

ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ СХЕМНИХ РІШЕНЬ ВОДОАМІАЧНИХ АБСОРБЦІЙНИХ ТЕРМОТРАНСФОРМАТОРІВ

М. І. Радченко, проф., д-р техн. наук,
Є. О. Красільщиков, аспірант

Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв

Анотація. Виконано аналіз термодинамічної ефективності абсорбційних термотрансформаторів (АТТ) різних схем. Показано, що застосування АТТ з регенеративним теплообмінником (РТО) і ректифікацією та АТТ з «перевищенням температур» забезпечує значне підвищення їх теплового коефіцієнта АТТ у порівнянні з АТТ простої схеми без РТО.

Ключові слова: водоаміачний розчин, абсорбційний термотрансформатор, регенерація, перевищення температур, ректифікація, зворотна подача, тепловий коефіцієнт.

Аннотация. Выполнен анализ термодинамической эффективности абсорбционных термотрансформаторов разных схем. Показано, что применение АТТ с регенеративным теплообменником и ректификацией и АТТ с «превышением температур» обеспечивает значительное повышение их теплового коэффициента АТТ по сравнению с АТТ простой схемы без РТО.

Ключевые слова: водоаммиачный раствор, абсорбционный термотрансформатор, регенерація, перевищення температур, ректифікація, дефлегматор, обратная подача, тепловой коэффициент.

Abstract. The thermodynamic efficiency of absorption thermotransformers (ATT) of various schemes has been analyzed. It was shown that the application of ATT with regenerative heat exchanger (RHE) and rectification and ATT with «temperatures excess» provides considerable increasing their thermal coefficient compared with ATT of a simple schema without RHE.

Keywords: water-ammonia solution, absorption thermotransformer, regeneration, temperature exceeding, rectification, dephlegmator, reverse supply, heat coefficient.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Ефективність двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) суттєво залежить від температури повітря на вході турбокомпресорів і води, охолоджуючої наддувне повітря [1]. У той же час відхідні гази ДВЗ мають значний тепловий потенціал. Вочевидь, вельми доцільною була б утилізація скидної теплоти для охолодження циклового повітря ДВЗ у тепловикористовуючих термотрансформаторах.

Серед трансформаторів теплоти в холод найбільше поширення отримали абсорбційні термотрансформатори. Висока ефектив-

ність процесів абсорбції–десорбції та трансформації теплоти в цілому забезпечується застосуванням регенеративних теплообмінників, зворотної подачі, ректифікації та дефлегмації. Термодинамічну ефективність АТТ оцінюють тепловим коефіцієнтом $\xi = Q_0/Q_r$, де Q_0 — холодопродуктивність (теплота, відведена від циклового повітря ДВЗ у випарнику АТТ); Q_r — теплота, що підводиться в генераторі АТТ до киплячого водоаміачного розчину від водяної пари утилізаційного пароводяного котла, відхідних газів або наддувного повітря ДВЗ. Тепловий коефіцієнт ξ залежить від температур кипіння водоаміач-

ного розчину в генераторі T_p , кипіння аміаку T_0 у випарнику і його конденсації T_k .

МЕТОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ є термодинамічний аналіз схемних рішень водоаміачних АТТ з РТО і ректифікацією та АТТ з «перевищенням температур».

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

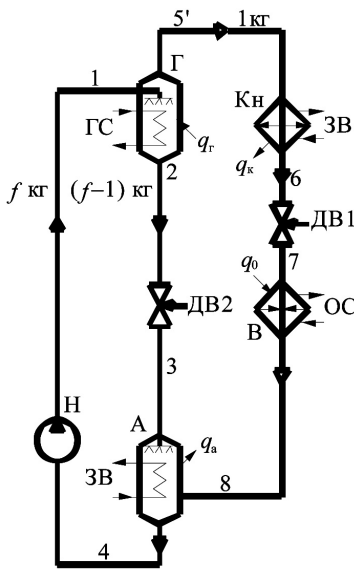
При термодинамічному аналізі АТТ різних схем стан водоаміачного розчину в точках циклу визначали в залежності від концентрації ξ , тиску p та температури T за рівняннями, наведеними в [2]. Вихідні дані наступні: температура гріючого середовища (водяної пари) $T_h = 403$ К; температура кипіння (нижча температура) аміаку у випарнику $T_0 = 273$ К; температура охолоджуючої води $T_w = 298$ К.

Виходячи з цих даних, визначалися температури в характерних точках циклу (рис. 1): температура гарячого слабого розчину після генератора

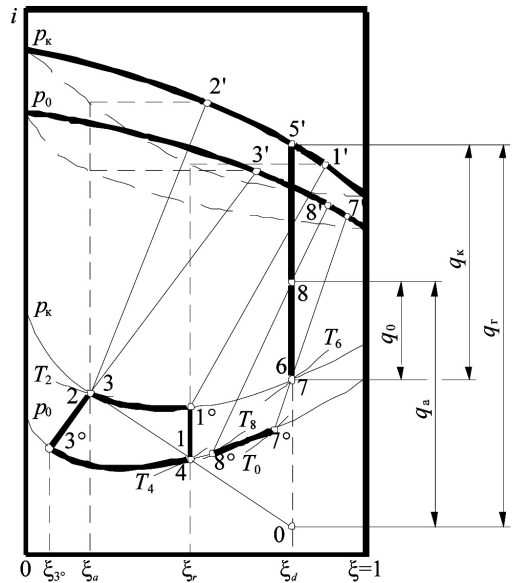
$T_2 = 393$ К (концентрація слабого розчину $\xi_a = 0,27$); вища температура пари аміаку на виході з випарника $T_8 = 278$ К; температури конденсації аміаку в конденсаторі та холодного міцного водоаміачного розчину на виході з абсорбера $T_6 = T_4 = 303$ К (концентрація міцного розчину $\xi_r = 0,53$); температура початку кипіння міцного водоаміачного розчину в генераторі $T_1 = 339$ К; температура початку абсорбції пари, що надходить з випарника, слабким водоаміачним розчином в абсорбері $T_3 = 353$ К; температура пари аміаку (дорівнює середній температурі розчину в генераторі), що надходить до конденсатора, $T'_1 = (T_1 + T_2)/2 = 366$ К (концентрація пари аміаку $\xi_d = 0,95$).

Водоаміачний АТТ без РТО та ректифікації. Схема АТТ простого циклу без РТО та ректифікації зображена на рис. 1, а.

Визначимо вузлові точки та процеси робочого циклу АТТ: т. 1 — стан міцного розчину після насоса; т. 1' — рідина NH_3 у насиченому стані; т. 1' — стан пари NH_3 на



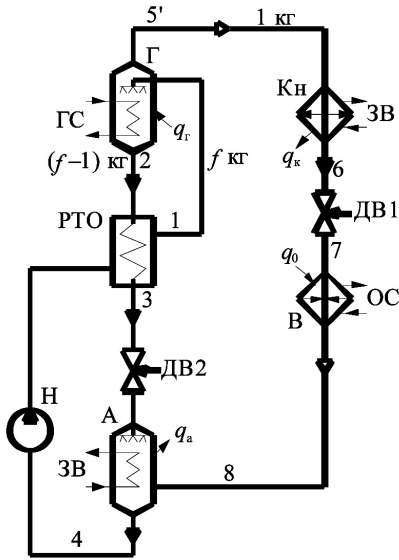
а



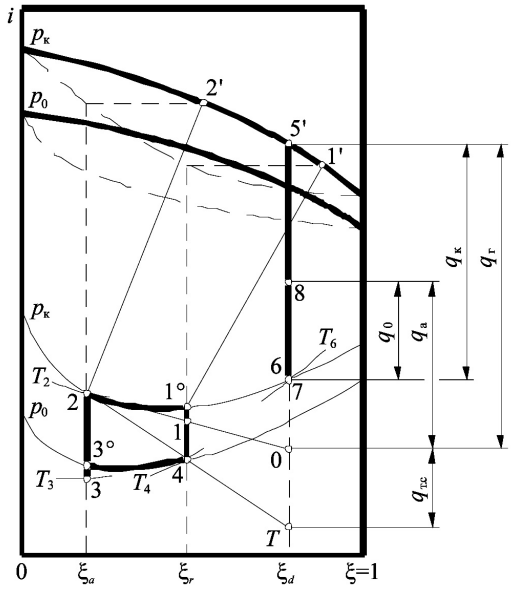
б

Рис. 1. Схема (а) й робочі процеси в діаграмі концентрація-ентальпія (ξ - i) (б) водоаміачного АТТ без РТО та ректифікації пари:

А — абсорбер; Н — насос міцного розчину; Г — генератор; Кн — конденсатор; ДВ1 і ДВ2 — дросельні вентиля холодоагенту та слабого розчину відповідно; В — випарник; — дросельний ventиль; ГС — гріюче середовище; ЗВ — забортна вода; ОС — охолоджуване середовище



а



б

Рис. 2. Схема (а) та робочі процеси в діаграмі концентрація-ентальпія ($\xi-i$) (б) водоаміачного АТТ з РТО без ректифікації пари

початку кипіння; 1'-2' — зміна стану парової фази в процесі кипіння в генераторі; т. 2' — стан пари NH_3 у кінці кипіння; т. 2 — стан рідини в кінці процесу кипіння; т. 3 — стан слабкого розчину після дроселювання; т. 7 — стан рідини NH_3 у кінці процесу дроселювання.

Міцний розчин після абсорбера (т. 4 — див. рис. 1, б) прокачується насосом (робота насоса $l_n = 2,5$ кДж/кг, процес 4-1) до генератора (питоме теплове навантаження генератора $q_r = 2379$ кДж/кг), в якому f , кг розчину підігривається до стану насичення (процес 1-1⁰) та кипить при постійному тиску (процес 1⁰-2). Утворена пара аміаку, рівноважна середньому стану рідини в генераторі (т. 5'), надходить до конденсатора (питоме теплове навантаження конденсатора $q_k = 1407$ кДж/кг), в якому вона конденсується (процес 5'-6). Конденсат аміаку після дроселювання в дросельному вентилі (процес 6-7) надходить до випарника (питоме теплове навантаження випарника — холодопродуктивність $q_0 = 856$ кДж/кг), в якому рідина аміаку кипить за рахунок теплоти, відведеної від повітря на вході ДВЗ (процес 7⁰-8⁰).

Пара аміаку після випарника (т. 8) надходить до абсорбера (питоме теплове навантаження абсорбера $q_a = 1829$ кДж/кг), де поглинається $(f-1)$ кг слабкого розчину (процес 3⁰-4) після дроселювання в дросельному вентилі (процес 2-3). Тепловий коефіцієнт, за умов наведених вище, становить $\xi = q_0/q_r = 0,36$.

Водоаміачний АТТ з РТО без ректифікації пари. У прямому циклі водоаміачного АТТ теплова енергія слабкого водоаміачного розчину може бути повернена до циклу за допомогою регенеративного теплообмінника (рис. 2, а).

Процеси робочого циклу АТТ наступні: 4-1 — нагрів міцного розчину в РТО; 2-3 — охолодження слабкого розчину в РТО. Позначення решти процесів співпадає з рис. 1, б.

Метою застосування РТО є зменшення витрат тепла на підігрів міцного розчину після абсорбера від температури завершення абсорбції до температури початку кипіння розчину в генераторі (процес 4-1). До того ж зменшується кількість тепла, яку необхідно відвести від абсорбера при поглинанні пари аміаку, що надходить з випарника, слабким розчином з генератора (процес 2-3).

У цій схемі в порівнянні зі схемою без РТО різниця між питомим тепловим навантаженням генератора ($q_g = 1773$ кДж/кг) становить $\Delta q_g = q_{tm}$, тобто витрата тепла в генераторі АТТ без РТО більша, ніж у генераторі схеми з РТО на величину, що дорівнює кількості тепла, переданого міцному розчину слабким розчином у РТО ($q_{tc} = q_{tm} = 606$ кДж/кг — див. рис. 2, б). Різниця між питомим тепловим навантаженням абсорбера АТТ у схемі з РТО $q_a = 1223$ кДж/кг та без нього $\Delta q_a = q_{tc}$, тобто теплота, що відводиться від абсорбера АТТ без РТО більша, ніж у схемі з РТО на величину, що дорівнює кількості тепла, відданого слабким розчином у РТО. Питома холодопродуктивність (питоме теплове навантаження) випарника не змінюється ($q_0 = 856$ кДж/кг).

Ефективність регенерації залежить від ступеня використання теплоти слабого розчину. Зменшення питомого теплового навантаження генератора при застосуванні РТО визначається теплою, відведеною від слабого розчину $q_{tc} = q_{tm}$. У РТО вся тепла енергія слабого розчину може бути регенована у тому випадку, якщо розчин виходить із РТО при температурі $T_3 = T_4 + \Delta T$ (див. рис. 2, б), де $\Delta T = 5$ К — мінімальна різниця температур у процесі теплообміну. Таким чином, включення РТО підвищує тепловий коефіцієнт: $\xi = 0,48$.

При найбільш повному використанні теплової енергії слабого розчину в деяких випадках (наприклад, при вихідних даних, наведених вище) міцний розчин виходить з РТО киплячим, тобто температура міцного розчину після РТО T_1 вища за температуру початку кипіння міцного розчину в генераторі T_1^0 (353 К $>$ 339 К). Тоді РТО виконують з двох частин: рідинний теплообмінник та передкип'ятильник (форгенератор). У рідинному РТО міцний розчин доводиться до стану кипіння, а в форгенераторі здійснюється часткове випарювання розчину. Відповідно теплове навантаження РТО включає у себе дві складові: навантаження форгенератора та рідинного РТО.

При оцінці ефективності РТО в прямому циклі АТТ слід урахувати регенерацію тепла в процесах підвищення концентрації пари, що виходить з генератора.

Способи ректифікації. Збільшення концентрації пари аміаку після генератора здійснюється наступними способами: 1) водою; 2) частиною холодного розчину, що відводиться, крім РТО, до ректифікатора. У кожному зі способів підвищення концентрації пари від середнього значення до концентрації, рівноважної міцному розчину ξ'_1 , може бути досягнуто в самому генераторі. Якщо міцний розчин надходить до генератора зверху в протитечію парі, що виходить з нього, і поверхня зіткнення між їх потоками буде великою, то при ідеальному теплообміні пара аміаку може мати температуру міцного розчину. Отже, пара може бути охолоджена від середньої температури в генераторі T'_5 до нижчої температури кипіння розчину в ньому T_1^0 , тобто концентрація вихідної пари повинна дорівнювати концентрації рівноважної пари ξ'_1 на початку кипіння при температурі T_1^0 . Насправді ідеального теплообміну не існує, тому концентрація пари аміаку буде практично на 2...3% менше від значення ξ'_1 . Припускаємо, що теплообмін між парою, яка виходить з генератора, і флегмою або міцним розчином, що надходить, є ідеальним.

Ректифікація пари аміаку завжди доцільна. Не дивлячись на незворотні втрати, які вносять охолодження пари в прямому циклі водоаміачного АТТ, підвищення концентрації пари в заданих, порівняно невеликих межах зміни температури кипіння у випарнику збільшує холодильний коефіцієнт зворотного циклу, що цілком компенсує зменшення термічного ККД прямого циклу, і в результаті тепловий коефіцієнт зростає. Слід зазначити, що, не дивлячись на зростання теплового коефіцієнта суміщеного циклу зі збільшенням концентрації, ректифікація призводить до додаткових незворотних втрат, відсутніх у роздільних циклах, де концентрація в кожному з циклів може бути вибрана незалежно одна від одної, відповідно до найвигіднішого режиму роботи.

Водоаміачний АТТ з РТО, ректифікатором та дефлегматором, охолоджуваним водою. Підвищення концентрації пари аміаку шляхом її охолодження водою здійснюється в дефлегматорі (рис. 3, а).

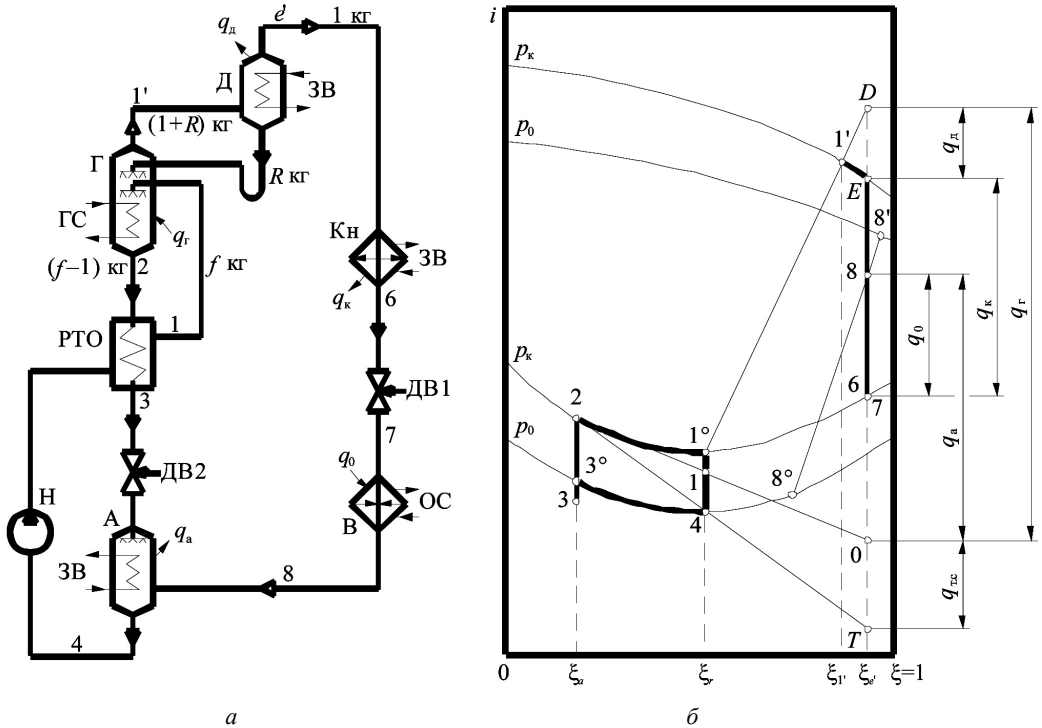


Рис. 3. Схема (а) й робочі процеси в діаграмі концентрація-ентальпія ($\xi-i$) (б) водоаміачного АТТ з РТО, ректифікатором та дефлегматором, охолоджуваним водою

Процеси робочого циклу АТТ наступні: 1'-Е — дефлегмація пари NH₃ водою; Е-6 — конденсація. Позначення решти процесів співпадає з рис. 2, б.

Збільшення концентрації пари аміаку, що конденсується в конденсаторі, приводить до підвищення питомої холодопродуктивності випарника ($q_0 = 1122$ кДж/кг). Питоме теплове навантаження генератора ($q_r = 1683$ кДж/кг) зростає при ректифікації пари аміаку водою в дефлегматорі ($q_d = 101$ кДж/кг). Ректифікація доцільна лише тоді, коли її застосування приводить до підвищення теплового коефіцієнта ξ , який при наведених вище вихідних даних становить 0,67. Питоме теплове навантаження на РТО майже не змінюється $q_{тс} = q_{тм} = 611$ кДж/кг.

Водоаміачний АТТ з РТО, зворотною подачею слабого розчину через генератор та ректифікацією пари частиною міцного розчину. На схемі (рис. 4, а) видно, що ректифікація пари аміаку здійснюється в генераторі без застосування додаткового апарата — дефлегматора.

Якщо припустити, що теплоємності слабого та міцного розчинів однакові, то при відведенні частини міцного розчину (в обхід РТО) до ректифікатора використання теплової енергії слабого розчину не зміниться, однак завдяки нагріву міцного розчину в ректифікаторі можна повернути теплоту ректифікації ($q_p = 101$ кДж/кг) до прямого циклу АТТ. При цьому зменшується питоме теплове навантаження генератора ($q_r = 1582$ кДж/кг) на величину, що дорівнює питомому тепловому навантаженню дефлегматора на схемі (рис. 3, а), оскільки пара з генератора виходить з тією ж концентрацією ξ'_0 , але відсутні втрати теплоти ректифікації через її відведення до навколишнього середовища, що приводить до зростання теплового коефіцієнта АТТ: $\xi = 0,71$. Питомо холодопродуктивність випарника ($q_0 = 1122$ кДж/кг) не змінюється, а питоме теплове навантаження РТО ($q_{тс} = q_{тм} = 259$ кДж/кг) скорочується, що пояснюється зменшенням кількості холодного міцного водоаміачного розчину, яка проходить через РТО на g кг (сама ця частина міцного розчину направляється на

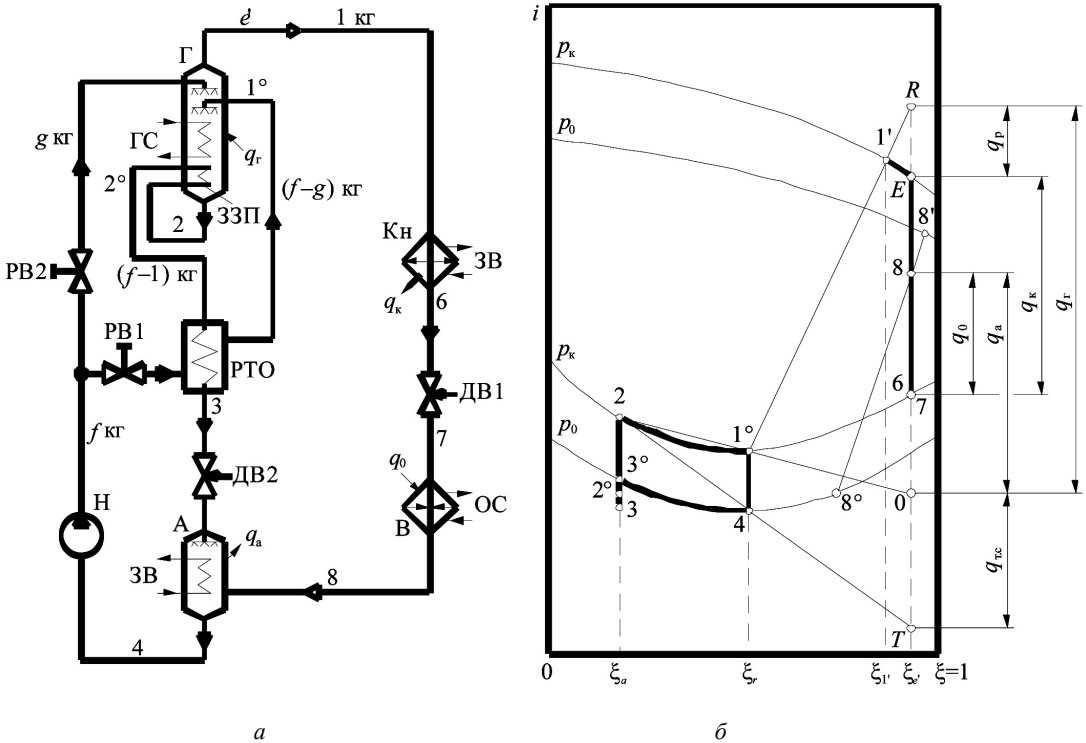


Рис. 4. Схема (а) й робочі процеси в діаграмі концентрація-ентальпія ($\xi-i$) (б) водоаміачного АПТ з РТО, зворотною подачею слабкого розчину через генератор та ректифікацією пари аміаку частиною міцного розчину: PB1, PB2 — регулюючі вентилі міцного розчину

ректифікацію до ректифікатора в генераторі) та застосуванням зворотної подачі.

Повернути (регенерувати) теплову енергію слабкого водоаміачного розчину до циклу можна за допомогою зворотної подачі розчину через генератор, коли слабкий розчин направляється по змійовику назад до генератора (процес 2–2°). При цьому питомі теплові навантаження генератора та холодопродуктивність випарника порівняно з відсутністю зворотної подачі залишаються незмінними.

Зворотна подача через генератор не впливає також і на значення теплового коефіцієнта ξ , але зменшує питоме теплове навантаження РТО, яке стає тим менше, чим більша різниця температур на початку та вкінці процесу в генераторі. Питоме теплове навантаження на змійовики зворотної подачі $q_{гз.п}$ становить 292 кДж/кг.

Розглядаючи зворотну подачу з точки зору теплообміну, без урахування ролі ректи-

фікації, можна зробити наступні висновки: зворотна подача через генератор аналогічна процесу у форгенераторі, оскільки в обох випадках передається однакова кількість тепла на випаровування розчину в генераторі (при ідеальному теплообміні можна при зворотній подачі підігріти f кг розчину, в звичайному РТО можна додатково передати міцному розчину тільки тепло, що виділяється при охолодженні $(f-1)$ кг слабкого розчину).

Застосуванням зворотної подачі через генератор у деяких випадках можна уникнути необхідності розділення РТО на дві частини: рідинний РТО та форгенератор (як у нашому прикладі), оскільки в РТО буде здійснюватися тільки підігрів міцного розчину до температури початку кипіння $T_{1'}^{\circ}$, а надлишкова теплота буде відводитися від гарячого слабкого розчину в зворотній подачі через генератор перед його надходженням до РТО.

Водоаміачний АТТ, що працює з «перевищенням температур» за схемою Л.М. Розенфельда. З підвищенням вищої температури кипіння у генераторі T_2 зростає вища температура в абсорбєрі T_3^o . При великій різниці концентрацій міцного та слабого розчинів вища температура в абсорбєрі T_3^o може дорівнювати або навіть перевищувати температуру початку кипіння в генераторі T_1^o . У випадку, якщо $T_3^o > T_1^o$, можна застосувати схему з «перевищенням температур» у прямому циклі АТТ (рис. 5, а).

Вузлові точки робочого циклу АТТ наступні: т. n_1 — стан міцного розчину в генераторі, підігрітого за рахунок перевищення температур; т. n_2 — стан міцного розчину, підігрітого за рахунок перевищення температур та зворотної подачі через генератор; т. m — стан слабого розчину після змішувачів перевищення температур; т. m_1 — стан міцного розчину, охолодженого за рахунок

зворотної подачі через абсорбєр. Позначення решти процесів співпадає з рис. 3, б.

Коли вища температура T_3^o в абсорбєрі більша від нижчої температури T_1^o у генераторі, частина теплоти абсорбції може бути використана для підігріву міцного розчину, що надходить до генератора.

Перевищення температур можна здійснити зворотною подачею розчину через абсорбєр та генератор. Відведення частки холодного розчину, крім зворотної подачі його на ректифікацію пари аміаку, недоцільне, тому встановлюють ректифікатор, що охолоджується водою (дефлегматор).

Схема, запропонована Л.М. Розенфельдом, застосовується у випадку, коли $T_3^o \gg T_1^o$ ($353 \text{ K} \gg 339 \text{ K}$). Кипіння міцного розчину в генераторі (питоме теплове навантаження $q_r = 1266 \text{ кДж/кг}$) за рахунок гріючого джерела (водяної пари) в процесі n_2-2 зображене на рис. 5, б. Слабкий розчин після

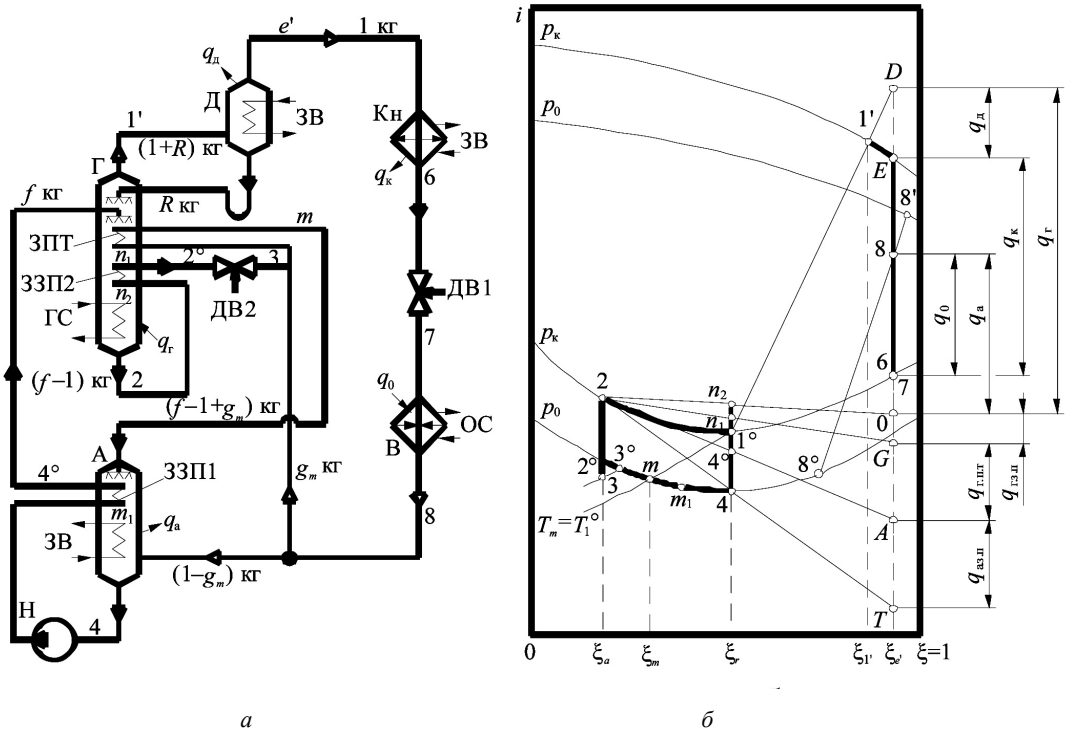


Рис. 5. Схема (а) та робочі процеси в діаграмі концентрація-ентальпія ($\xi-i$) (б) водоаміачного АТТ, що працює з «перевищення температур» за схемою Л.М. Розенфельда: 3ЗП1 і 3ЗП2 — змішувачі зворотної подачі в абсорбєрі та генераторі відповідно; 3ЗП — змішувач перевищення температур

ля генератора (т. 2) охолоджується в процесі $2-2^\circ$ у змійовику зворотної подачі через генератор (питоме теплове навантаження $q_{\text{г.п.}} = 67$ кДж/кг). Ця теплота передається на нагрів міцного розчину в процесі n_1-n_2 . Після зворотної подачі (т. 2°) слабкий розчин дроселюється (процес $2^\circ-3$) та направляється до змійовика перевищення температур (т. 3), розташованого в генераторі, де слабкий розчин поглинає пару, що надходить у змійовик з випарника (процес $3-m$). Температура в процесі абсорбції знижується від T_3° до $T_r = T_1^\circ$, а теплота, що виділяється, витрачається на кипіння міцного розчину в процесі $4^\circ-n_1$ (питоме теплове навантаження змійовика перевищення температур у генераторі $q_{\text{г.п.т}} = 586$ кДж/кг). Далі розчин надходить до абсорбера, де охолоджується в процесі $m-m_1$ за рахунок зворотної подачі міцного розчину через абсорбер до температури T_{m1} . Зниження температури охолодженого розчину при абсорбції пари, яка надходить з випарника, від температури T_{m1} до T_4 у процесі m_1-4 досягається за рахунок охолоджуючого джерела (заборотної води). Міцний розчин (т. 4) прокачується насосом через змійовики зворотної подачі через абсорбер (питоме теплове навантаження $q_{\text{а.з.п}} = 374$ кДж/кг), де в процесі $4-4^\circ$ він підігрівається до $T_4^\circ - T_1^\circ - \Delta T$ ($\Delta T = 5$ К) і в такому стані (т. 4°) розчин надходить до генератора.

Питома холодопродуктивність випарника ($q_0 = 1122$ кДж/кг) при цьому не змінюється. Тепловий коефіцієнт АТТ зростає за рахунок зменшення кількості підведеної теплоти від грійного джерела і становить $\xi = 0,89$.

Теплоту, що відводиться водою в дефлегматорі ($q_d = 101$ кДж/кг), можна зменшити,

якщо випаровувати розчин концентрацією ξ_r ($\xi_r > \xi_1$). Тоді пара, що надходить до дефлегматора, буде мати концентрацію, рівноважну рідині ξ'_r ($\xi'_r > \xi'_1$). У випадку надходження до дефлегматора більш концентрованої пари його питоме теплове навантаження знижується.

Зворотна подача через генератор має перевагу в порівнянні з форгенератором. При випаровуванні всього розчину в генераторі та надходженні до нього більш міцного (некиплячого) розчину концентрація пари аміаку, що відводиться з генератора, вища, ніж у разі застосування форгенератора, після якого до генератора надходить уже частково випарений, отже, більш слабкий розчин.

При високій температурі грійного джерела в АТТ прямий цикл може бути здійснений із застосуванням повної регенерації тепла, якою по суті є система перевищення температур.

ВИСНОВКИ

1. Використання схеми АТТ з «перевищенням температур» особливо ефективне при підвищеній температурі джерела скидної теплоти.
2. Тепловий коефіцієнт при застосуванні схеми АТТ з «перевищенням температур» збільшується в 2,4 рази порівняно зі схемою без РТО, в 1,8 рази порівняно зі схемою з РТО і в 1,3 рази порівняно зі схемою з РТО та дефлегматором, охолоджуваним водою.
3. Теплові коефіцієнти вододіагнічних АТТ з РТО в 1,5–2,0 рази більші, ніж АТТ без РТО.
4. Використання РТО особливо ефективне при підвищених температурах охолоджуваного повітря та заборотної води, яку подають на охолодження конденсатора й абсорбера.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Influence of Ambient Temperature Conditions on Main Engine Operation. — Copenhagen: MAN B&W Diesel A/S, 2005. — 15 p.
- [2] Thermophysical properties of {NH₃ + H₂O} mixtures for the industrial design of absorption refrigeration equipment. — Zurich: M. Conde Engineering, 2006. — 38 p.