

## Анализ перспектив использования парожеторной и абсорбционной холодильных установок для охлаждения технологического газа и получения жидкого углеводородного топлива

А. С. Титлов<sup>1</sup>, Т. А. Сагала<sup>2</sup>, В. Н. Артюх<sup>3</sup>, Т. В. Дьяченко<sup>4</sup>

Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Канатная, 112, Одесса, 65039, Украина

ORCID: <sup>1</sup> 0000-0003-1908-5713, <sup>2</sup> 0000-0003-3569-7920, <sup>3</sup> 0000-0002-1751-7933, <sup>4</sup> 0000-0001-9275-187X

✉ e-mail: [titlov1959@gmail.com](mailto:titlov1959@gmail.com)

*Для типового предприятия нефтеперерабатывающего комплекса проведен численный сравнительный анализ возможностей применения теплоиспользующих парожеторных (ПЭХУ) и абсорбционных водоаммиачных (АХУ) холодильных установок, работающих с отходящими нагретыми газовыми потоками. Предполагалось, что температурный уровень при искусственном охлаждении позволит получить конденсат углеводородных фракций n-бутана и n-пентана. В результате расчетов определяются: температура конца охлаждения технологического газа; температура конца охлаждения продуктов сгорания; параметры в характерных точках термодинамических циклов; холодопроизводительность и тепловой коэффициент; тепловая нагрузка теплообменных аппаратов и мощности циркуляционных насосов; поверхности нагрева и габариты теплообменного оборудования; габариты эжекторной группы ПЭХУ. Показано, что технические показатели АХУ (возможность более глубокого охлаждения газа, большее количество получаемого топлива, меньшие суммарные поверхности нагрева теплообменных аппаратов) выше на 20–25%, чем ПЭХУ.*

**Ключевые слова:** Утилизация бросовой теплоты; Теплоиспользующие холодильные машины; Парожеторные; Абсорбционные; Водоаммиачные; Сравнительный анализ расчетных циклов

## Аналіз перспектив використання парожеторної та абсорбційної холодильних установок для охолодження технологічного газу і отримання рідкого вуглеводневого палива

О. С. Титлов<sup>1</sup>, Т. А. Сагала<sup>2</sup>, В. М. Артюх<sup>3</sup>, Т. В. Дьяченко<sup>4</sup>

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

ORCID: <sup>1</sup> 0000-0003-1908-5713, <sup>2</sup> 0000-0003-3569-7920, <sup>3</sup> 0000-0002-1751-7933, <sup>4</sup> 0000-0001-9275-187X

*Для типового підприємства нафтопереробного комплексу проведений чисельний порівняльний аналіз можливостей застосування тепловикористовуючих парожеторних (ПЕХУ) і абсорбційних водоаміачних (АХУ) холодильних установок, що працюють з відхідними нагрітими газовими потоками. Передбачалося, що температурний рівень при штучному охолодженні дозволить отримати конденсат вуглеводневих фракцій n-бутану та n-пентану. В результаті розрахунків визначаються: температура кінця охолодження технологічного газу; температура кінця охолодження відпрацьованих газів; параметри в характерних точках термодинамічних циклів; холодопродуктивність і тепловий коефіцієнт; теплове навантаження теплообмінних апаратів і потужності циркуляційних насосів; поверхні нагріву і габарити теплообмінного обладнання; габарити ежекторної групи ПЕХУ. Показано, що технічні показники АХУ (можливість більш глибокого охолодження газу, більша кількість одержаного палива, менші загальні поверхні нагріву теплообмінних апаратів) вище на 20 - 25%, ніж ПЕХУ.*

**Ключові слова:** Утилізація викидної теплоти; тепловикористовуючі холодильні машини; Парожеторні; Абсорбційні; Водоаміачні; Порівняльний аналіз розрахункових циклів

© The Author(s) 2017. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



### 1 Введение

Потоки углеводородных газов, получаемых в технологиях химических и нефтеперерабатывающих производств, имеющих достаточно высокую температуру

(60 °С и выше), целесообразно охлаждать до 20 – 35 °С для выделения из них фракций жидкого углеводородного топлива. Расчеты показали, что из газа с массовым составом углеводородов и при давлении этого газа 10 - 11 бар может быть сконденсировано 36 – 57 % по

массе жидкого н-бутана и н-пентана. При этом необходимо отводить 150 – 230 кДж тепла на 1 кг газа. В расчетах использовались справочные данные [1-3].

В зимний период это возможно путем охлаждения газа технической водой из оборотной системы теплообменника, а в летний период, особенно для южных районов страны, необходимы установки для производства искусственного холода.

Следует иметь в виду, что на вышеназванных производствах имеются теплогенераторы (котельные установки, печи и т.п.), продукты сгорания на выходе из которых имеют достаточно высокий (300 – 350 °С) потенциал и нуждаются в утилизации. Утилизированное тепло может быть использовано для получения искусственного холода.

К числу таких теплоиспользующих холодильных установок (ХУ) относятся парожеткорные (ПЭХУ) и водоаммиачные абсорбционные (АХУ).

В настоящей работе проводится сравнение основных технических показателей этих двух типов установок применительно к задаче охлаждения технологического углеводородного газа в летний период. Такое сравнение позволит более обоснованно подойти к выбору типа ХУ и для решения подобных задач.

## 2 Условия сравнения технических показателей в ПЭХУ и АХУ

Рассмотрены режимы работы типичной технологической линии нефтеперерабатывающих производств [1]:

– расход технологического газа 12 т/ч (состав газа указан выше), его давление 10 бар, температура на входе в испаритель ХУ 60 °С;

– расход утилизируемых продуктов сгорания  $18 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup>/ч (13,5 т/ч при плотности 0,75 кг/м<sup>3</sup>), их температура 350 °С;

– температура технической воды на входе в охлажда-

емые элементы ХУ 40 °С, на выходе из них 45 °С.

В результате расчетов для каждой ХУ определяются:

– температура конца охлаждения технологического газа;

– температура конца охлаждения продуктов сгорания;

– параметры в характерных точках термодинамических циклов ХУ: давление  $P_i$ , температура  $t_i$ , удельный объем  $v_i$ , энтальпия  $h_i$ , массовое паросодержание  $x_i$ , концентрация аммиака в воде аммиачной смеси (для АХУ)  $\xi_i$ , расход  $G$  (приведенный [кг/кг] и абсолютный [кг/с]), скорости потоков (для потоков в проточной части эжектора ПЭХУ);

– холодопроизводительность и тепловой коэффициент ХУ;

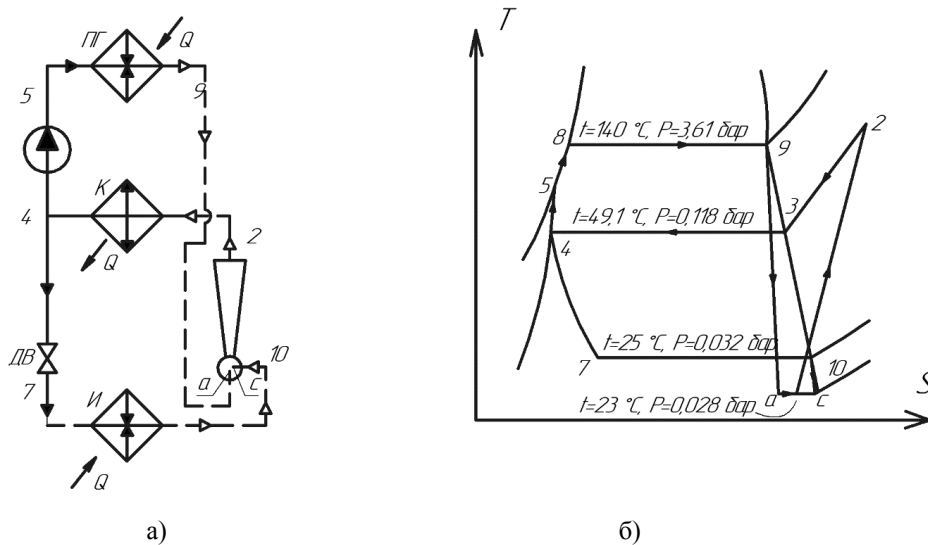
– тепловая нагрузка теплообменных аппаратов и мощности насосов-побудителей циркуляции;

– поверхности нагрева и габариты теплообменного оборудования;

– габариты эжекторной группы (для ПЭХУ).

## 3 Технические показатели ПЭХУ

Принципиальная схема и цикл ПЭХУ представлены на рисунке 1. В качестве хладагента и рабочего тела приняты вода и водяной пар, как наиболее перспективные для заданного уровня температур [4]. Технологический газ охлаждается в испарителе *И* от 60 до 35 °С за счет полного выкипания в нём (7-10) относительно низкотемпературной (25 °С) пароводяной смеси. При этом от газа отводится тепло и из него конденсируются жидкое углеводородное топливо. Образующиеся в *И* водяные пары отсасываются и сжимаются (1-2) эжекторами *ЭГ* за счет кинетической энергии высокотемпературного пара из парогенератора *ПГ*, реализующейся при расширении этого пара (9-а) в соплах *ЭГ*. Сжатый до давления конденсации в *ЭГ* пар (точка 2) охлаждается и конденсируется (2-3-4) в конденсаторе *К*, отдавая охлаждающей конденсатор технической воде тепло.



**Рисунок 1** – Принципиальная схема (а), термодинамический цикл (б) и T-S диаграмма ПЭХУ: ПГ – парогенератор-утилизатор, ЭГ – эжекторная группа, К – конденсатор, И – испаритель, ДВ – дроссельный вентиль, Н – насос

Сконденсировавшаяся вода (точка 4) разветвляется на два потока: один поток направляется в холодильную часть установки и, после дросселирования (4-7) в ДВ до состояния пароводяной смеси (точка 7) поступает в И для полного выпаривания; другой поток воды сжимается насосом Н до давления парогенератора и направляется в него, где подогревается и кипит (5-8-9) за счёт подвода утилизируемого от продуктов сгорания тепла. Генерируемый в ПП высокотемпературный пар поступает в ЭГ в качестве энергонесителя для сжатия «холодного» пара из И. Цикл замыкается.

Параметры в характерных точках цикла и основные показатели термодинамической эффективности ПЭХУ представлены в табл. 1 и 2. Пароэжекторная группа рассчитывалась по методике, разработанной авторами в ОНАХТ. Цикл рассчитывался по общепринятой методике [4], используя справочные данные [5]. При расчетах принято: коэффициенты скорости в эжекторах ЭГ – сопла рабочего пара 0,96; кольцевого сопла сжимаемого пара 0,9; камеры смешения 0,95; КПД диффузора 0,93; КПД насосов для перекачки воды 0,8.

**Пароэжекторная группа.** Количество эжекторов – 6. Параметры рабочего пара: температура 140 °С, давление 3,61 бар, степень сухости 1, расход на один эжектор 0,057 кг/с.

Параметры отсасываемых водяных паров: температура 25 °С, давление 0,032 бар, степень сухости 1, расход на один эжектор 0,036 кг/с.

Параметры смеси паров в камере смешения: температура 23 °С, давление 0,028 бар, степень сухо-

сти 0,952. Коэффициент эжекции 0,625. Габариты одного эжектора: длина 1,7 м, диаметр 0,3 м.

Оценивались поверхности нагрева и габариты элементов теплообменного оборудования ХУ: парогенератора, конденсатора и испарителя. Расчёты проводились в соответствии с методиками [6].

**Парогенератор.** Тепловая нагрузка: 860 кВт. Греющая среда: продукты сгорания с расходом 3,74 кг/с. Температуры на входе и выходе 350 °С и 144 °С, соответственно, давление 1 бар. Нагреваемая среда: вода и водяной пар с расходом 0,342 кг/с. Температуры на входе и выходе 49,1 °С и 140 °С, соответственно, давление 3,61 бар. Конструкция: прямоточный с кипением внутри оребренных труб с наружным диаметром 50 мм, степень оребрения 13, приведенный коэффициент теплопередачи 280 Вт/(м<sup>2</sup>·К), поверхность нагрева 58 м<sup>2</sup>. Габариты: длина 1,6 м, ширина 1,6 м, высота 2,5 м.

**Конденсатор.** Тепловая нагрузка 1362 кВт. Греющая среда: перегретый и насыщенный конденсирующийся водяной пар с расходом 0,556 кг/с. Температуры на входе и на выходе 89,3 °С и 49,1 °С, соответственно, давление 0,12 бар. Нагреваемая среда: техническая вода с расходом 65 кг/с. Температуры на входе и на выходе 40 °С и 45 °С, соответственно, давление 1 бар. Мощность насоса для прокачки воды 4,1 кВт. Конструкция: противоточный с конденсацией на наружной поверхности труб диаметром 20 мм. Коэффициенты теплопередачи на участке снятия перегрева 30 Вт/(м<sup>2</sup>·К), на участке конденсации 100 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Поверхность нагрева 258 м<sup>2</sup>. Габариты: длина 2 м, диаметр 1,6 м.

Таблица 1 – Параметры в характерных точках цикла ПЭХУ

№ точки	1	2	3	4	5	7	8	9	10	а	с
$t, ^\circ\text{C}$	23	89,3	49,1	49,1	49,1	25	140	140	25	23	23
$p, \text{бар}$	0,0281	0,118	0,118	0,118	3,614	0,032	3,614	3,614	0,032	0,028	0,028
$i, \text{кДж/кг}$	2424,6	2662,1	2590,3	205,56	205,56	205,56	589,0	2734,0	2546,8	8102,6	2543,2
$v, \text{м}^3/\text{кг}$	46,26	14,16	13,56	0,001	0,001	1,79	0,011	0,51	43,40	39,86	48,62
$x, \text{кг}$	0,952	1	1	0	0	0,041	0	1	1	0,82	1
$x, \text{кг/кг}$	2,6	2,6	2,6	2,6	1,6	1,0	1,6	1,6	1,0	1,6	1,0
$G, \text{кг/с}$	0,556	0,556	0,556	0,556	0,342	0,214	0,342	0,342	0,214	0,342	0,214
$w, \text{м/с}$	689,4	25,0	-	-	-	-	-	25,0	25,0	1124,0	86,5

Таблица 2 – Показатели термодинамической эффективности схемы ПЭХУ

Наименование показателя	Размерность	Численное значение
Конечная температура охлаждения технологического газа	°С	35
Конечная температура утилизируемых продуктов сгорания	°С	144
Количество получаемого жидкого углеводородного топлива	т/ч	4,31
Холодопроизводительность установки	кВт	500
Количество утилизованного тепла	кВт	862
Тепловой коэффициент	-	0,58
Тепло, отведенное от конденсатора	кВт	1362
Расход хладагента	т/ч	0,77
Мощность насоса в цикле ПЭХУ	кВт	0,15
Расход охлаждающей воды	т/ч	233,5
Мощность насоса охлаждающей воды	кВт	4,1

**Испаритель.** Тепловая нагрузка 500 кВт. Греющая среда: технологический газ с расходом 3,33 кг/с. Температуры на входе и на выходе 60 °С и 35 °С, соответ-

ственно, давление 10 бар. Количество сконденсированного углеводородного топлива 4,31 т/ч. Нагреваемая среда: кипящая пароводяная смесь с расходом 0,214 кг/с,

давление 0,032 бар. Конструкция: трубчатый с конденсацией жидких углеводородов в объеме на внешней оребренной поверхности труб диаметром 20 мм (степень оребрения 7) и кипением пароводяной смеси внутри этих труб. Приведенный коэффициент теплопередачи 420 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Поверхность нагрева 60 м<sup>2</sup>. Габариты: длина 1,8 м, ширина 0,5 м, высота 2,2 м.

#### 4 Технические показатели АХУ

Принципиальная схема и цикл АХУ представлены на рисунке 2. Схема работает на водоаммиачной смеси (хладагент - аммиак, абсорбент - вода). Технологический газ охлаждается в испарителе *И* от 60 до 32 °С за счёт выкипания в нём (5-6) при минимальном давлении в цикле  $P_0$  относительно холодной (9 °С) парожидкостной аммиачной смеси. При этом от газа отводится теплота и из неё конденсируются жидкие углеводороды. Образующийся в испарителе *И* насыщенный пар аммиака, перегреваясь (6-7) в охладителе жидкости *ОЖ*, охлаждает жидкий аммиак (3-4), поступающий в охладитель *ОЖ* из конденсатора *К*.

Подогретый пар аммиака (точка 7) поступает в абсорбер *А*, где после барботирования в «слабом» водоаммиачном растворе (точка 11), попадает в *А* после

дросселирования (10-11) в *ДВ-2* от максимального давления в цикле до минимального, смешивается с этим «слабым» раствором (точка 12) и абсорбируется им до состояния «крепкого» насыщенного раствора (точка 13). При этом технической водой, охлаждающей абсорбер *А*, отводится теплота абсорбции. Полученный «крепкий» раствор сжимается в насосе *Н* (13-14) до давления  $P_0$ , подогревается (14-15) в регенеративном теплообменнике *ТР* за счёт охлаждения в нём «слабого» раствора из генератора *Г* и поступает через ректификационную колонну *РК* в генератор *Г*. В генераторе «крепкому» раствору противотоком подводится теплота утилизируемых продуктов сгорания, при этом раствор кипит, его температура повышается, а концентрация по аммиаку уменьшается (15-9). Смесь паров аммиака и воды переменной концентрации, омывая в *РК* пленки ещё не подогретого в *Г* и потому более холодного «крепкого» раствора, охлаждается и обогащается по аммиаку за счёт частичной конденсации водяного пара. Окончательная очистка смеси паров осуществляется в дефлегматоре при отводе от него (1-2) технической водой теплоты дефлегмации. Образовавшаяся при этом флегма (смесь сконденсировавшейся воды и части аммиака, состояния близкого к точке 8) возвращается обратно в *Г*.

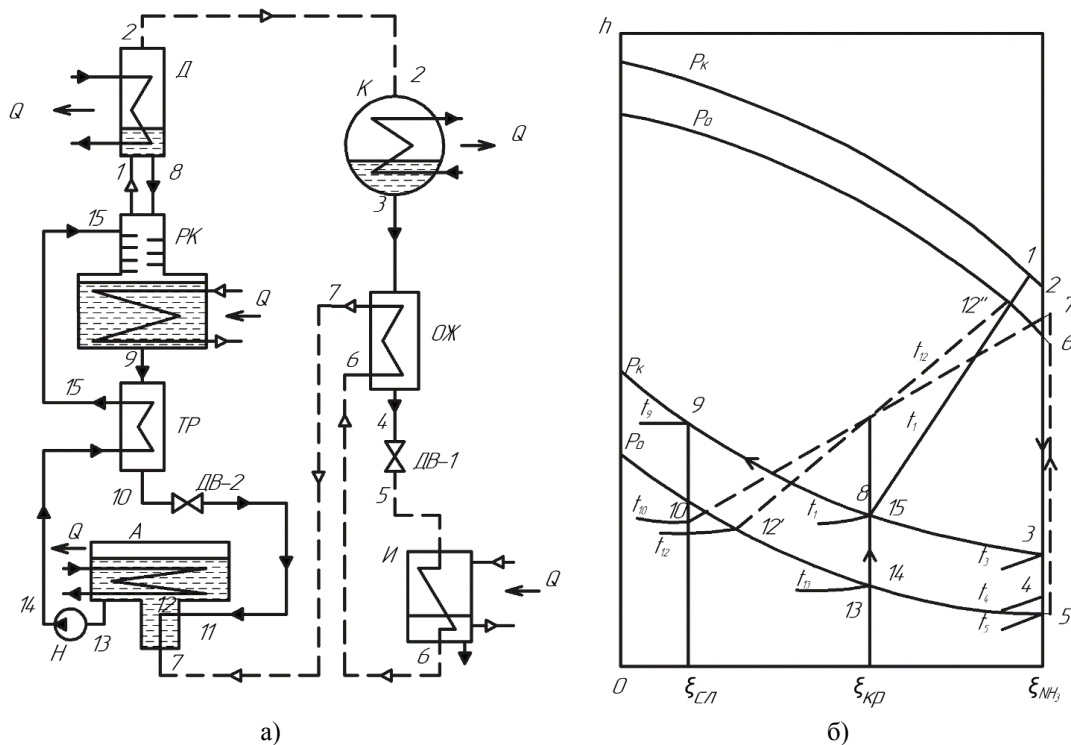


Рисунок 2 – Принципиальная схема (а) термодинамический цикл, (б)  $h$ - $\xi$  диаграмма АХУ:

*Г* – генератор, *РК* – ректификационная колонна, *Д* – дефлегматор, *К* – конденсатор, *ОЖ* – охладитель жидкости, *ДВ-1*, *ДВ-2* – дроссельные вентили, *И* – испаритель, *А* – абсорбер, *ТР* – теплообменник растворов (на диаграмме линия 5-6-7 показана для наглядности условно, в действительности она лежит на линии  $\xi = 1$ ). Индексы  $\xi_{сл}$  и  $\xi_{кр}$  относятся к «слабому» и «крепкому» растворам, соответственно.

Очищенный аммиачный пар конденсируется (2-3) в *К* за счёт отвода к охлаждающей его технической воде теплоты конденсации. Сконденсировавшийся жидкий аммиак переохлаждается в *ОЖ*, дросселируется (4-5) в

*ДВ-1* и поступает в качестве хладагента в *И*. Цикл замыкается.

Параметры в характерных точках цикла и основные показатели термодинамической эффективности

АХУ представлені в таблицях 3 і 4. Расчеты проводились в соответствии с методиками [4, 7], использовались справочные данные [8].

Аналогично ПЭХУ оценивались поверхности нагрева и габариты элементов теплообменного оборудования АХУ. Результаты приведены ниже.

**Генератор.** Тепловая нагрузка 1027 кВт. Греющая среда: продукты сгорания с расходом 3,74 кг/с, давление 1 бар. Температуры на входе и на выходе 350 °С и 100 °С, соответственно. Нагреваемая среда: кипящий водоаммиачный раствор с расходом 1,258 кг/с; концентрация аммиака 0,483 кг/кг на входе и 0,113 кг/кг на выходе; температуры на входе и на выходе 93,4 °С и 179,2 °С, соответственно; давление 20 бар.

Конструкция: принят аппарат с пленочной разделкой раствора внутри вертикальных оребренных труб наружного диаметра 120 мм (коэффициент оребрения 13), поперечно омываемых продуктами сгорания. Такая конструкция позволяет организовать противоточную схему тепломассообмена с отводом генерируемого внутри труб водоаммиачного пара переменной концентрации аммиака в ректификационную колонну.

Возможны и другие варианты, например, 3-4 ступенчатая конструкция с кипением в каждой ступени в объеме соответствующего аппарата и сбором пара различной концентрации их аппаратов всех ступеней в общую ректификационную колонну.

Для принятой конструкции: приведенный коэффициент теплопередачи 286 Вт/(м<sup>2</sup>·К), поверхность нагрева 71 м<sup>2</sup>. Габариты: высота 2,5 м, диаметр 2,4 м.

**Абсорбер.** Тепловая нагрузка 952 кВт. Греющая среда: водоаммиачная парожидкостная смесь с расходом 1,258 кг/с. Температуры на входе и на выходе 94,1 °С и 50 °С, соответственно. Нагреваемая среда: кипящий водоаммиачный раствор с расходом 1,258 кг/с; концентрация пара на входе 0,907 кг/кг, раствора на входе 0,23 кг/кг и 0,483 кг/кг на выходе; давление 6 бар. Конструкция: противоточный змеевиковый с движением воды внутри труб диаметром 20 мм. Коэффициент теплопередачи 500 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Поверхность нагрева 76 м<sup>2</sup>. Габариты: длина 1,6 м,

диаметр 1,5 м.

**Конденсатор.** Тепловая нагрузка 554,5 кВт. Греющая среда: конденсирующийся пар аммиака с расходом 0,525 кг/с, температуры на входе и на выходе 49,4 °С, давление 20 бар. Нагреваемая среда: техническая вода с расходом 26,4 кг/с, температуры на входе и на выходе 40 °С и 45 °С, соответственно, давление 1 бар.

Конструкция: противоточный с конденсацией на наружной поверхности труб диаметром 20 мм. Коэффициент теплопередачи 1000 Вт/(м<sup>2</sup>·К), поверхность нагрева 80 м<sup>2</sup>. Габариты: длина 1,5 м, диаметр 1,2 м.

**Дефлегматор.** Тепловая нагрузка 104,5 кВт. Греющая среда: водоаммиачный пар с расходом 1,04 кг/с, температуры на входе и на выходе 93,4 °С и 49,4 °С, соответственно, концентрации на входе и на выходе 0,98 и 1,0, соответственно, давление 20 бар. Нагреваемая среда: техническая вода с расходом 5 кг/с, температуры на входе и на выходе 40 °С и 45 °С, соответственно, давление 1 бар.

Конструкция: трубчатый аппарат с конденсацией флегмы на наружной поверхности оребренных труб диаметром 20 мм (степень оребрения 7). Приведенный коэффициент теплопередачи 412 Вт/(м<sup>2</sup>·К), поверхность нагрева 11 м<sup>2</sup>. Габариты: длина 1,6 м, диаметр 0,8 м.

**Испаритель.** Тепловая нагрузка 584 кВт. Греющая среда: технологический газ с расходом 3,33 кг/с. Температуры на входе и на выходе 60 °С и 32 °С, соответственно, давление 10 бар. Количество сконденсированного углеводородного топлива 5,26 т/ч. Нагреваемая среда: кипящая парожидкостная аммиачная смесь с расходом 0,525 кг/с, температурами на входе и на выходе 9,3 °С, давление 6 бар.

Конструкция: трубчатый с конденсацией жидких углеводородов в объеме на внешней оребренной поверхности труб диаметром 20 мм (степень оребрения 7) и кипением аммиака внутри этих труб. Приведенный коэффициент теплопередачи 420 Вт/(м<sup>2</sup>·К). Поверхность нагрева 40 м<sup>2</sup>. Габариты: длина 1,5 м, ширина 0,3 м, высота 2,2 м.

Таблица 3 – Параметры в характерных точках цикла АХУ

№ точки	$t$ , °С	$p$ , бар	$\xi_{\text{NH}_3}$ , кг/кг	$h$ , кДж/кг	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$x$ , кг/кг	$G$ , кг/кг	$G$ , кг/с
1	93,4	20	0,98	1862,14	80,55	1	1,04	0,546
2	49,4	20	1	1711,9	0,065	1	1	0,525
3	49,4	20	1	653,71	0,0018	0	1	0,525
4	33,5	20	1	575,22	0,0018	0	1	0,525
5	9,3	6	1	575,22	10,021	0,094	1	0,525
6	9,3	6	1	1267,34	0,21	1	1	0,525
7	40	6	1	1767,22	0,242	1	1	0,525
8	93,4	20	0,423	643,23	0,0014	0	1,04	0,021
9	179,2	20	0,113	1136,3	1,197	0	1,397	0,733
10	97,3	20	0,113	749,08	1,1	0	1,397	0,733
11	97,3	6	0,113	749,08	1,1	0	1,397	0,733
12	94,1	6	0,23	678,3	0,0012	0	1,397	0,733
12'	94,1	6	0,907	2001,8	287,3	1	0,896	0,47
12''	94,1	6	0,423	1174,13	107,4	0,374	2,397	1,258
13	50	6	0,483	417,56	0,0013	0	2,397	1,258
14	50	20	0,483	417,56	0,0013	0	2,397	1,258
15	93,4	20	0,483	643,23	0,0014	0	2,397	1,258

Таблица 4 – Показатели термодинамической эффективности схемы АХУ

Наименование показателя	Размерность	Численное значение
Конечная температура охлаждения технологического газа	°С	32
Конечная температура утилизируемых продуктов сгорания	°С	100
Количество получаемого жидкого углеводородного топлива	т/ч	5,26
Холодопроизводительность установки	кВт	584
Количество утилизированного тепла	кВт	1027
Тепловой коэффициент	-	0,57
Тепло, отводимое в конденсаторе	кВт	554,5
Тепло, отводимое в абсорбере	кВт	952,0
Тепло, отводимое в дефлегматоре	кВт	104,5
Тепловая нагрузка теплообменника растворов	кВт	284,0
Тепловая нагрузка охладителя жидкости	кВт	42,3
Расход хладагента	т/ч	1,89
Мощность насоса в цикле АХУ	кВт	2,8
Расход охлаждающей воды	т/ч	276,2
Мощность насоса охлаждающей воды	кВт	4,8

**Теплообменник растворов.** Тепловая нагрузка 284 кВт. Греющая среда: слабый водоаммиачный раствор с концентрацией аммиака 0,113 кг/кг, расходом 2,64 т/ч, температуры на входе и на выходе 179,2 °С и 97,3 °С, соответственно, давление 20 бар. Нагреваемая среда: крепкий водоаммиачный раствор с концентрацией аммиака 0,483 кг/кг, расходом 1,258 кг/с, температуры на входе и на выходе 50 °С и 93,4 °С, соответственно, давление 20 бар.

Конструкция: трубчатый противоточный с нагревом крепкого раствора на наружной поверхности труб диаметром 10 мм. Коэффициент теплопередачи 500 Вт/(м<sup>2</sup>·К), поверхность нагрева 9 м<sup>2</sup>. Габариты: длина 1 м, диаметр 0,4 м.

**Охладитель жидкости.** Тепловая нагрузка 42,3 кВт. Греющая среда: жидкий аммиак с расходом 0,525 кг/с, температуры на входе и на выходе 49,4 °С и 33,5 °С, соответственно, давление 20 бар. Нагреваемая среда: перегретый пар аммиака с расходом 0,525 кг/с, температуры на входе и на выходе 9,3 °С и 40 °С, соответственно, давление 6 бар.

Конструкция: трубчатый противоточный с нагревом пара на наружной поверхности оребренных труб диаметром 15 мм (степень оребрения 7). Приведенный коэффициент теплопередачи 210 Вт/(м<sup>2</sup>·К), поверхность нагрева 16 м<sup>2</sup>. Габариты: длина 1 м, диаметр 0,7 м.

Полученные выше данные позволяют провести сопоставление основных технических показателей

ПЭХУ и АХУ применительно к цели охлаждения технологического углеводородного газа.

## 5. Результаты технического анализа технических показателей ПЭХУ и АХУ

Результаты сопоставления показателей сведены в таблице 5.

Анализ результатов в таблице 5 показал, что получение большего количества жидкого углеводородного топлива в варианте с АХУ (при примерно равных тепловых коэффициентах в обоих типах установок) связано с:

1) возможностью более глубокого охлаждения технологического газа (температура кипения аммиака в испарителе АХУ равна 9 °С, в то время как в испарителе ПЭХУ вода кипит при 25 °С);

2) возможностью более глубокой утилизации продуктов сгорания (до 100 °С) ввиду переменности температуры кипения водоаммиачного раствора в парогенераторе АХУ;

3) меньшие суммарные поверхности нагрева теплообменного оборудования (на 25%) в АХУ, несмотря на большее количество теплообменных аппаратов, это связано с отводом теплоты к охлаждающей воде не только в конденсаторе, как это имеет место в ПЭХУ, но и в абсорбере и дефлегматоре, осуществляющийся при больших, чем в конденсаторе, температурных напорах.

Таблица 5 – Основные технические показатели ПЭХУ и АХУ

Наименование показателя	Единицы измерения	Численные значения	
		ПЭХУ	АХУ
Конечная температура охлаждения технологического газа	°С	35	32
Конечная температура утилизируемых уходящих газов	°С	144	100
Количество получаемых жидких углеводородов	т/ч	4,31	5,26
Холодопроизводительность установки	кВт	500	584
Тепловой коэффициент установки	-	0,58	0,57
Расход хладагента	т/ч	0,75	1,78
Мощность насоса в цикле установки	кВт	0,15	2,8
Мощность насоса охлаждающей воды	кВт	4,1	4,8

Таблица 5 (окончание)

Наименование показателя		Единицы измерения	Численные значения	
			ПЭХУ	АХУ
Парогенератор	Тепловая нагрузка	кВт	862	1027
	Коэффициент теплопередачи	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	280	286
	Поверхность нагрева	м <sup>2</sup>	58	71
	Габариты	м	1,6×1,6×2,5	2,5×2,4
Испаритель	Тепловая нагрузка	кВт	500	584
	Коэффициент теплопередачи	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	420	420
	Поверхность нагрева	м <sup>2</sup>	60	40
	Габариты	м	1,8×0,5×2,2	1,5×0,5×2,2
Конденсатор	Тепловая нагрузка	кВт	1362	554,5
	Коэффициент теплопередачи	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	972	1000
	Поверхность нагрева	м <sup>2</sup>	258	80
	Габариты	м	2×1,3	1,5×1,2
Абсорбер	Тепловая нагрузка	кВт	-	952
	Коэффициент теплопередачи	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	-	500
	Поверхность нагрева	м <sup>2</sup>	-	76
	Габариты	м	-	1,6×1,5
Теплообменник	Тепловая нагрузка	кВт	-	284
	Коэффициент теплопередачи	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	-	500
	Поверхность нагрева	м <sup>2</sup>	-	9
	Габариты	м	-	1×0,4
Охладитель жид-кости	Тепловая нагрузка	кВт	-	42,3
	Коэффициент теплопередачи	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	-	210
	Поверхность нагрева	м <sup>2</sup>	-	16
	Габариты	м	-	1×0,7
Эжекторная группа	Количество эжекторов	шт.	6	-
	Расход рабочего пара на один эжектор	т/ч	2,05	-
	Коэффициент эжекции	т/ч	0,625	-
	Габариты одного эжектора	м	1,7×0,3	-
Суммарная тепловая нагрузка теплообменного оборудования		кВт	2724	3548,3
Суммарная поверхность нагрева теплообменного оборудования		м <sup>2</sup>	376	303
Суммарный расход охлаждающей воды		т/ч	233,5	276,2
Суммарная мощность насосов		кВт	4,25	7,6

## 6 Выводы

При охлаждении технологического газа для получения из него жидкого углеводородного топлива с помощью парэжекторной и абсорбционной холодильных установок технические показатели АХУ (возможность более глубокого охлаждения газа, большее количество получаемого топлива, меньшие суммарные поверхности нагрева теплообменных аппаратов) несколько выше (на 20 – 25 %), чем ПЭХУ.

Тем не менее, ввиду определенной сложности АХУ (большее число элементов оборудования, более высокий уровень давлений 6 – 20 бар, применение более агрессивного хладагента – аммиака) окончательный выбор типа холодильной установки для этих целей может быть сделан, исходя из условий и возможностей конкретного производства.

## Литература

1. **Касаткин, А. Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии. [Текст] / А.Г. Касаткин. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.
2. **Варгафтик, Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей [Текст] / Н.Б. Варгафтик. – М: Наука, 1972. – 720 с.
3. **Павлович, Н.В.** Справочник по теплофизическим свойствам природных газов и их компонентов [Текст] / Н.В. Павлович. – М-Л: Госэнергоиздат, 1962. – 120 с.
4. **Мааке В.** Учебник по холодильной технике [Текст] / В. Мааке, Г.Ю. Эккерт, Ж.Л. Кошпен. – М.: Изд-во Московского университета, 1998. – 1142 с.
5. **Ривкин, С.Л.** Термодинамические свойства воды и водяного пара: Справочник [Текст] / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. Рек. Гос. службой стандартных справоч-

ных данных, 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 80 с.

6. Справочник по теплообменникам: в 2-х т. Т.1 [Текст]. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 560 с.

7. **Бадылькес, И.С.** Абсорбционные холодильные машины [Текст] / И.С. Бадылькес, Р.Л. Данилов. – М.: 1966. – 356 с.

8. **Богданов, С.Н.** Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справочник [Текст] / С.Н. Богданов, С.И. Бурцев, О.П. Иванов, А.В. Куприянова / Под ред. С. Н. Богданова. 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: СПбГАХИПТ, 1999. – 320 с.

Отримана в редакції 07.11.2017, прийнята до друку 08.12.2017

## Analysis of the Prospects for the Use of Steam-Jet and Absorption Refrigeration Units for Technological Gas Cooling and Liquid Hydrocarbon Fuel Producing

*A. Titlov*<sup>1</sup>✉, *T. Sahala*<sup>2</sup>, *V. Artiukh*<sup>3</sup>, *T. Diachenko*<sup>4</sup>

Odesa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatna str., Odesa, 65039, Ukraine

ORCID: <sup>1</sup> 0000-0003-1908-5713, <sup>2</sup> 0000-0003-3569-7920, <sup>3</sup> 0000-0002-1751-7933, <sup>4</sup> 0000-0001-9275-187X

✉ e-mail: [titlov1959@gmail.com](mailto:titlov1959@gmail.com)

*A numerical comparative analysis of the scopes of heat-using steam-jet (SJRU) and absorption water-ammonia (ARU) refrigeration units working with exhausted heated gas streams is carried out for a standard oil refinery complex. It was assumed that the temperature level during artificial cooling would allow the condensate of hydrocarbon fractions of n-butane and n-pentane to be obtained. As a result of the calculations are determined: the temperature of the process gas cooling termination; the temperature of combustion products cooling termination; parameters in the characteristic points of thermodynamic cycles; cooling capacity and thermal coefficient; heat load of heat exchangers and of circulating pumps power; heating surfaces and dimensions of heat exchange equipment; dimensions of the ejector group of the SJRU. It is shown that the engineering parameters of the ARU (the scope of deeper gas cooling, the greater amount of fuel produced, and the smaller total heating surfaces of heat exchangers) are 20 to 25% higher than the SJRU.*

**Keywords:** Utilization of Waste Heat; Heat-Using Refrigerating Machines; Steam-Jet; Absorption; Water-Ammonia; Comparative Analysis of Design Cycles

### References

1. **Kasatkin, A.G.** (2004) Osnovnye protsessy i apparaty himicheskoi tekhnologii. Moscow, 753 p. (in Russian)

2. **Varhaftik, N.B.** (1972) Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkostei. Moscow, Nauka, 720 p. (in Russian)

3. **Pavlovich, N.V.** (1962) Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam prirodnykh gazov i ikh komponentov. M-L, Gosenergoizdat, 120 p. (in Russian)

4. **Maake, V., Ekkert, G.U., Kopshen, Zh.K.** (1998) Uchebnik po kholodilnoi tekhnike. Moscow, 1142 p. (in Russian)

5. **Rivkin, S.L., Aleksandrov, A.A.** (1984) Termodinamicheskie svoistva vody i vodianoho para: Spravochnik. Moscow, Energoizdat, 80 p. (in Russian)

6. Spravochnik po teploobmennikam (1987). Moscow, Energoizdat, 560 p. (in Russian)

7. **Badylkes, I.S., Danilov, R.L.** (1966) Absorbtsionnye kholodilnye mashiny. Moscow, 356 p. (in Russian)

8. **Bohdanov, S.N., Burtsev, S.I., Ivanov, O.P., Kupriianova, A.V.** (1999) Kholodilnaia tekhnika. Konditsionirovanie vozdukha. Svoistva veschestv: Spravochnik. SPb., 320 p. (in Russian)

Received 07 November 2017

Approved 08 December 2017

Available in Internet 23 December 2017