

УДК 621.438

Об экономической эффективности утилизации жидких промышленных отходов*Канд. техн. наук* **Рахманов Ю.А.** rahmanovua2010@gmail.com*Канд. техн. наук* **Сергиенко О.И.** oisergienko@corp.ifmo.ru**Дмитриева А.П.** dmitrysangel@mail.ru

Университет ИТМО

191002, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Рассмотрены вопросы повышения энергетической эффективности технологий термической дистилляции для утилизации жидких промышленных отходов в местах их образования при использовании тепловых насосов. Анализируются технологические схемы термической дистилляции с использованием встроенных тепловых насосов с разомкнутым контуром, работающих на водяном паре, и с замкнутым контуром, работающих на холодильном агенте R407c. Приводится расчетная методика для определения показателей энергоэффективности технологий термической дистилляции с применением встроенных тепловых насосов: коэффициент трансформации тепла, удельный расход электрической энергии, экономия условного топлива в замещаемых котельной и электростанции. Результаты анализа удельного потребления электроэнергии на очистку жидких отходов и других технико-экономических показателей установок термической дистилляции малой производительности по обезвреживаемым жидким отходам показывают, что они не уступают известным зарубежным аналогам. Полученные расчетные показатели могут быть использованы для идентификации наилучших доступных технологий утилизации жидких промышленных отходов с применением тепловых насосов.

Ключевые слова: экономия условного топлива, энергоэффективность, наилучшая доступная технология (НДТ), термическая дистилляция, тепловой насос, рабочее тело, жидкие промышленные отходы.

DOI: 10.17586/2310-1172-2019-12-4-185-195

On the economic efficiency of liquid industrial waste utilization using heat pumps*Ph.D.* **Rakhmanov Y.A.** rahmanovua2010@gmail.com*Ph.D.* **Sergienko O.I.** oisergienko@corp.ifmo.ru**Dmitrieva A.P.** dmitrysangel@mail.ru

ITMO University

191002, Russia, St. Petersburg, ul. Lomonosov, 9

The issues of increasing the energy efficiency of thermal distillation technologies for the disposal of industrial liquid waste in the places of their formation when using heat pumps are considered. Technological schemes of thermal distillation using built-in heat pumps with open loop, working on water vapor, and with a closed loop working on refrigerant R407c are analyzed. A calculation method is given for determining the energy efficiency indicators of thermal distillation technologies using built-in heat pumps: heat transformation coefficient, specific consumption of electric energy, saving equivalent fuel in a replaced boiler house and power plant. The results of the analysis of the energy efficiency of thermal distillation of low-capacity plants for neutralized liquid waste show that they are not inferior to the known foreign counterparts in terms of energy efficiency. The calculated indicators can be used to identify the best available techniques for liquid industrial waste utilization using heat pumps.

Keywords: standard fuel economy, energy efficiency, best available technique (BAT), thermal distillation, heat pump, working fluid, liquid industrial waste.

Введение. Особенности технологии термической дистилляции жидких отходов

Одной из задач современного производства является рациональное использование природных энергетических и материальных ресурсов и предотвращение загрязнения окружающей среды производственными отходами путем разработки, создания и внедрения малоотходных энергосберегающих технологий и производств [1].

Практически в любой отрасли промышленности образуются жидкие отходы (сточные воды), представляющие собой смесь жидкой составляющей - воды и различных растворителей с загрязняющими веществами в виде суспензий или эмульсий, подлежащие очистке с последующим повторным использованием или утилизацией. Для этого применяются различные методы очистки: механическая фильтрация, адсорбция, обратный осмос и др [2, 3, 4, 5, 6]. Одним из широко применяемых и освоенных методов является термическая дистилляция [3, 4, 5], при которой процесс очистки заключается в испарении жидкой составляющей с последующей конденсацией образующихся паров. Так как температуры кипения для разных жидкостей, в том числе загрязняющих веществ, различны, то происходит разделение жидких многокомпонентных отходов на отличающиеся по составу фракции путем частичного испарения смеси и конденсации образующихся паров. В результате получают очищенную воду или растворитель, которые могут использоваться повторно, и концентрированный остаток загрязняющих веществ для последующей регенерации или утилизации [4, 5].

При очистке жидких радиоактивных отходов применение термической дистилляции в отличие от других методов позволяет очистить конденсат от радионуклеидов, находящихся в любой форме, до допустимых концентраций. Отсутствие жестких требований к качеству отходов, поступающих на дистилляцию, позволяет упростить или исключить применение специальных подготовительных операций. Полученный концентрат затем подлежит размещению в специальных могильниках [4].

Достоинствами термической дистилляции жидких отходов являются надежная очистка от различных загрязнений, отсутствие необходимости в использовании химических реагентов и соответствующие затраты на расходные материалы, высокая конечная концентрация остатков, что позволяет их повторно использовать, например, как отходы гальванических производств, и снижать затраты на последующую утилизацию. Дистиллят может быть повторно использован в технологических процессах, например, в замкнутой водооборотной системе, где потребление технической воды снижается до 70-80% [2].

Недостатком термической дистилляции являются возможные отложения солей загрязняющих веществ на теплообменной поверхности в виде накипи и значительный расход энергии на осуществление процессов нагрева и испарения жидких отходов. Кроме того требуется расход холодной воды или воздуха для отвода теплоты конденсации паров дистиллята.

Избежать отложения солей, а также термического разложения, возможного испарения компонентов загрязнений можно создавая глубокий вакуум в испарителе и снижая температуру испарения до 50°C и ниже [6]. Для снижения расхода энергии применяют многоступенчатые выпарные (испарительные) установки, в которых вторичный пар предыдущей ступени используется в качестве греющего пара для испарения воды в последующей ступени. С увеличением числа ступеней снижается расход энергии, сложнее становится установка, увеличивается теплообменная поверхность и соответствующие капитальные затраты, что не соответствует принципам наилучших доступных технологий (НДТ) [7,8].

Возможность повышения энергетической эффективности технологий термической дистилляции для утилизации жидких промышленных отходов при использовании тепловых насосов

Сокращение энергопотребления при обращении с промышленными сточными водами за счет применения энергетически зависимой дистилляции относится к наилучшим доступным технологиям на крупных предприятиях [2].

Одним из эффективных методов существенного снижения энергетических затрат на термическую дистилляцию жидких отходов является применение парокompрессионных тепловых насосов, позволяющих трансформировать теплоту конденсации паров жидкой составляющей отходов в теплоту, необходимую для нагрева и испарения жидких отходов, за счет существенного меньшего подвода первичной энергии (в 2 - 3 и более раз) [9].

Применение тепловых насосов с открытым пароводяным контуром позволяет использовать в качестве рабочего тела непосредственно жидкую составляющую отходов, в частности, обладающую высокими термодинамическими показателями и экологически безопасную воду [10].

В отличие от тепловых насосов, применяемых для отопления и горячего водоснабжения, в данном случае встраиваемые в технологию термической дистилляции тепловые насосы работают при малой разности температур конденсации и кипения 4 – 15°C, необходимой только для преодоления термического сопротивления

теплопередачи от конденсирующегося пара к кипящей жидкости и температурной депрессии. Поэтому коэффициент преобразования теплового насоса оказывается достаточно высоким.

Теоретические и экспериментальные исследования в этом направлении в области опреснения соленой морской воды проводятся на кафедре техники низких температур Московского политехнического университета [11, 12, 13].

В компрессорах тепловых насосов дистилляторов должен отсутствовать контакт рабочего тела со смазочным маслом. Этому условию отвечают роторные компрессоры типа Рутс, винтовые и центробежные компрессоры [14].

С учетом изложенного на базе центробежных компрессоров АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» и АО «СвердНИИХиммаш» проектируют и производят опреснительные установки средней производительности типа «Каскад» и «ДОУ-МК»; фирма Norland – опреснители серии VC; на базе компрессора Рутс компания ООО «БМТ» производит теплонасосные дистилляционные установки типа ЭСВА; фирма KEMET поставляет теплонасосные дистилляционные установки типа H₂O GmbH серии VACUDEST (Германия); фирма LOFT Anlagenbau GmbH – системы утилизации и регенерации жидкости DESTUMAT модели WLE, компания Veolia Halia – теплонасосные дистилляторы EVALED серии RV [15 - 22].

Недостатком воды в качестве рабочего тела компрессорных тепловых насосов является низкая плотность водяного пара, соответственно, низкая удельная объемная теплота испарения, что требует применения мощных пароводяных компрессоров и усложняет их конструкцию. Это особенно проявляется при низких температурах и давлениях испарения, позволяющих избежать отложения солей на теплообменной поверхности дистиллятора, возможного термического разложения загрязнений жидких отходов, а также осуществлять процесс концентрации разлагающихся при высокой температуре продуктов биотехнологии и фармацевтики. Применение воды в качестве рабочего тела теплонасосных дистилляторов целесообразно в области температур 90 – 150°C.

В области более низких температур 30 – 40°C целесообразно применение в дистилляторах тепловых насосов с замкнутым контуром, работающих на низкокипящих экологически безопасных и энергоэффективных рабочих телах [13].

Так на основе тепловых насосов с замкнутым контуром компания ООО «Чистые технологии» производит вакуум-выпарные аппараты типа ДСЦ, работающие при температуре испарения 30 – 40°C; фирма Miba Gleitlager GmbH – типа Schell ECOPRYMA; компания Industrial Waters Evaporators (I.W.E.) – типа HP ME [23,24,25].

В таблице 1 приведены технико-экономические показатели компрессорных теплонасосных дистилляторов средней и малой производительности, которые находят применение не только для опреснения морской воды, но и для утилизации жидких промышленных отходов.

Таблица 1

Технико-экономические показатели компрессорных теплонасосных дистилляторов средней и малой производительности

Модель, тип дистиллятора	Выход дистиллята, л/ч	Тип компрессора	Рабочее тело	Температура кипения воды, °C	Удельное потребление энергии, кВт*ч/ м ³
НПЦ «Салют», «Каскад»	(1 - 50)*10 ³	Центробежный	Вода	90 – 100	10 – 7,5
ОАО «СвердНИИХиммаш», ДОУ-МК	(1 – 25)*10 ³	Центробежный	Вода	90 – 100	8-9
ООО «БМТ», ЭСВА	30 – 1000	Рутс	Вода	80 – 90	110 – 100
H ₂ O GmbH XS системы VACUDEST	30 – 60	Рутс	Вода	80 – 90	80
GmbH WLE системы Destimat	30 - 12500	Рутс	Вода	80 – 90	93 – 12,8
EVALED RV	400 – 5000	Рутс	Вода	80 – 90	50 – 30
Norland серии VC	200 – 900	Центробежный	Вода	80 – 90	50 – 30
ДСЦ-10, ООО «Чистые технологии»	10 – 500	Поршневой	Фреон	30 – 40	160
ECOPRIMA серия K, Schell	10,5 – 380	Поршневой	Фреон	30 – 40	120 – 80
I.W.E. HP (25-1000) ME	25 – 1000	Поршневой	Фреон	30 – 40	160

Выбор энергоэффективной технологии и соответствующего оборудования для термической дистилляции и концентрирования жидких отходов зависит от их состава, количества, концентрации загрязнений и назначения.

На рис. 1 представлены принципиальные технологические схемы термической дистилляции и концентрирования жидких отходов с использованием тепловых насосов с разомкнутым (рис. 1а) и замкнутым контурами (рис. 1б).

В первой схеме рабочим телом для теплового насоса является чаще всего водяной пар жидкой составляющей отходов, получаемый путем ее испарения за счет подвода теплоты конденсации, во второй схеме – низкокипящие экологически безопасные рабочие тела.

Принципиальная схема технологии термической дистилляции жидких отходов с использованием теплового насоса с разомкнутым контуром (рис. 1а) включает в себя выпарной аппарат (ВА) в виде испарителя – конденсатора (ИК), в котором происходит испарение жидкой составляющей отходов (ЖО) за счет подвода теплоты конденсации полученного при этом пара (П). Подаваемые насосом (Н) жидкие отходы проходят через регенеративный теплообменник (РТ), где осуществляется их предварительный подогрев, и поступают в выпарной аппарат (ВА), где под давлением (P_u) и соответствующей ему температуре (t_u) происходит испарение жидкой составляющей жидких отходов. Образующийся при этом пар (П) поступает в механический компрессор (КМ), приводимый в движение двигателем (Дв). В компрессоре (КМ) осуществляется повышение давления пара от давления в испарителе (P_u) до давления конденсации (P_k), которому соответствует температура конденсации (t_k). Из компрессора (КМ) пар под давлением (P_k) направляется в поверхностный теплообменник – конденсатор, расположенный внутри выпарного аппарата (ВА), и конденсируется при давлении (P_k) и соответствующей ему температуре (t_k). Выделяющаяся при этом теплота при температуре (t_k) больше температуры испарения (t_u) подводится к поступившим в выпарной аппарат жидким отходам и обеспечивает их испарение и получение пара. Образующийся при конденсации пара конденсат (К), представляющий собой очищенную жидкую составляющую отходов (ЖО), откачивается вакуумным насосом (ВН) через теплообменник (РТ) на повторное использование или к потребителю. Получаемый после выпаривания жидкой составляющей концентрат загрязняющих веществ (K_u) откачивается соответствующим вакуумным насосам (ВН) на последующую рекуперацию или утилизацию [5,7].

Принципиальная схема технологии термической дистилляции жидких отходов с использованием теплового насоса с замкнутым контуром (рис. 1б) представляет собой сочетание замкнутого контура низкокипящего рабочего тела (холодильного агента (X)) теплового насоса (внутренний контур схемы) и разомкнутого контура дистилляции жидких отходов (ЖО) – наружный контур схемы. Она включает в себя выпарной аппарат (ВА), представляющий собой сочетание двух поверхностных аппаратов: испаритель-конденсатор (И - К), где происходит испарение низкокипящего рабочего тела (холодильного агента) за счет подвода теплоты конденсации пара (П) жидкой составляющей отходов (ЖО), и конденсатор - испаритель (К – И), где происходит конденсация паров холодильного агента (X) за счет отвода теплоты конденсации для испарения жидкой составляющей отходов (ЖО).

Работа замкнутого контура теплового насоса осуществляющим образом: в зоне испарения жидкого холодильного агента (XЖ) аппарата испаритель – конденсатор (И – К) при температуре (t_0) ниже температуры конденсации паров (П) жидкой составляющей (t_k) ($t_0 = t_k - \Delta t$), и соответствующему ей давлению (P_0) происходит испарение жидкого холодильного агента (XЖ). Образующиеся при этом пары холодильного агента (XП) поступают в компрессор (КМ), в котором происходит повышение давления паров холодильного агента (XП) от давления (P_0) до давления конденсации паров холодильного агента (XП) в зоне их конденсации (P_x) в аппарате конденсатор – испаритель (К – И), соответствующего температуре конденсации паров холодильного агента ($t_{кx}$) жидкой составляющей отходов (ЖО) ($t_{кx} = t_u + \Delta t$). Образующийся при этом жидкий холодильный агент (XЖ) проходит через переохладитель (ПО) и регулирующий вентиль (РВ), в котором его давление снижается от давления в зоне конденсации ($P_{кx}$) до давления в зоне испарения (P_0), и поступает в зону испарения аппарата испаритель – конденсатор (И – К).

Рассмотренные энергоэффективные технологии термической дистилляции жидких отходов с использованием тепловых насосов позволят снизить капитальные затраты на дорогостоящие антикоррозийные материалы, отложение солей на теплообменные поверхности аппаратов, осуществлять дистилляцию жидких отходов биологических производств, содержащих вещества, разлагающиеся при высокой температуре, существенно снизить энергетические затраты на осуществление процесса дистилляции и сопутствующие им негативные экологические воздействия.

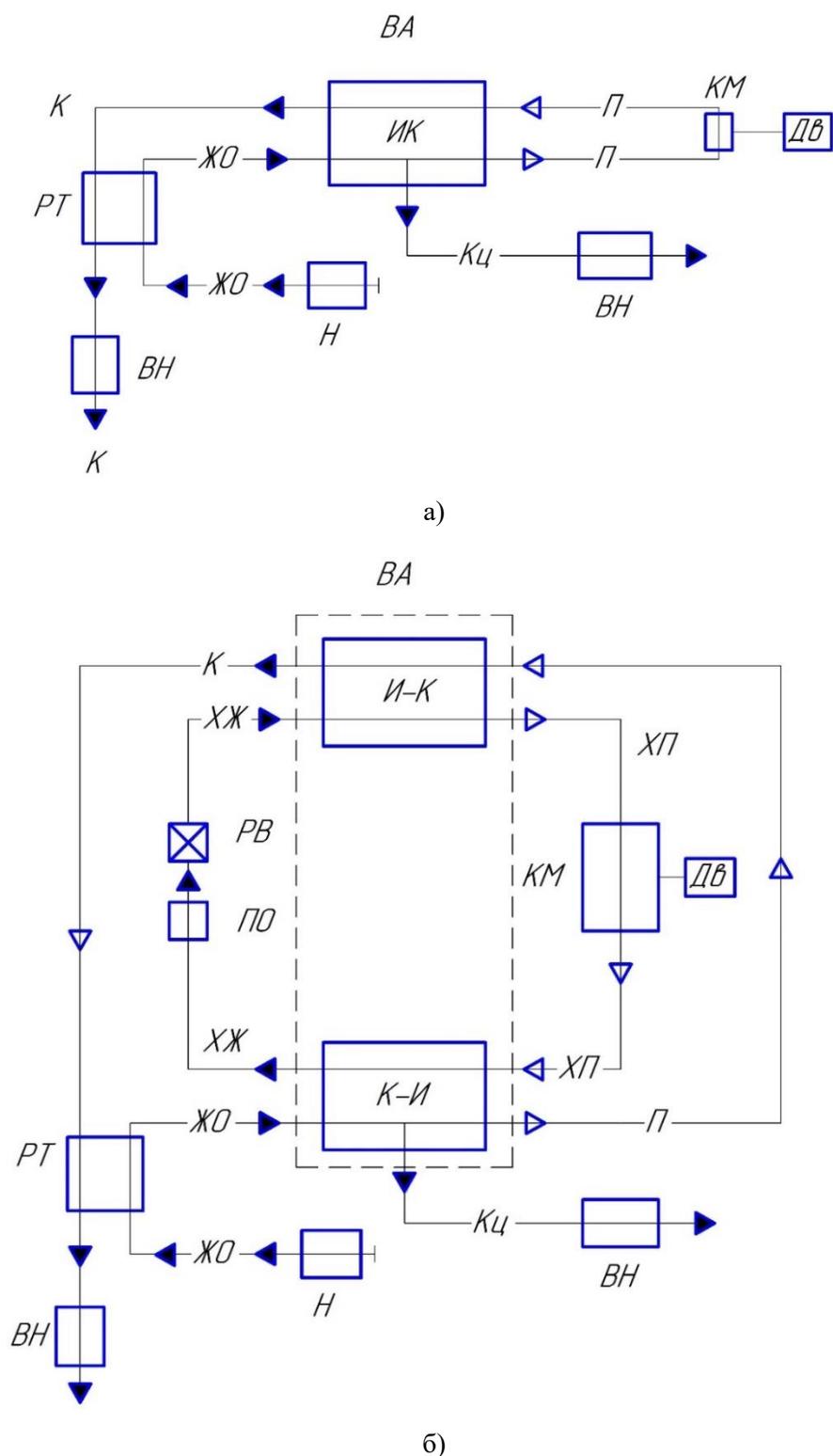


Рис. 1 Энергоэффективные технологии термической дистилляции жидких отходов с использованием тепловых насосов

- а) технология термической дистилляции с тепловым насосом с разомкнутым контуром
 б) технология термической дистилляции с тепловым насосом с замкнутым контуром
 ЖО – жидкие отходы; водяной пар - П; ВА – выпарной аппарат; КМ – компрессор механический;
 РТ – регенеративный теплообменник; ВН – вакуумный насос; Н – насос; Дв – двигатель;
 Кц – концентрат; К – конденсат (водяной); И-К – испаритель-конденсатор; холодильный агент X;
 К-И – конденсатор-испаритель; РВ – регулирующий вентиль; ПО – переохладитель

При разработке данных технологических схем может быть использован опыт внедрения компрессорных теплоносных дистилляторов, приведенных в табл.1 компании «Корса», проектирующей и изготавливающей высокотемпературные (65°C) и среднетемпературные (55°C) тепловые насосы, работающие на экологически безопасных холодильных агентах R410A, R407c на базе компрессорного оборудования «Copeland» производства Германии и Ирландии, а также теоретические и экспериментальные исследования, выполненные Малафеевым И.И., Ильиным Г.А., Жернаковым А.С. под руководством и при непосредственном участии д.т.н. проф. Калнина И. М. и Маринюка Б.Т. [26, 10 - 13].

Методика выбора НДТ на основе оценки энергетической эффективности технологии термической дистилляции жидких отходов с использованием тепловых насосов

Для выбора наилучшей доступной технологии и оценки энергетической эффективности применения термической дистилляции жидких отходов с использованием тепловых насосов были выполнены расчеты технологических схем с использованием теплового насоса с разомкнутым контуром, работающим на пароводяном рабочем теле, и с замкнутым контуром, работающим на экологически безопасном низкокипящем рабочем теле R407c.

Расчеты выполнены для компрессорного теплоносного дистиллятора малой производительности, предназначенного для очистки жидких отходов в местах их образования с последующим повторным использованием жидкой составляющей (вода) и утилизацией концентрированного остатка.

В качестве жидких отходов была принята промывочная вода с содержанием растворенных в промывочной воде солей и кислот 0,05 г/л, в кубовом остатке (концентрате) – 100 г/л. Производительность дистиллятора составляет 1000 л/сутки, при суточной продолжительности непрерывной работы аппарата 20 ч и плотности жидких отходов 1000 кг/м³, массовая часовая производительность дистиллятора составит:

$$G_{\text{жО}} = \frac{1000}{20} = 50 \text{ кг/ч}$$

Массовый расход испаряемой воды составляет:

$$W = G_{\text{н}} - G_{\text{к}} = G_{\text{н}} * \left(1 - \frac{x_{\text{н}}}{x_{\text{к}}}\right) = 49,974 \text{ кг/ч} = 0,0139 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

где $G_{\text{н}}, G_{\text{к}}$ – массовые расходы исходных жидких отходов и концентрата, кг/с; $x_{\text{н}}, x_{\text{к}}$ – массовые доли загрязняющих веществ в жидких отходах и концентрате. ($x_{\text{н}} = 4,67 * 10^{-3}; x_{\text{к}} = 0,0909$). Во избежание отложения солей загрязняющих веществ на теплообменной поверхности аппарата была принята температура испарения жидких отходов $t_{\text{и}} = 30^{\circ}\text{C}$, которой соответствует давление в зоне испарения $P_{\text{и}} = 4,247 \text{ кПа}$. Для этих условий тепловой поток, необходимый для выпаривания составил:

$$Q = G_{\text{н}} * c_{\text{н}} * (t_{\text{и}} - t_{\text{н}}) + W(h_{\text{н}} - c_{\text{в}} * t_{\text{и}}) + Q_{\text{пот}} = 34,45 \text{ кВт}$$

где $c_{\text{н}}, c_{\text{в}}$ – удельная теплоемкость жидких отходов и воды, кДж/(кг °C); $t_{\text{н}}$ – температура жидких отходов веществ на входе в аппарат, °C; $h_{\text{н}}$ – удельная энтальпия водяного пара, выходящего из зоны испарения, кДж/кг; $Q_{\text{пот}}$ – потеря теплоты, кВт (принято 2% от теплового потока выпаривания).

Для обеспечения минимальных затрат на работу механического компрессора теплового насоса с разомкнутым контуром была принята температура конденсации водяного пара $t_{\text{к}} = 40^{\circ}\text{C}$, которой соответствует давление конденсации $P_{\text{к}} = 7,38 \text{ кПа}$.

Зная состояние водяного пара на входе в компрессор, ($t_{\text{и}}, P_{\text{и}}, h_{\text{и}}, S_{\text{и}}$ – энтропия водяного пара), можно определить параметры и характеристики водяного пара на выходе из компрессора при адиабатном повышении давления и рассчитать удельную адиабатную работу компрессора:

$$l_{\text{с}} = h_{2\text{с}} - h_{1}, \text{ кДж/кг}$$

где $h_{2\text{с}}, h_{1}$ – удельная энтальпия водяного пара на входе в компрессор и на выходе из компрессора при адиабатном процессе повышения давления, кДж/кг, ($h_{1} = h_{\text{и}}$).

Внутренняя удельная работа компрессора $l_{\text{i}} = l_{\text{с}} / \eta_{\text{ад}}$, кДж/кг, где $\eta_{\text{ад}}$ – адиабатный КПД компрессора. Тогда энтальпия водяного пара на выходе из компрессора при действительном процессе повышения давления составит:

$$h_2 = h_1 + l_i, \text{ кДж/кг}$$

Тепловой поток водяного пара в конденсаторе и переохладителе:

$$Q_k = W * (h_2 - c_v * t_3), \text{ кВт}$$

где t_3 —температура конденсата на входе из переохладителя °С.

Объемный расход водяного пара на входе в компрессоре

$$V_1 = W * v_1, \text{ м}^3/\text{с}$$

где v_1 — удельный объем водяного пара на входе в компрессор, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Электрическая мощность, потребляемая компрессором:

$$N_э = W * l_i / \eta_{эм}, \text{ кВт}$$

где $\eta_{эм}$ —электромеханический КПД (принят равным 0,8).

Коэффициент трансформации теплоты теплового насоса:

$$\mu = Q_k / N_э$$

Экономия условного топлива:

$$\Delta B = \frac{Q_k * 3600}{Q_{ут} * \eta_{ку}} - \frac{N_э * 3600}{Q_{ут} * \eta_{кж}}, \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

где $Q_{ут}$ — теплота сгорания условного топлива, кДж/кг; $\eta_{ку}$ — коэффициент полезного действия замещаемой котельной (принят равным 0,9); $\eta_{кж}$ —коэффициент полезного действия электрической станции (принят равным 0,37).

При расчете технологической схемы термической дистилляции с применением теплового насоса с замкнутым контуром для обеспечения испарения жидких отходов при температуре $t_u = 30^\circ\text{C}$ и конденсации полученного водяного пара при температуре $t_k = 28^\circ\text{C}$ были приняты температура конденсации холодильного агента в конденсаторе теплового насоса $t_{кх} = 40^\circ\text{C}$ и температура кипения холодильного агента в испарителе теплового насоса $t_0 = 20^\circ\text{C}$. Расчеты работы и мощности, потребляемой компрессором теплового насоса, работающего на холодильном агенте R407с, выполняются аналогично.

Расход холодильного агента:

$$G_x = \frac{Q}{q_{кх}}, \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

где $q_{кх} = h_2 - h_3$, где $q_{кх}$ — удельная теплота конденсации и переохлаждения холодильного агента, кДж/кг; h_2, h_3 — удельная энтальпии холодильного агента на выходе из компрессора и переохладителя, кДж/кг.

Потребляемая электрическая мощность компрессора:

$$N_э = G_x * l_{ix} / \eta_{эм}, \text{ кВт}$$

где l_{ix} - внутренняя удельная работа компрессора, работающего на холодильном агенте, кДж/кг.

Результаты оценки энергетической эффективности и экономии условного топлива технологий термической дистилляции жидких отходов с использованием тепловых насосов

Результаты расчетов основных энергетических характеристик и экономии условного топлива для разомкнутой и замкнутой схем приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительная характеристика технологий термической дистилляции жидких отходов с использованием тепловых насосов

Энергетические характеристики	Размерность	Схема 1а - разомкнутая система		Схема 1б - замкнутая система	
		Вода		R407с	
Рабочее тело	-	Вода		R407с	
Температура и давление испарения жидких отходов	°С	30	30	30	30
	кПа	4,247	4,247	4,247	4,247
Температура и давление конденсации полученного водяного пара	°С	40	40	28	28
	кПа	7,38	7,38	3,8	3,8
Температура и давление кипения холодильного агента	°С	-	-	20	20
	кПа	-	-	0,86	0,86
Температура и давление конденсации холодильного агента	°С	-	-	40	40
	кПа	-	-	1,7	1,7
Адиабатный КПД компрессора	-	0,5	0,8	0,5	0,8
Расход рабочего тела	кг/ч	0,0139	0,0139	0,193	0,199
	м ³ /ч	1644,1	1644,1	-	-
Удельная внутренняя работа	кДж/кг	166,39	104	12	7,5
Потребляемая электрическая мощность компрессора	кВт	2,891	1,887	2,9	1,865
Коэффициент трансформации тепла теплового насоса	-	18,18	19,34	11,7	18,18
Удельный расход электрической энергии	кВт*ч/м ³	57,82	36,14	58	37,3
Экономия условного топлива	кг/ч	3,923	4,165	3,66	4
Удельная теплота конденсации холодильного агента	кДж/кг	-	-	176	170,5
Степень повышения давления в компрессоре	-	1,74	1,74	1,98	1,98

Ожидаемая экономия условного топлива от применения встроенных в технологии термической дистилляции компрессорных тепловых насосов для вакуумного дистиллятора производительностью 50 кг/ч (1 м³/сут) в зависимости от типа теплового насоса и адиабатного КПД компрессора может достигать 3,6÷4,16 кг/ч. При продолжительности работы дистиллятора 8000 ч/год годовая экономия условного топлива в замещаемых теплоэнергетических установках составит 28,8 -33,3 т/год. Такая значительная экономия топлива объясняется достаточно высоким коэффициентом трансформации теплоты встроенного теплового насоса, работающего при малых перепадах температур между источником теплоты и приемником теплоты. Существенное влияние на коэффициент трансформации теплоты теплового насоса оказывает адиабатный КПД компрессора. С увеличением адиабатного КПД от 0,5 (компрессор Рутс) до 0,8 (винтовой компрессор) для разомкнутой схемы коэффициент трансформации увеличивается от 18,18 до 19,34, а для замкнутой системы - от 11,7 до 18,18; экономия условного топлива - от 3,9 до 4,16 кг/ч и от 3,66 до 4 кг/ч, соответственно.

При сравнении удельного потребления электроэнергии и других технико-экономических показателей компрессорных теплонасосных дистилляторов малой производительности (табл.1) с предлагаемыми схемами (табл. 2) видно, что они не уступают зарубежным аналогам. Сокращение удельного расхода электроэнергии на очистку жидких стоков ориентировочно составит до 50-80 кВт-ч/м³. Более точная оценка может быть получена при полном учете энергопотребления на этапе разработки технологической схемы.

Заключение

Рассмотрены две технологические схемы дистиллятора со встроенным тепловым насосом: более простая в конструктивном исполнении схема с разомкнутым контуром, работающая на воде, и более универсальная и конструктивно более сложная с замкнутым контуром на R407с.

Результаты расчетов свидетельствует о возможности существенного повышения энергетической эффективности термической дистилляции жидких промышленных отходов путем применения встроенных

компрессорных тепловых насосов. Полученный концентрат загрязняющих веществ направляется на последующую утилизацию.

Выбор типа компрессорного теплового насоса с разомкнутыми или замкнутым контуром зависит от расхода, состава жидких отходов, требований к технологии и температурному режиму термической дистилляции.

Зная расход водяного пара при выпаривании жидких отходов и требуемую степень повышения давления в компрессоре, можно подобрать типовой компрессор, разработать и реализовать встроенный компрессорный тепловой насос для термического дистиллятора с разомкнутым контуром.

Определив тепловые потоки и температурные режимы, требуемые для обеспечения термической дистилляции жидких отходов, можно подобрать высокотемпературные и среднетемпературные тепловые насосы замкнутого контура, работающие на холодильных агентах R407c, R410A и разработать на их основе встроенные тепловые насосы для более универсальных термических дистилляторов.

Полученные в работе расчетные показатели могут быть использованы для идентификации наилучших доступных энергоэффективных технологий термической дистилляции жидких отходов в местах их образования на промышленных предприятиях с применением тепловых насосов.

Литература

1. Организационно-экономический механизм повышения эффективности функционирования промышленных предприятий [Электронный ресурс]: монография / М.С. Абрашкин [и др.]. – М.: Научный консультант, 2015. – 269 с. – Режим доступа: URL: <https://e.lanbook.com/book/74014>
2. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 8 – 2015. Очистка сточных вод при производстве продукции (товаров), выполнении работ и оказании услуг на крупных предприятиях. [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: http://burondt.ru/NDT/docs/ndt-8/index.html#_Тoc437512514
3. Поваров А. А. Создание замкнутого водооборота и регенерация рабочих ресурсов в гальваническом производстве / Поваров А. А., Павлова В. Ф., Шиненкова Н.А. // Мир гальваники. — 2013. — № 3. — С. 42–47.
4. Свитцов А.А. Мембранная технология очистки жидких радиоактивных отходов /А.А.Свитцов, Б.Е.Рябчиков, С.Б.Хубецо [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: http://www.mediana-filter.ru/vodopodgotovka_membrane_technology.html
5. Судилковский П. С. Сравнительный анализ экономических показателей установок опреснения морской воды методами обратного осмоса и парокомпрессионной дистилляции / П.С. Судилковский, В.П. Вырелкин, Е. П. Панишев, Ю. А. К // ВОДА И ЭКОЛОГИЯ: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ. — 2007. — № 1(30). — С.17–26.
6. Фирсова Л. П. Опыт использования установки очистки сточных вод с вакуумным выпариванием / Фирсова Л. П., Карышев С.Б., Домрачев Р.А., Шишкина С.В // Гальванотехника и обработка поверхности. — 2005. — № 3. — С. 49–51.
7. Сокорнова Т.В., Королёва Е. Б., Сергиенко О. И., Кряжев А.М. Экономические аспекты внедрения НДТ // Экология производства. 2012. № 10. С. 28–36.
8. Reference Document on Economics and Cross-Media Effects. European Commission. Joint Research Centre. Institute for prospective technological studies. July 2006. [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL:http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ecm_bref_0706.pdf
9. Бараненко А. В. Технологии охлаждения в мировой экономике / А. В. Бараненко // Холодильная техника. — 2018. — № 2. — С. 17–21.
10. Chaumon M., Rulliere R., Haberschill P., Berail J.F. Вода как хладагент для нового высокотемпературного теплового насоса // Холодильная техника. - 2012. - № 12. С. 30–35.
11. Маринюк, Б. Т. Вакуумный теплонасосный дистиллятор, особенности работы и расчет / Б. Т. Маринюк, И. И. Малафеев // Холодильная техника. — 2016. — № 3. — С. 42–47.
12. Малафеев, И. И. Разработка и исследование вакуумного теплонасосного дистиллятора / И. И. Малафеев, Б. Т. Маринюк, Г. А. Ильин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2018. — № 9. — С. 24–27.
13. Калнинь, И. М. Физическая модель теплонасосных опреснителей соленой воды / И. М. Калнинь, С. Б. Пустовалов, А. С. Жернаков // Вестник МАХ. — 2010. — № 2. — С. 12–21.
14. ОАО «Вакууммаш» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://www.vacma.ru/>
15. НПЦ газотурбостроения «Салют», ФГУП. Дистилляционные опреснительные установки «Каскад». [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL: <https://www.info@salut.ru>
16. СverdNIIХиммаш. Оборудование для опреснения соленых вод, обессоливания любых вод, водоподготовки для теплосетей, кондиционирование воды. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: [http://sverd.ru/products-and-services/oborudovanie/oborudovanie-dlya-opresneniya-solenyix-vod,-obessolivaniya-lyubyix-vod,-vodopodgotovki-dlya-teplosetej,-kondicionirovanie-vodyi/distillyacionnyie-opresnitelnyie-ustanovki-\(dou\).html](http://sverd.ru/products-and-services/oborudovanie/oborudovanie-dlya-opresneniya-solenyix-vod,-obessolivaniya-lyubyix-vod,-vodopodgotovki-dlya-teplosetej,-kondicionirovanie-vodyi/distillyacionnyie-opresnitelnyie-ustanovki-(dou).html)

17. Norland International [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <https://www.norlandintl.com/>
18. Системы Norland для дистилляции воды [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://www.norlandintl.ru/distill.htm>
19. ООО БМТ [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://zaobmt.com>.
20. ЗАО Кемет. Особенности конструкции системы VACUDEST [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.kemetcom.ru/vdesign.htm>
21. Технические данные системы утилизации и регенерации жидкостей DESTIMAT® WLE [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://www.walger-group.ru/pdf/Destimat/WLE300.pdf>
22. Evaled [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://www.evaled.com/?lang=ru>
23. ООО «Чистые технологии» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://www.vypar.ru/>.
24. Вакуумный выпариватель ECOPRIMA [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <http://www.schell-eurasia.com/models.html>
25. Установка для выпаривания водных растворов Компания I.W.E. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <https://www.iwe-evaporators.com/download/Cat.%20RU.pdf>
26. Тепловые насосы «Корея» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: URL: <https://www.corsaltd.ru/>

References

1. Organizational and economic mechanism for improving the functioning of industrial enterprises [Electronic resource]: monograph / M.S. Abrashkin [et al.]. - M.: Scientific Consultant, 2015.- 269 p. - Access Mode: URL: <https://e.lanbook.com/book/74014>
2. Information and technical reference book on the best available ITS technologies 8 - 2015. Wastewater treatment in the production of products (goods), work and services at large enterprises. [Electronic resource] - Access mode: URL: http://burondt.ru/NDT/docs/ndt-8/index.html#_Toc437512514
3. Povarov A. A. Creation of a closed water circulation and regeneration of labor resources in galvanic production / Povarov A. A., Pavlova V. F, Shinenkova N. A. // World of electroplating. - 2013. - No. 3. - S. 42–47.
4. Svitsov A.A. Membrane technology for liquid radioactive waste treatment / A.A. Svitsov, B. E. Ryabchikov, S. B. Khubetso [Electronic resource]. - Access mode: URL: http://www.mediana-filter.ru/vodopodgotovka_membrane_technology.html
5. Sudilovsky P. S. A comparative analysis of the economic indicators of desalination plants using reverse osmosis and vapor compression distillation methods / P.S. Sudilovsky, V.P. Vyrelkin, E.P. Panishev, Yu.A. K // WATER AND ECOLOGY: PROBLEMS AND SOLUTIONS. - 2007. - No. 1 (30). - S.17–26.
6. Firsova L.P. The experience of using a wastewater treatment plant with vacuum evaporation / Firsova LP, Karyshev SB, Domrachev RA, Shishkina SV // Electroplating and surface treatment. - 2005. - No. 3. - S. 49-51.
7. Sokornova T.V., Koroleva E.B., Sergienko O.I., Kryazhev A.M. Economic aspects of the introduction of BAT // Ecology of production. 2012. No. 10. P. 28–36.
8. Reference Document on Economics and Cross-Media Effects. European Commission. Joint Research Center. Institute for prospective technological studies. July 2006. [Electronic resource] - Access mode: URL: http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/ecm_bref_0706.pdf
9. Baranenko A. V. Cooling technologies in the global economy / A. V. Baranenko // Refrigeration equipment. - 2018. - No. 2. - P. 17–21.
10. Chaumon M., Rulliere R., Haberschill P., Beraïl J.F. Water as a refrigerant for a new high-temperature heat pump // Refrigeration equipment. - 2012. - No. 12. P. 30–35.
11. Marinyuk, B. T. Vacuum heat pump distiller, features of work and calculation / B. T. Marinyuk, I. I. Malafeev // Refrigeration equipment. - 2016. - No. 3. - S. 42–47.
12. Malafeev, I. I. Development and research of a vacuum heat pump distiller / I. I. Malafeev, B. T. Marinyuk, G. A. Ilyin // Chemical and oil and gas engineering. - 2018. - No. 9. - P. 24–27.
13. Kalnin, I. M. Physical model of heat pump desalination of saltwater / I. M. Kalnin, S. B. Pustovalov, A. S. Zhernakov // Bulletin of the MAH. - 2010. - No. 2. - S. 12–21.
14. JSC "Vacuumash" [Electronic resource]. - Access mode: URL: <http://www.vacma.ru/>.
15. SPC gas turbine "Salyut", FSUE. Distillation desalination plants "Cascade". [Electronic resource]. - Access mode: URL: <https://www.info@salut.ru>
16. SverdNIikhimmash. Equipment for desalination of saltwater, desalination of any water, water treatment for heating systems, water conditioning. [Electronic resource]. - Access mode: URL: [http://sverd.ru/products-and-services/oborudovanie/oborudovanie-dlya-opresneniya-solenyix-vod,-obessolivaniya-lyubyix-vod,-vodopodgotovki-dlya-teplosetej,-kondicionirovanie/distillyacionnyie-opresnitelnyie-ustanovki-\(dou\).html](http://sverd.ru/products-and-services/oborudovanie/oborudovanie-dlya-opresneniya-solenyix-vod,-obessolivaniya-lyubyix-vod,-vodopodgotovki-dlya-teplosetej,-kondicionirovanie/distillyacionnyie-opresnitelnyie-ustanovki-(dou).html)
17. Norland International [Electronic resource]. - Access Mode: URL: <https://www.norlandintl.com/>
18. Norland water distillation systems [Electronic resource]. - Access mode: URL: <http://www.norlandintl.ru/distill.htm>

19. BMT LLC [Electronic resource]. - Access mode: URL: <http://zaobmt.com>.
20. ZAO Kemet. Design features of the VACUDEST system [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.kemetcom.ru/vdesign.htm>
21. Technical data of the liquid recovery and recovery system DESTIMAT® WLE [Electronic resource]. - Access mode: URL: <http://www.walger-group.ru/pdf/Destimat/WLE300.pdf>
22. Ehaled [Electronic resource]. - Access mode: URL: <http://www.ehaled.com/?lang=en>
23. LLC "Clean Technologies" [Electronic resource]. - Access mode: URL: <http://www.vypar.ru/>.
24. Vacuum evaporator ECOPRIMA [Electronic resource]. - Access Mode: URL: <http://www.schell-eurasia.com/models.html>
25. Installation for the evaporation of aqueous solutions Company I.W.E. [Electronic resource]. - Access mode: URL: <https://www.iwe-evaporators.com/download/Cat.%20RU.pdf>
26. Heat pumps "Korea" [Electronic resource]. - Access mode: URL: <https://www.corsaltd.ru/>

Статья поступила в редакцию 13.09.2019 г.