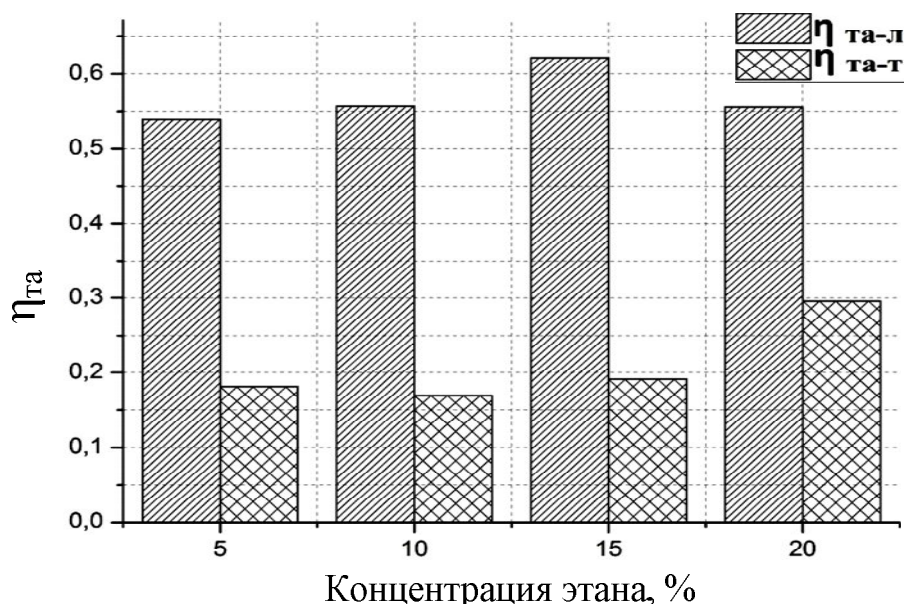


Рисунок 5 – Зависимость эксергетического КПД переохладителя высококипящего ХА ТА-Т и низкокипящего ХА ТА-Л в зависимости от концентрации этана в смеси «пропан/этан»

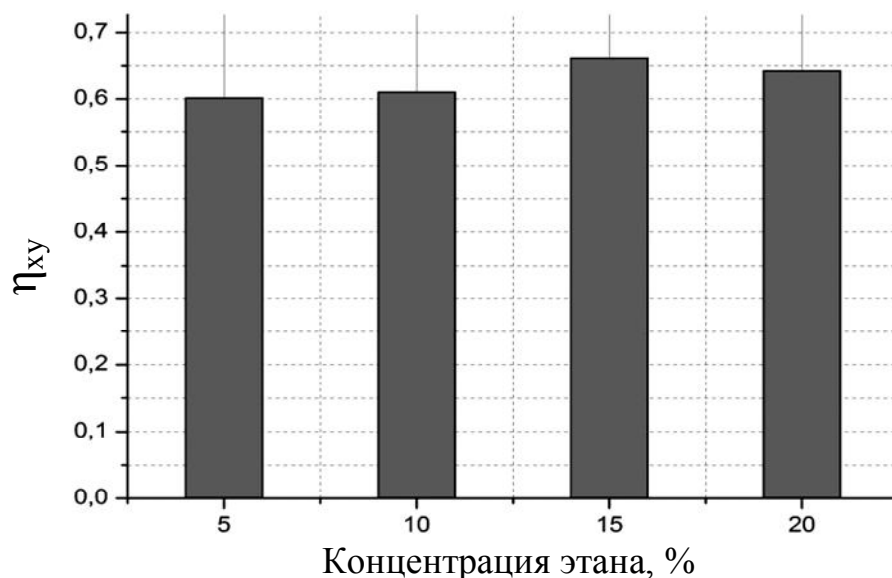


Рисунок 6 – Зависимость эксергетического КПД холодильной установки в зависимости от концентрации этана в смеси «пропан/этан»

Наибольшие эксергетические потери наблюдаются в компрессоре холодильной установки, аппаратах воздушного охлаждения (АВО, АВО-Т, АВО-Л). Наименьшие – в теплообменнике ТА-Т, РТО (при концентрациях этана выше 10%), дросселях. Применение смеси «пропан/этан» массового соотношения 80/20 мас.% позволяет добиться наименьших суммарных эксергетических потерь, однако данное соотношение смеси R290/R170 проигрывает по ряду характеристик. Величина потерь при применении смеси «пропан/этан» 95/5 мас.% наибольшая по причине того, что эффективность применения данного соотношения смеси низкая по сравнению со смесью 85/15, 80/20 мас.%. Температура

конденсации смеси «пропан/этан» 95/5 мас.% составляет 43,5°C, в то время как для смеси 80/20 мас.% – 26°C. В случае применения смеси R290/R170 95/5 мас.% или 90/10 мас.% температура конденсации составляет 43,5°C и 38°C. Соответственно не всегда получается разделить поток ХА в сепараторе, получив необходимое соотношение пара и жидкости (слишком малая доля пара по отношению к жидкости). При этом необходимо конденсировать поток низкокипящего ХА за счет доли переохлажденного потока высококипящего ХА. По этой причине холодопроизводительность снижается.

Повышение концентрации этана в смеси «пропан/этан» позволяет снизить эксергетические потери за счет теплообмена с окружающей средой в аппаратах воздушного охлаждения АВО, АВО-Т, АВО-Л, а также переохладителе низкокипящего хладагента, поскольку температура конденсации смеси с большим содержанием низкокипящего хладагента (R290/R170 85/15 мас.% и 80/20 мас.%) ниже.

Выбор оптимальной концентрации смеси R290/R170 позволяет снизить величину эксергетических потерь от необратимости теплообмена между потоками хладагентов в теплообменниках.

Список литературы / References:

1. Process Retrofits Maximize the Value of Existing NGL and LPG Recovery Plants / J.T. Lynch, J.D. Wilkinson, H.M. Hudson, R.N. Pitman // 82-nd convention of Gas Processors Association. 2003. – P. 1-11.
Lynch, J.T., Wilkinson, J.D., Hudson, H.M. and Pitman, R.N. (2003), “Process Retrofits Maximize the Value of Existing NGL and LPG Recovery Plants”, *82-nd convention of Gas Processors Association*, pp. 1-11.
2. Le-Gall A. Compare the different options for NGL recovery from natural gas / A. Le-Gall, B. Laflotte // Gastech 2002. – 2005. – P. 1-21.
Le-Gall, A. and Laflotte, B. (2005), “Compare the different options for NGL recovery from natural gas”, *Gastech 2002*, pp. 1-21.
3. Остапенко А.В. Энергетическая эффективность установок низкотемпературной конденсации природного газа / А.В. Остапенко, М.О. Мартынюк // Устойчивое развитие и искусственный холод. – ОГАХ. – 2012.
Ostapenko, A.V. and Martuniuk, M.O. (2012), “Energy efficiency of natural gas low-temperature condensation complex refrigeration unit”, *Ustoychivoye razvitiye i iskustvennyi holod*, OSAR, Odessa, Ukraine.
4. Бродянский В.М. Эксергетический метод и его приложения / В.М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
Brodyansky, V.M., Fratscher, V. and Mikhalek, K. (1988), *Eksergeticheskiy metod i yego prilozheniya* [Exergy method and its applications], Energoatomizdat, Moscow, Russia.
5. Мартынюк М.О. Применение смеси «пропан/этан» в пропановой холодильной установке / М.О. Мартынюк, М.Г. Хмельнюк, А.В. Остапенко // Современные проблемы холодильной техники и технологии. – ОНАПТ. – 2011. – С. 13-15.
Martuniuk, M.O., Khmelniuk, M.G. and Ostapenko, A.V. (2011), “Usage of propane/ethane mixture in propane refrigeration unit”, *Sovremennye problemy holodilnoy tekhniki i tekhnologii*, ONAPT, Odessa, pp. 13-15.

Мета. Визначити ексергетичні втрати в теплообмінних апаратах холодильної установки комплексу низькотемпературної конденсації природного газу, а також оптимальну концентрацію суміші робочого тіла (R290/R170). Оцінити холодопродуктивність холодильної установки з поділом потоку холодоагенту на фракції за умови використання різної концентрації робочого тіла.

Методика. У процесі визначення втрат застосовано ексергетичний метод термодинамічного аналізу. Оскільки ексергетичний метод термодинамічного аналізу є найбільш відповідним для визначення втрат в елементах установки з двома і більше температурними рівнями.

Результати. Було проведено аналіз ексергетичних втрат в апаратах і елементах холодильної установки, визначено холодопродуктивність холодильної установки з поділом холодоагенту на фракції за умови роботи на різних концентраціях суміші «пропан / етан». На підставі результатів ексергетичного аналізу визначено ексергетичні втрати в теплообмінних апаратах, величину ексергетичного ККД, а також концентрацію суміші «пропан / етан» за найменших ексергетичних втрат установки.

Наукова новизна. Визначено концентрацію суміші «пропан/етан» для найбільш ефективної роботи установки з поділом потоку холодоагенту на фракції. Ураховуючи особливості роботи турбокомпресора й теплообмінних апаратів, дані ексергетичного аналізу дозволяють робити висновок про найбільш ефективний режим роботи холодильної установки.

Практична значущість. Розглянуто можливість застосування результатів ексергетичного аналізу холодильної установки з поділом холодоагенту на фракції з метою підвищення ефективності окремих вузлів і компонентів системи. Величина ексергетичних втрат дозволяє робити висновок про доцільність застосування тієї чи іншої концентрації робочого тіла для холодильної установки.

Ключові слова: ексергетичний аналіз, низькотемпературна конденсація природного газу, втрати ексергії, R290/R170, переохолоджувач холодоагенту.

Objective. Determination of exergy losses in heat exchangers of low-temperature condensation refrigeration unit, as well as to determine the optimal concentration of the mixture of working fluid (R290/R170). Define cooling capacity of refrigeration unit with refrigerant fractionation with different propane/ethane concentration mixture.

Methods. In determining the losses exergy method of thermodynamic analysis is applied. Since exergy method of thermodynamic analysis is the most appropriate to determine the loss in the elements set with two or more temperature levels.

Results. Analysis of exergy losses in apparatus and elements of the refrigeration unit was conducted. Cooling capacity of refrigeration unit with refrigerant fractionation was determined. Based on the results of exergy analysis exergetic losses in heat exchangers are determined, the value of energetic efficiency and the optimal concentration of propane/ethane.

Academic novelty. The concentration of propane/ethane for the most efficient operation mode of refrigeration unit with refrigerant fractionation is defined, considering the turbocharger and heat exchangers operation modes. Exergy analysis of the data provides insights on the most effective mode of operation of the refrigeration unit.

Practical importance. The possibility of using the results of exergy analysis of refrigeration unit with refrigerant fractionation in order to increase the efficiency of individual components and system components is considered. The value of exergetic losses allows to judge the appropriateness of a given concentration of the working fluid for refrigeration.

Key words: exergy analysis, low-temperature condensation of natural gas, the loss of exergy, R290/R170, refrigerant subcooler.

Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук
Симоненко Ю.М.

Дата надходження рукопису 14.02.2013 р.