

6.2 Оптимізація окремих ступенів випарки цукрового виробництва

В енерготехнологічній системі виробництва цукру найбільші втрати ексергії (майже 72 %) припадають на варіння утфелей тому саме цим процесам приділяється найбільша увага. Для відділення випарки типового цукрового заводу був розроблений метод термoeкономічної оптимізації [306] (за величиною температурного напору в окремих ступенях).

Задача локальної оптимізації зводиться до мінімізації річних термoeкономічних витрат на систему випарки в цілому:

$$\begin{aligned} Z_{\Sigma}^{opt*} &= \min \sum_{i=1}^m Z_i = \min(Z_{e\Sigma} + Z_{k\Sigma}) = \\ &= \min\left(\sum_{i=1}^m Z_{ei} + \sum_{i=1}^m Z_{ki}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

тут Z_{ei} – вартісне вираження річних енергетичних витрат, що розраховуються за відповідними втратами ексергії в i -тому (блоці, ступені) елементі $Z_{ei} = C_e \Pi_i \tau_y$, де C_e – ціна палива, перерахована на один кДж його ексергії; Π_i – втрати ексергії в i -тому елементі, τ_y – час роботи системи за рік; $Z_{ki} = \varphi_y K_i$ – річні капітальні і пов'язані з ними витрати; K_i – капітальні вкладення в i -тий елемент при здачі об'єкта в експлуатацію «під ключ»; φ_y – узагальнений річний коефіцієнт окупності капітальних вкладень. У подальших розрахунках прийнято: $\tau_y = 3000$ годин на рік, ексергія палива (природний газ з теплотою згоряння 36522 МДж/м³), ціна природного газу 0,354 USD/м³. При цих умовах $C_e = 9,69 \cdot 10^{-6}$ USD/кДж. K_i (в USD) розраховувалися за емпіричною формулою [306]

$$K_i = K_1 + \psi A_{si}^{0,87}, \quad (2)$$

де $K_1 = 15000$ USD – вартість монтажу та наладки кожного із ступенів випарки; $\psi = 400$ USD – коефіцієнт вартості теплообмінної поверхні A_s , м², об'єднаний річний коефіцієнт окупності капітальних вкладень для випарних апаратів $\varphi_y = 0,1908$. Основна частина втрат ексергії обумовлена теплообміном при кінцевій різниці температур, тому в якості незалежної змінної при

термoeкономiчнiй оптимiзацiї була обрана величина температурного напору в кожному iз ступенiв $\Delta T_i = T_{hi} - T_{ci}$, де T_{hi} – температура гріючої (яка конденсується) пари; T_{ci} – температура технологiчного (киплячого) розчину, що гріється $i = 1, 2, \dots, m$, де m – число ступенiв. При цьому кожен iз ступенiв характеризується своїм мiнiмальним значенням термoeкономiчних витрат Z_i^{opt} , що вiдповiдають значенням ΔT_i^{opt} , $i = 1, 2, \dots, m$. Iснування для кожного ступеня свого локального мiнiмуму Z_i^{opt} пояснюється тим, що зi зростанням ΔT_i збiльшується величина Z_{ei} , тому що збiльшуються втрати ексергії, i зменшується величина Z_{ki} , оскiльки зменшується поверхня теплообмiну ступеня, а, отже, їх сума Z_i (1) буде мати мiнiмум (рис.1).

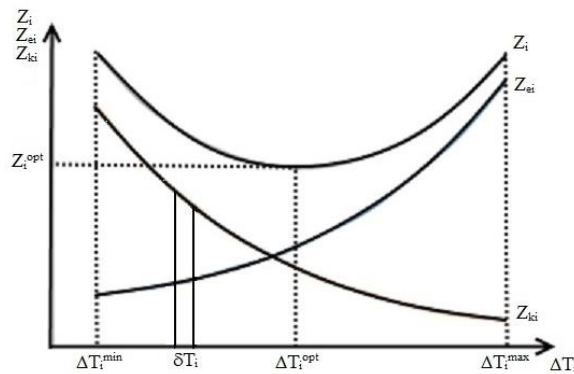


Рисунок 1. Залежність термoeкономiчних витрат в i-тому ступенi вiд величини температурного напору в цьому ступенi

Пошук оптимального значення методом Гауса-Зейделя в силу унiмодальностi функцiї $Z_i(\Delta T_i)$ проводиться для кожного iз ступенiв $i = 1, 2, \dots, m$ шляхом послiдовного порiвняння Z_i , отриманого на даному кроцi iтерацiї, з попереднiм, i, якщо знайдене значення менше, то переходять до наступної iтерацiї. Розрахунок закінчується в тому випадку, якщо знайдене значення Z_i стає бiльше, нiж значення Z_{i-1} , що отримане на попередньому кроцi, яке i буде оптимальним. Потiм розраховуються сумарнi термoeкономiчнi витрати по (1). Вiдповiдно, задається iнтервал змiни величин температурних напорiв $\Delta T_i^{min} \leq \Delta T \leq \Delta T_i^{max}$ i крок змiни цього напору δT_i , $i = 1, 2, \dots, m$. Для зручностi розрахункiв

можна прийняти $\Delta T_i^{\min} = \Delta T^{\min}$, $\Delta T_i^{\max} = \Delta T^{\max}$, $\delta T_i = \delta T$, $i = 1, 2, \dots, m$, тобто як інтервал, так і крок зміни температурного напору для всіх ступенів можуть прийматися однаковими. Значення Z_i^{opt} потім корегується шляхом пошуку з більш дрібним кроком $\delta T_i'$ (рис. 2) поблизу точки ΔT_i^{opt} .

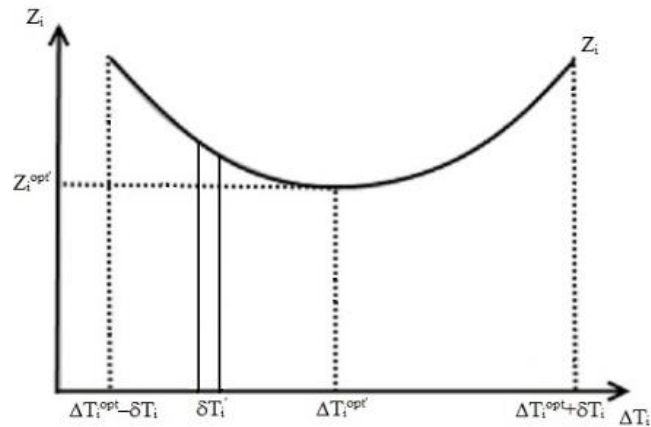


Рисунок 2. Уточнене значення оптимального температурного напору в i -той ступені і відповідна йому величина мінімальних термoeкономiчних витрат.

Розрахунок оптимальних характеристик для першого ступеня випарки.

У розрахунках, виходячи з технологічних обмежень, прийняті: граничні значення температурних напорів $\Delta T_i^{\min} = \Delta T^{\min} = 4 \text{ K}$, $\Delta T_i^{\max} = \Delta T^{\max} = 20 \text{ K}$ «великий» крок зміни температурного напору $\delta T_i = \delta T = 2 \text{ K}$; «дрібний» крок зміни температурного напору $\delta T_i' = \delta T' = 0,1 \text{ K}$.

Отримані значення оптимальних температурних напорів і локальних оптимумів річних термoeкономiчних витрат для першого ступеня, наведені в табл.1., відкориговані в табл. 2., для другого ступеня - в табл.3., відкориговані в табл. 4., для третього ступеня - в табл.5., відкориговані в табл. 6. відповідно.

Таблиця 1.

Значення температурного напору та річних термoeкономічних витрат
в першому ступені (оптимальні величини виділені)

Температурний напір, ΔT_1 , К	Температура гріючої пари, T_{h1} , К	Поверхня теплообміну, A_{s1} , м ²	Втрати ексергії, Π_1 , Вт	Вартісне вираження річних ексергетичних витрат, Z_{e1} , USD/year	Річні капітальні та зв'язані з ними витрати, Z_{k1} , USD/year	Річні термoeкономічні витрати, Z_1 , USD/year
4	403	4221	221555	23192	111710	134903
6	405	2814	330692	34617	79355	113973
8	407	2110	438756	45929	62418	108348
10	409	1688	545764	57131	51909	109041
12	411	1407	651730	68224	44715	112939

У програмній реалізації саме ці відкориговані значення використовуються в якості Z_i^{opt} .

Знайдене значення температурного напору у першому ступені перевищує відповідне у існуючій системі випарки на 2,6 °С, в другому на 1,9 °С, в третьому 1,6 °С відповідно.

Підтримання такого збільшеного температурного напору у першому ступені дозволить зменшити річні витрати в цьому ступені на 3800 USD, в другому на 2780 USD, в третьому 740 USD відповідно.

Слід зазначити, що знайдені значення ΔT_i^{opt} в силу жорсткої прив'язки до технологічного ланцюжка кожного ступеня вимагають взаємного узгодження, тому що потоки, які виходять з попередніх ступенів, одночасно входять в наступні, а, отже, температурний рівень процесів в ступенях повинен узгоджено змінюватися, змінюючи тим самим величину термoeкономічних витрат.

Таблиця 2.

Уточнені значення температурного напору та річних термoeкономiчних витрат в першому ступені (оптимальні величини виділені)

Температурний напір, ΔT_1 , К	Температура грiючої пари, T_{h1} , К	Поверхня теплообміну, A_{s1} , м ²	Втрати ексергії, Π_1 , Вт	Вартісне вираження річних ексергетичних витрат, Z_{e1} , USD/year	Річні капітальні та зв'язані з ними витрати, Z_{k1} , USD/year	Річні термoeкономiчні витрати, Z_1 , USD/year
7,9	406,9	2137	433378	63 073	45 367	108 440
8,0	407,0	2110	438756	62 418	45 929	108 348
8,1	407,1	2084	444132	61 778	46 492	108 270
8,2	407,2	2059	449504	61 152	47 055	108 207
8,3	407,3	2034	454874	60 541	47 617	108 158
8,4	407,4	2010	460242	59 943	48 179	108 122
8,5	407,5	1986	465607	59 358	48 740	108 099
8,6	407,6	1963	470969	58 786	49 302	108 088
8,7	407,7	1941	476328	58 226	49 863	108 090
8,8	407,8	1919	481685	57 679	50 423	108 103
8,9	407,9	1897	487039	57 142	50 984	108 127
9,0	408,0	1876	492391	56 617	51 544	108 162
10,0	409,0	1688	545764	51 909	57 131	109 041

Таблиця 3.

Значення температурного напору та річних термoeкономiчних витрат
в другому ступені (оптимальні величини виділені)

Температурний напір, ΔT_2 , К	Температура гріючої пари, T_{h2} , К	Поверхня теплообміну, A_{s2} , m^2	Втрати ексергії, Π_2 , Вт	Вартісне вираження річних ексергетичних витрат, Z_{e2} , USD/year	Річні капітальні та зв'язані з ними витрати, Z_{k2} , USD/year	Річні термoeкономiчні витрати, Z_2 , USD/year
4	394	4913	209879	21970	127075	149046
6	396	3275	313228	32789	90153	122942
8	398	2456	415539	43499	70825	114324
10	400	1965	516827	54102	58832	112935
12	402	1637	617107	64600	50623	115223
14	404	1403	716394	74993	44628	119622
16	406	1228	814703	85284	40047	125332
18	408	1091	912048	95475	36426	131901
20	410	982	1008444	105566	33486	139052

Таблиця 4.

Уточнені значення температурного напору та річних термoeкономiчних витрат в другому ступені (оптимальні величини виділені)

Температурний напір, ΔT_2 , К	Температура гріючої пари, T_{h2} , К	Поверхня теплообміну, A_{s2} , m^2	Втрати ексергії, Π_2 , Вт	Вартісне вираження річних ексергетичних витрат, Z_{e2} , USD/year	Річні капітальні та зв'язані з ними витрати, Z_{k2} , USD/year	Річні термoeкономiчні витрати, Z_2 , USD/year
8,0	398,0	2456	415539	43499	70825	114324
8,1	398,1	2426	420628	44032	70094	114126
8,2	398,2	2396	425714	44564	69380	113945
8,3	398,3	2368	430797	45096	68682	113779
8,4	398,4	2339	435878	45628	68000	113629
8,5	398,5	2312	440957	46160	67333	113493
8,6	398,6	2285	446032	46691	66680	113372
8,7	398,7	2259	451106	47222	66041	113264
8,8	398,8	2233	456176	47753	65416	113170
8,9	398,9	2208	461244	48284	64804	113089
9,0	399,0	2183	466310	48814	64205	113020
9,1	399,1	2159	471373	49344	63618	112963

9,2	399,2	2136	476434	49874	63043	112918
9,3	399,3	2113	481492	50403	62480	112884
9,4	399,4	2090	486547	50932	61928	112861
9,5	399,5	2068	491600	51461	61387	112848
9,6	399,6	2047	496651	51990	60856	112846
9,7	399,7	2026	501699	52518	60335	112854
9,8	399,8	2005	506744	53047	59825	112872
9,9	399,9	1985	511787	53574	59324	112899
10,0	400,0	1965	516827	54102	58832	112935
10,1	400,1	1946	521865	54629	58350	112980
10,2	400,2	1926	526900	55157	57876	113033
10,3	400,3	1908	531933	55683	57411	113095
10,4	400,4	1889	536963	56210	56955	113165
10,5	400,5	1871	541991	56736	56506	113243
10,6	400,6	1854	547016	57262	56066	113328
10,7	400,7	1836	552039	57788	55633	113421
10,8	400,8	1819	557059	58314	55207	113522
10,9	400,9	1803	562077	58839	54789	113629
11,0	401,0	1786	567092	59364	54378	113743
11,1	401,1	1770	572105	59889	53974	113864
11,2	401,2	1754	577115	60413	53577	113991
11,3	401,3	1739,39	582123	60937	53186	114124
11,4	401,4	1724,13	587128	61461	52802	114264
11,5	401,5	1709,14	592131	61985	52424	114410
11,6	401,6	1694,40	597131	62508	52052	114561
11,7	401,7	1679,92	602129	63032	51686	114718
11,8	401,8	1665,68	607124	63555	51326	114881
11,9	401,9	1651,69	612117	64077	50972	115049
12,0	402,0	1637,92	617107	64600	50623	115223

Таблиця 5.

Значення температурного напору та річних термoeкономiчних витрат
в третьому ступені (оптимальні величини виділені)

Температурний напір, ΔT_3 , К	Температура гріючої пари, T_{h3} , К	Поверхня теплообміну, A_{s3} , m^2	Втрати ексергії, Π_3 , Вт	Вартісне вираження річних ексергетичних витрат, Z_{e3} , USD/year	Річні капітальні та зв'язані з ними витрати, Z_{k3} , USD/year	Річні термoeкономiчні витрати, Z_3 , USD/year
4	381,5	4004	112107	11735	106822	118557
6	383,5	2669	167284	17511	75919	93431
8	385,5	2002	221889	23227	59743	82971
10	387,5	1601	275930	28884	49706	78591
12	389,5	1334	329415	34483	42835	77319
14	391,5	1144	382355	40025	37818	77844
16	393,5	1001	434756	45511	33984	79495
18	395,5	889	486627	50941	30953	81894
20	397,5	800	537976	56316	28492	84809

Таблиця 6.

Уточнені значення температурного напору та річних термoeкономiчних витрат
в третьому ступені (оптимальні величини виділені)

Температурний напір, ΔT_3 , К	Температура гріючої пари, T_{h3} , К	Поверхня теплообміну, A_{s3}	Втрати ексергії, Π_3 , Вт	Вартісне вираження річних ексергетичних витрат, Z_{e3}	Річні капітальні та зв'язані з ними витрати, Z_{k3}	Річні термoeкономiчні витрати, Z_3 , USD/year
10,0	387,5	1601	27530	28884	49706	78591
10,1	387,6	1585	278617	29166	49302	78469
10,2	387,7	1570	281303	29447	48906	78353
10,3	387,8	1555	283988	29728	48517	78245
10,4	387,9	1540	286671	30009	48135	78144
10,5	388,0	1525	289353	30290	47759	78049
10,6	388,1	1511	292033	30570	47391	77961
10,7	388,2	1497	294712	30851	47028	77879
10,8	388,3	1483	297390	31131	46672	77804
10,9	388,4	1469	300066	31411	46322	77734
11,0	388,5	1456	302741	31691	45978	77670
11,1	388,6	1443	305415	31971	45640	77612

11,2	388,7	1430	308087	32251	45308	77559
11,3	388,8	1417	310758	32530	44981	77512
11,4	388,9	1405	313427	32810	44659	77469
11,5	389,0	1392	316095	33089	44343	77432
11,6	389,1	1380	318762	33368	44031	77400
11,7	389,2	1369	321427	33647	43725	77373
11,8	389,3	1357	324091	33926	43424	77350
11,9	389,4	1346	326754	34205	43127	77332
12,0	389,5	1334	329415	34483	42835	77319
12,1	389,6	1323	332075	34762	42547	77310
12,2	389,7	1312	334734	35040	42264	77305
12,3	389,8	1302	337391	35318	41985	77304
12,4	389,9	1291	340047	35596	41711	77308
12,5	390,0	1281	342701	35874	41440	77315
12,6	390,1	1271	345354	36152	41174	77326
12,7	390,2	1261	348006	36430	40911	77341
12,8	390,3	1251	350656	36707	40652	77360
12,9	390,4	1241	353305	36984	40397	77382
13,0	390,5	1232	355953	37261	40146	77408
13,1	390,6	1222	358599	37538	39898	77437
13,2	390,7	1213	361244	37815	39654	77470
13,3	390,8	1204	363888	38092	39413	77506
13,4	390,9	1195	366530	38369	39176	77545
13,5	391,0	1186	369171	38645	38942	77587
13,6	391,1	1177	371810	38921	38711	77633
13,7	391,2	1169	374448	39198	38483	77681
13,8	391,3	1160	377085	39474	38258	77732
13,9	391,4	1152	379721	39750	38037	77787
14,0	391,5	1144	382355	40025	37818	77844