

*Золѿан Заварѿо, Јасна Грбић
Рада Јевѿић-Мучибабић, Никола Докмановић*

Технолошки факултет, Нови Сад

Примена анализе интегрисаних енергетских токова у пројектовању топлотних операција у процесу производње шећера из репе

Стручни рад

UDC: 664.12:66.021.4

BIBLID: 0350-218X, 29 (2003), 1-4, 17-27

*Процес производње шећера из шећерне репе ѿече са великом ѿо-
ѿрошњом ѿојлојине енерѿије. У циљу смањена ѿоѿрошње ѿојлоји-
не енерѿије врло често се ѿрејројекѿује сисѿем за исѿаравање и
заѿревање. При анализи мреже ѿојлојиних размењивача корисном се
ѿоказала ѿзв. ѿинч ѿтехнолоѿија. Ова методa базира се на ѿнѿеѿри-
саним ѿојлим и хладним сѿрујама и даје нам одѿвор на ѿиѿање:
колика је максимална могућа рекуѿерација ѿојлојине енерѿије за
даѿу минималну разлику ѿемѿерѿура између ѿојле и хладне сѿру-
је у сисѿему. Метода је ѿакође, коришћена и ѿри ѿројекѿовању
фабрике шећера [5, 7-10].*

*У овом раду извршена је анализа ѿосѿојеђеѿ сѿања у фабрици шеће-
ра „Црвенка” ѿрименом ѿинч ѿтехнолоѿије. Циљ анализе је био да се
да решење за смањивање ѿоѿрошње ѿојлојине енерѿије са садашњих
1,3 репе на 1,0 MJ/kg репе уз минималне инвестѿиѿије.*

*Кључне речи: ѿроизводња шећера из репе, ѿојлојина ѿнѿеѿраѿија,
Пинч анализа, ѿрејројекѿовање*

Увод

Термодинамичку анализу звану „Пинч (Pinch) технологија” увео је Линхоф (Linhoff) [1]. Ова метода се показала као ефикасно средство при пројектовању мреже топлотних размењивача. Интеграѿијом мреже топлотних размењивача могуће су уштеде од 5 до 60% у потребној енерѿији [2].

Ова метода примењује се како за пројектовање потпуно нове мреже топлотних размењивача тако и за препројектовање (ретрофит) постојеће мреже. Примарни

циљ при пројектовању било ког индустријског процеса је максимум рекуперације топлоте процес-процес (што боља интеграција) односно минимизирање додатне (спољне) потребне топлотне енергије. При препројектовању постојећег индустријског процеса такође је циљ максимална рекуперација топлоте процес-процес и минимизација додатне потребне топлотне енергије у складу са могућностима постојећег стања.

Пинч метода проширена је и на анализу и пројектовање система који користе воду (Water Pinch Analysis) [3, 4].

Примена пинч технологије односи се на целу процесну индустрију. Бројни су примери примене ове технологије у индустрији шећера [5–10]. Тако је ова технологија коришћена при препројектовању фабрике шећера у В. Британији [5, 8] као и при препројектовању пољских фабрика шећера [9, 10].

Потрошња енергије при производњи шећера из шећерне репе је веома интензивна. Ово је један од разлога за потребом реконструкције фабрике шећера. Тренутно у Европи, специфична потрошња енергије је испод 1 MJ/kg репе.

У овом раду циљ је био да се смањи садашња потрошња топлотне енергије у фабрици шећера „Црвенка” са 1,2–1,3 на око 1,0 MJ/kg репе уз минималне инвестиције. При анализи постојећег стања као и предложених решења за уштеду коришћена је пинч технологија.

Анализа постојећег стања

У периоду од 10. до 20. октобра 2001. обављено је снимање масеног и топлотног биланса у шећерани „Црвенка”. Снимањем су обухваћени лабораторијски и погонски подаци. Извршено је снимање температуре грејања међупродуката као и величина неопходних за формирање масеног и топлотног биланса отпарне станице и масеног и топлотног биланса рафинерије.

Након извршене анализе и провере прикупљених података добијених снимањем технолошког процеса у шећерани, извршени су неопходни прорачуни и направљен је материјални и енергетски биланс технолошког процеса шећеране у Црвенки.

На основу резултата мерења и формираних топлотних и материјалних струја евидентиране су све топле и хладне струје које су наведене у табл. 1. На основу ових струја формирају се интегрисане топле и интегрисане хладне струје тзв. пинч дијаграм.

Пинч технологија, као што је већ речено, представља једноставну методу за систематску анализу хемијских процеса уз помоћ првог и другог закона термодинамике. Први закон омогућава израчунавање размењене топлоте, односно промену енталпије, ΔH . Други закон одређује правац преноса топлоте. У топлотном размењивачу топла струја не може бити хлађена испод напоја хладне струје, док се хладна струја не може загрејати више од температуре напојне топле струје. У пракси топла струја може да се охлади до температуре дефинисане топлотним измењивачем. Ова дефинисана температура прилаза је минимална дозвољена температурна разлика, $\Delta T_{\text{мин}}$, у температурним профилима струје за дати топлотни размењивач. Температурни ниво на коме се налази $\Delta T_{\text{мин}}$, назива се место пинча.

Таблица 1. Топле и хладне струје – постојеће стање

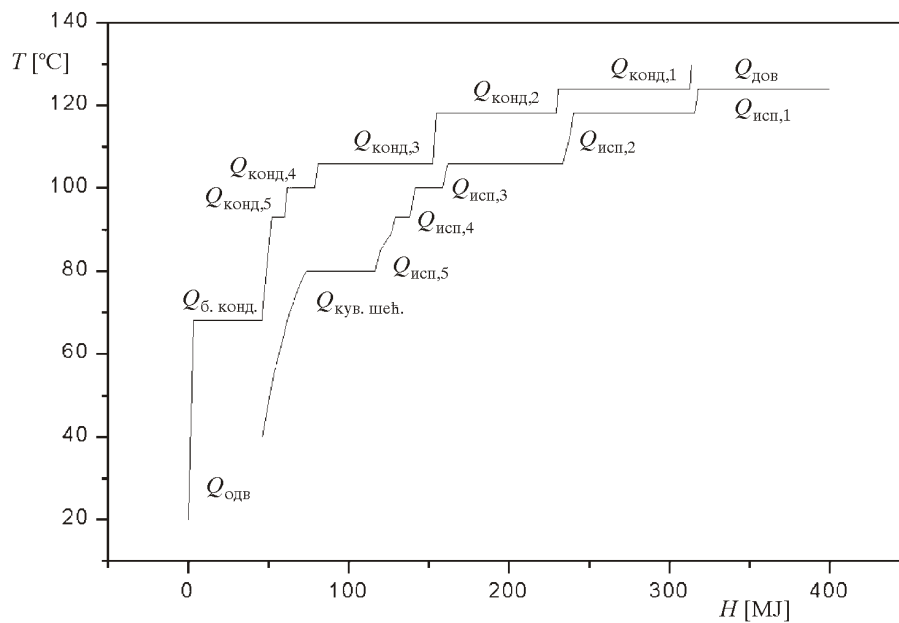
Топле струје		$T_{ул}$	$T_{изл}$	Q [MJ/100 kg репе]	
$Q_{конд,1}$	Кондензација I брида	124	124	82,084	
$Q_{конд,2}$	Кондензација II брида	118	118	75,191	
$Q_{конд,3}$	Кондензација III брида	106	106	71,581	
$Q_{конд,4}$	Кондензација IV брида	100	100	17,221	
$Q_{конд,5}$	Кондензација V	93	93	8,154	
$Q_{ек,рп}$	Експанз. конд. ретурне паре	130	118	1,960	
$Q_{ек,2}$	Експанз. конд. II отпарне станице	118	106	1,960	
$Q_{ек,3}$	Експанз. конд. III отпарне станице	106	100	1,960	
$Q_{ек,4}$	Експанз. конд. IV отпарне станице	100	93	1,740	
$Q_{тв}$	Топла вода	93	70	5,750	
$Q_{кпк}$	Конд. паре кристализера	68	68	42,836	
$Q_{хк}$	Хлађење конд. до 20 °C	68	20	3,270	
Хладне струје		$T_{ул}$	$T_{изл}$	Q [MJ/100 kg репе]	
$Q_{исп,1}$	Испаравање I степен	124	124	82,084	
$Q_{исп,2}$	Испаравање II степен	118	118	75,191	
$Q_{исп,3}$	Испаравање III степен	106	106	71,589	
$Q_{исп,4}$	Испаравање IV степен	100	100	17,221	
$Q_{исп,5}$	Испаравање V степен	93	93	8,154	
$Q_{рс}$	Ретки сок I степен	I	91	103	5,566
		II	103	114	6,893
		III	114	123	4,240
$Q_{сте}$	Стандардни сируп	85	90	2,645	
$Q_{кш}$	Кување А, В и С шећера	80	80	42,836	
$Q_{тк}$	Топло кречни сок II сат.	85	94	4,284	
	Топло кречни сок I сат.	78	89	6,545	
$Q_{цс}$	Циркулациони сок	I	70	74	1,630
		II	74	81	2,892
$Q_{вп}$	Вода са преса	56	70	2,066	
$Q_{хкс}$	Хладно кречни сок	I	40	57	8,263
		II	57	68	5,750
		III	68	80	6,067

Пинч дефинише минималну погонску силу у датој јединици за топлотну размену. Код мреже топлотних размењивача постоје интегрисане топле струје и интегрисане хладне струје, које се формирају из свих топлих и свих хладних струја у процесу.

Примарни циљ пинч анализе је постизање уштеде бољом топлотном интеграцијом топлоте, односно максималним искоришћењем размене топлоте процес-процес.

На основу топлих и хладних струја, датих у табл. 1, формира се пинч дијаграм у коме се налазе композитне топле и хладне струје (сл. 1). Интегрисане топле струје представљају извор топлоте док интегрисане хладне струје представљају топлотни понор или потрошаче. Део хладних струја који није изнад покривен топлим струјама треба грејати доведеном топлотом, $Q_{\text{дов}}$, док топле струје које испод себе немају хладне струје треба хладити са $Q_{\text{одв}}$. Топле и хладне струје које се поклапају вертикално се размењују у процесу то су размене топлоте типа процес-процес. Количине топлоте које је у овом случају неопходно довести и одвести су:

$$Q_{\text{дов}} = 86,324 \text{ MJ/100 kg репе} \quad \text{и} \quad Q_{\text{одв}} = 46,123 \text{ MJ/100 kg репе.}$$



Слика. 1. Пинч дијаграм постојећег стања израженог на 100 kg репе

Почетна енталпија за топле струје је $H_0 = 0$ док је за интегрисане хладне струје $H_0 = 46,123 \text{ MJ/100 kg репе}$. Размена топлоте између струја је по вертикали. Померање интегрисаних топлих струја удесно је могуће, али то би значило прерасподелу потрошача.

На основу добијеног пинч дијаграма, односно интегрисаних топлих и хладних струја може се закључити да су струје релативно добро интегрисане. Исто тако се види да значајни део енергије, релативно ниског потенцијала, одлази у околину ($Q_{\text{одв}}$).

Могућности за уштеду:

(1) Померањем појрошача секундарних (бридових) пара

Са сл. 1. се види да би померањем интегрисане хладне струје улево могла да се смањи количина како доведене тако и одведене топлоте. Ово наравно има своје ограничење и неопходна је прерасподела потрошача.

(2) Термокојресција секундарне пара

Уз специфичну потрошњу паре за производњу електричне енергије на противпритисној турбини од 13 kg/kWh и уз специфичну потрошњу електричне енергије за потребе технолошког процеса од 3,0 kWh/100 kg репе, потребно је да фабрика троши 39,0 kg технолошке паре на 100 kg репе за покривање потребе у производњи струје. Уколико фабрика троши више од 39,0 kg паре/100 kg репе, вишак оштре паре се преко станице за редукцију смањује на притисак повратне паре. Обрнуто, уколико фабрика има специфичну потрошњу мању од 39,0 kg паре/100 kg репе, један део електричне енергије за потребе технолошког процеса мора се купити из спољне мреже.

За случај пројектоване потрошње од 27,43% паре на репу, како је предвиђено Идејним пројектом, фабрика мора да докупи око 30% потребне електричне енергије. Такође, уколико би се фабрика определила за уштеду топлоте компримовањем бридових пара, долази у обзир једино примена механичких компресора на електро-моторни погон јер у котловници не постоји никаква ексергетска резерва.

При компримовању бридових пара постоје две могућности:

- *Компримовање вакуумбридове пара, која се води на барометријску кондензацију, на притисак пара коју је могуће појрошити за појребе технолошког процеса.*

На тај начин се топлота ниског потенцијала која се мора одвести ван круга топлотне економије технолошког процеса, поново враћа за потребе технолошког процеса што представља уштеду у потрошњи топлоте. Уобичајено је да се компримовање вакуумбрида врши на притисак паре која се троши за кување, у овом случају IV брида. На тај начин се остварује принцип „топлотне пумпе”.

- *Компримовање бридове пара са оштарне станице на притисак вишег брида или рејура.*

У овом случају се не остварује директна уштеда топлоте јер брид који се компримује може да се троши за потребе технолошког процеса, већ се компримовање паре појављује као „фиктивни потрошач” којим се повећава количина упарене воде. Уколико редовним разводом паре не може да се постигне жељено угушћење сока већ се оно постиже компримовањем бридове паре, тада се и овај случај компримовања паре појављује као уштеда у потрошњи паре за кување А шећеровине.

Извршена анализа на бази цене мазута од 14,0 din./kg и цене електричне енергије од 2,4 din./kWh показује да су експлоатациони трошкови уштеде при компримовању паре већи од трошка за мазут при производњи паре па се може закључити да се овај вид уштеде, у условима ове анализе, не исплати.

Уколико би због проширења капацитета фабрике било потребно инвестирати у котловницу, решење са применом термокомпресије се може показати рентабилније од решења уградње нове опреме у котловници.

(3) *Инџинџерија у технолозији.*

Проширивањем интегрисане топле криве уредно и интегрисане хладне криве улево могло би значајније да се смањи количина доведене и одведене топлоте. Овде постоји више могућности, с тим што треба узети у обзир да жељени ефекат уштеде треба остварити уз минималне инвестиције.

Техничка решења за смањење потрошње паре

Циљ овог пројекта је да се применом пинч методе за анализу топлотних операција оптимизују операције преноса топлоте у технолошком процесу производње шећера у шећерани „Црвенка” што ће дати као резултат потрошњу топлотне енергије у гориву од око 1,0 MJ/kg репе, уз што мање инвестиције у технолошку опрему.

Основна идеја за смањење потрошње технолошке паре је да се максимално искористи топлота ниског потенцијала у вакуумбриду и кондензату за грејање сока пре I сатурације и да се искористи уграђено решење кувања А шећеровине помоћу кристалне основе које омогућава рад са стандардним сирупом густине 74° Вх уз смањену потребу упаравања воде при кувању шећеровине у односу на претходно решење кувања са стандардним сирупом густине око 68° Вх. Нова опрема за филтрацију стандард сирупа немачке фирме *PUTSCH*, типа *Siebomat*, уграђена за кампању 2002. године, омогућује филтрацију стандард сирупа густине до 75° Вх што је такође један од услова за реализацију ове идеје.

За кампању 2002. године уграђене су две континуалне центрифуге за обраду В шећеровине које омогућују боље искоришћење шећера на центрифугама и рад са гушћим сирупима на кувању В и С шећеровине што такође смањује потрошњу паре за кување шећерина.

На сировој страни, за кампању 2002. године, уграђене су две аутоматизоване филтер пресе фирме *PUTSCH* на којима је могуће ислађивање муља уз минимално разређење филтрата. На тај начин се смањује количина сока која се греје пре I и II сатурације као и ретког сока који се греје пре уласка у I степен отпарне станице. Смањена количина ретког сока захтева мању количину испарене воде на отпарној станици што омогућава рад са мањим загревним површинама на отпарној станици.

Фабрика шећера у Црвенки има уграђени противструјни мерач на дифузији која омогућава да се разлика температура између улазне температуре репе и излазне температуре дифузног сока одржава на 15 °С. У досадашњем раду нису потпуно искоришћене могућности које пружа овај уређај.

У кампањи 2001. године, у периоду од 10. до 20. октобра, када је фабрика радила приближно пројектованим капацитетом, извршено је снимање параметара

потребних за обрачун топлотних биланса у технолошком процесу. У табл. 2, резултати добијени мерењем упоређени су са подацима добијеним у идејном пројекту. Разлика у потрошњи технолошке паре је 12,69 kg/100 kg репе, што представља смањење у потрошњи паре од 29%.

Таблица 2. Упоређење потрошње паре између садашњег и пројектом предвиђеног стања

Место потрошње	Садашња потрошња	Предвиђена потрошња	Уштеда
	[kg паре/100 kg репе]		
Екстракција сока			
– грејање прес. воде	0,95	0,93	0,02
– грејање цирк. сока	2,08	0,90	1,18
Грејање пре I сат.	9,72	3,60	6,12
Грејање пре II сат.	1,97	2,74	0,77
Грејање ретког сока	6,88	8,14	1,26
Кување А шећера	12,00	7,83	4,17
Кување В шећера	5,90	3,64	2,26
Кување С шећера	1,90	1,43	0,47
Загревање стандардног сирупа	1,01	1,01	0,00
Сушење шећера	0,80	0,80	0,00
Центрифуге	0,50	0,00	0,50
Укупно:	43,71	31,02	12,69

Провера капацитета постојеће термотехничке опреме показује да се пројектом предвиђена решења уклапају у постојећу опрему уз релативно мале инвестиционе захвате:

- оспособљавање 2 загревача за грејање вакуумбридом,
- преправка једног постојећег загревача за грејање топлем водом (евентуално уградња једног новог плочастог измењивача), и
- нови развод паре и кондензата усаглашен са пројектним решењем.

Уско грло при раду отпарне станице је загревна површина III степена упаравања која је на граници капацитета у пројектом предвиђеним условима. У случају смањења коефицијента пролаза топлоте услед заносења загревних површина каменцем, на овом степену не постоји никаква инсталирана резерва која би компензовала смањење пролаза топлоте. Због тога се препоручује да се пре отпарне станице ретки сок третира преко јоноизмењивачке колоне (замена Са јона са На јонима) да би се избегло стварање каменца при упаравању сока. Ово техничко решење треба да представља предмет посебног пројекта.

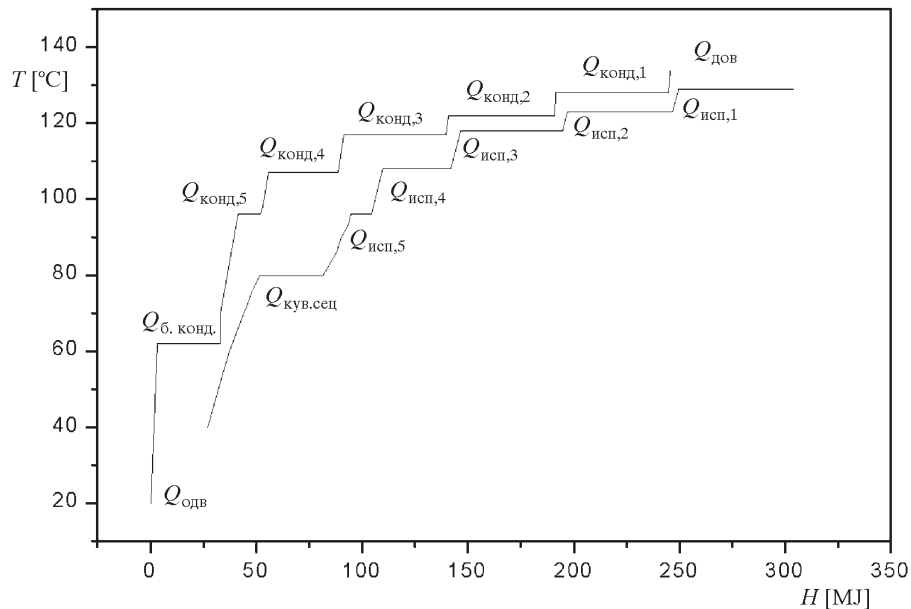
У табл. 3. приказане су све топле и хладне струје предложеног решења. На сл. 2. приказане су интегрисане топле и хладне струје са предложеном изменом тј.

повећањем површине за размену. Као што се види, ово смањује како потребу за доведеном топлотном енергијом тако и за одвођење топлоте:

$$Q_{\text{дов}} = 58,627 \text{ MJ/100 kg репе} \text{ и } Q_{\text{одв}} = 26,988 \text{ MJ/100 kg репе.}$$

Таблица 3. Топле и хладне струје – предложено решење

Топле струје		$T_{\text{ул}}$	$T_{\text{изл}}$	Q [MJ/100 kg репе]	
$Q_{\text{конд,1}}$	Кондензација I брида	128	128	53,402	
$Q_{\text{конд,2}}$	Кондензација II брида	122	122	50,485	
$Q_{\text{конд,3}}$	Кондензација III брида	117	117	48,460	
$Q_{\text{конд,4}}$	Кондензација IV брида	107	107	32,786	
$Q_{\text{конд,5}}$	Кондензација V брида	96	96	10,210	
$Q_{\text{ек,рп}}$	Експанз. конд. ретурне паре	134	122	0,871	
$Q_{\text{ек,2}}$	Експанз. конд. II отпарне станице	122	117	0,871	
$Q_{\text{ек,3}}$	Експанз. конд. III отпарне станице	117	107	2,830	
$Q_{\text{ек,4}}$	Експанз. конд. IV отпарне станице	107	96	3,266	
$Q_{\text{тв}}$	Топла вода	98	70	9,127	
$Q_{\text{кпк}}$	Конд. паре кристализера	62	62	29,803	
$Q_{\text{хк}}$	Хлађење конд. до 20 °C	62	20	3,272	
Хладне струје		$T_{\text{ул}}$	$T_{\text{изл}}$	Q [MJ/100 kg репе]	
$Q_{\text{исп,1}}$	Испаравање I степен	129	129	54,664	
$Q_{\text{исп,2}}$	Испаравање II степен	123	123	49,701	
$Q_{\text{исп,3}}$	Испаравање III степен	118	118	48,130	
$Q_{\text{исп,4}}$	Испаравање IV степен	108	108	32,220	
$Q_{\text{исп,5}}$	Испаравање V степен	96	96	9,579	
$Q_{\text{рс}}$	Ретки сок I степен	I	90	105	6,836
		II	105	112	3,221
		III	112	120	3,700
$Q_{\text{кш}}$	Кување А шећера	80	80	18,776	
$Q_{\text{кш}}$	Кување В и С шећера	80	80	11,037	
$Q_{\text{зк}}$	Завршна карбонатација	I	88	93	2,308
		II	80	88	3,657
$Q_{\text{кл}}$	Клера	75	95	2,200	
$Q_{\text{цс}}$	Циркулациони сок	70	81	1,969	
$Q_{\text{вп}}$	Вода са преса	60	72	2,025	
$Q_{\text{хдс}}$	Хладно дефековани сок	I	40	52	6,084
		II	52	70	9,126
		III	70	82	5,855
		IV	82	86	1,981



Слика 2. Пинч дијаграм предложеног решења израженог на 100 kg репе

Закључак

У оквиру демонстрационог пројекта „Интегрисање енергетских токова и оптимизација потрошње топлоте у шећерани Црвенка”, финансираног од Министарства за науку, технологије и развој Републике Србије, извршено је:

- снимање постојеће потрошње топлоте у процесу производње шећера,
- као и
- анализа постојећих решења применом пинч методе,
 - израда нових термотехничких решења узимајући у обзир карактеристике постојеће технолошке опреме, и
 - анализа нових термотехничких решења применом пинч методе.

Као крајњи резултат овог пројекта постигнуто је смањење потрошње енергије у гориву за производњу технолошке паре са садашњих 1,2–1,3 на 1,0 MJ/kg репе.

Захваљујући реализацији овог демонстрационог пројекта домаће шећеране су добиле:

- снимак стварног стања потрошње топлоте у технолошком процесу у једној домаћој фабрици,
- нову пројектантску методу за анализу техничких решења у области потрошње топлотне енергије, и

– концепцију топлотне економије технолошког процеса у једној домаћој шећерани на нивоу актуелних решења у Европи.

При избору термотехничких решења водило се рачуна да буде испуњен услов остваривања максималне уштеде уз што мање инвестиције. У конкретном случају шећеране у Црвенки нова термотехничка решења могу да се исплате кроз уштеду у гориву за производњу технолошке паре у току једне кампање прераде репе.

Захвалница

Овај рад рађен је у оквиру демонстрационог пројекта *Инијегрисуње енергетских токова и оптимизација потрошње топлоте у шећерани „Црвенка”* (НПЕЕ 301-64А) које је финансирало Министарство за науку, технологије и развој Републике Србије.

Ознаке

H – енталпија, [MJ]
 Q – количина топлоте, [MJ]
 T – температура, [°C]

Литература

- [1] Linhoff, B., Flower, J. R., Synthesis of Heat Exchanger Networks: Systematic Generation of Energy Optimal Networks, *AIChE Journal*, 24 (1978), pp. 633–642
- [2] Linhoff, B., Pinch Analysis – a State-of-the-Art Overview, *Trans. IChemE*, 71(45) (1993), pp. 503–522
- [3] Wang, Y. P., Smith, R., Wastewater Minimization, *Chem. Eng. Sci.* 49 (1994), 7, pp. 981–1006
- [4] Wang, Y. P., Smith, R., Wastewater Minimization with Flowrate Constraints, *Trans. IChemE*, 73(48) (1995), pp. 889–904
- [5] Twaite, N. R. *et al.*, Energy Reduction and Process Integration, *Int. Sugar J.* 88 (1985), pp. 1056
- [6] Urbaniec, K., Modern Energy Economy in Beet Sugar Factories, Chapter 9.4.3: Energy-System Design Using the Technique of Process Integration, Elsevier, Amsterdam, 1989, pp. 363–367
- [7] Carter, K. L., Thompson, P. D., Total Energy Integration at Ipswich Factory, *Int. Sugar J.*, 92 (1990), pp. 195–205
- [8] Christodoulou, P., The “Pinch Technology” and the Energy Reduction in the Beet Sugar Process, *Zuckerindustrie*, 117 (1992), 3, pp. 169–175
- [9] Urbaniec, K., Zalewski, P., Zhu, X. X., A Decomposition Approach for Retrofit Design of Energy Systems in the Sugar Industry, *Applied Thermal Engineering*, 20 (2000), pp. 1431–1442
- [10] Urbaniec, K., Zalewski, P., Klemes, J., Application of Process Integration Methods to Retrofit Design for Polish Sugar Factories, *Zuckerindustrie*, 125 (2000), 4, pp. 244–247

Abstract

**Application of Heat Integration Analysis for
Heat Exchange Network Retrofit Design in
the Beet Sugar Process**

by

*Zoltan ZAVARGO, Jasna GRBIĆ
Rada JEVTIĆ-MUČIBABIĆ, and Nikola DOKMANOVIĆ*

Faculty of Technology, Novi Sad, Serbia and Montenegro

Sugar beet process needs great deal of heat energy. In order to reduce this utilities the evaporator and the heating systems should be retrofited. Thermodynamic analysis called *Pinch Technology* is often used for Heat Exchange Network analysis and design. The method is based on integrated hot and cold streams, predicts the theoretical maximum possible recovery for a given value of ΔT , where ΔT is the minimum heat approach in any heat exchanger in the network. This method has been also used for retrofit design in a sugar beet industry [5–11].

In this work the analysis of the present situation in Sugar factory Crvenka has been done adopting *Pinch Technology*. The goal of this analysis was to find solution which will reduce the energy consumption from 1.3 to 1.0 MJ/kg_{beet} with minimum capital investment.

Key words: beet sugar process, heat integration, Pinch analysis, retrofit

Одговорни аутор / Corresponding author, Z. Zavargo
E-mail: zzavargo@uns.ns.ac.yu