

УДК 664.14:662.99:536.7

С. И. МЕЛЬНИК, В. Р. НИКУЛЬШИН, А. Е. ДЕНИСОВА, А. В. БЕЛОУСОВ**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА САХАРА**

Проведен термодинамический анализ систем производства сахара на основе применения как Первого закона термодинамики (энергетические показатели), так и совместного применения Первого и Второго закона термодинамики (эксергетические показатели). На основании этого анализа сформированы три группы энергосберегающих опций: использующих вторичные энергоресурсы; изменяющих параметры энергоносителей; основанных на конструктивных компоновочных решениях (структурные изменения системы). Показано, что выявленные потенциалы энергосбережения могут служить основой для последующей оптимизации систем производства сахара, однако, окончательное решение о применении этих энергосберегающих подходов предполагает проведение термоэкономической оценки, поскольку реализация большинства из энергосберегающих опций требует существенных капитальных вложений.

Ключевые слова: системы производства сахара, энергосберегающие опции, эксергетические показатели, термодинамический анализ.

С. І. МЕЛЬНИК, В. Р. НИКУЛЬШИН, А. Е. ДЕНИСОВА, А. В. БЕЛОУСОВ**ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ ВИРОБНИЦТВА ЦУКРУ**

Проведено термодинамічний аналіз систем виробництва цукру на основі застосування як першого закону термодинаміки (енергетичні показники), так і спільного застосування першого і другого закону термодинаміки (ексергетичні показники). На підставі цього аналізу сформовані три групи енергозберігаючих опцій: які використовують вторинні енергоресурси; що змінюють параметри енергоносіїв; такі, що засновані на конструктивних компоновальних рішеннях (структурні зміни системи). Показано, що виявлені потенціали енергозбереження можуть служити основою для подальшої оптимізації систем виробництва цукру, однак, остаточне рішення про застосування цих енергозберігаючих підходів передбачає проведення термоекономічної оцінки, оскільки реалізація більшості з енергозберігаючих опцій вимагає істотних капітальних вкладень. Розраховані основні ексергетичні показники типової схеми виробництва цукру продуктивністю 3000 т цукру/добу, аналіз яких показав, що основним джерелом ексергетичних втрат (понад 70 %) в цих системах є процеси варіння утфелю, що характеризуються також невисоким ступенем термодинамічної досконалості (0,54). Втрати ексергії як в цих процесах, так і в частині інших, обумовлені значними тепловими потоками і необоротністю процесів теплообміну при істотних температурних напорах, а також дисипативними втратами процесів центрифугування, механічного поділу, дифузії і транспорту потоків. Проведений термодинамічний аналіз є основою для подальшої термоекономічної оптимізації систем виробництва цукру.

Ключові слова: системи виробництва цукру, енергозберігаючі опції, ексергетичні показники, термодинамічний аналіз

S. I. MELNIK, V. R. NIKULSHIN, A. E. DENYSOVA, A. V. BELOUSOV**THERMODYNAMIC ANALYSIS OF SUGAR PRODUCTION SYSTEMS**

Thermodynamic analysis of sugar production systems was carried out based on the application of the First Law of Thermodynamics (energy characteristics) as well as on the joint application of the First and Second Law of Thermodynamics (exergy characteristics). Based on this analysis, three groups of energy-saving options were formed: using waste energy resources; changing energy parameters; based on structural changes in the system. It is shown that the identified energy-saving potentials can serve as a basis for the subsequent optimization of sugar production systems. However, the final decision on the application of these energy-saving options requires a thermo-economic approach, since the implementation of most of them requires significant capital investment. The main exergetic characteristics of a typical sugar production scheme with a capacity of 3000 tons of sugar per day have been calculated, analysis of which showed that the main source of exergy losses (more than 70 %) in sugar production systems are the boiling processes, which also have a low degree of thermodynamic perfection (0.54). Losses of exergy in these processes as well as in others are caused by big heat fluxes and irreversibility of heat exchange processes at significant temperature drops, and as dissipative losses of centrifugation processes, mechanical separation, diffusion and transport of streams. The presented thermodynamic analysis is the basis for the subsequent thermo-economic optimization of sugar production systems.

Keywords: sugar production systems, energy-saving options, exergy characteristics, thermodynamic analysis

Введение. Энергопотребление в сахарном производстве идет, в основном, в виде теплоты на проведение технологических процессов: выпаривание воды из сока, уваривание утфелей, нагрев стружки для проведения диффузионного процесса, нагрев соков в процессе очистки, а также на компенсацию потерь теплоты. При этом удельные энергетические затраты на единицу продукции могут достигать 1500 кДж/кг. Поэтому вопросом энергосбережения в процессах получения сахара посвящены многочисленные публикации. Кратко проанализируем наиболее интересные из них.

І. Аналіз состояния вопроса. Значительная часть публикаций посвящена исследованию систем производства сахара с точки зрения Первого закона термодинамики, а именно на основании энергетического баланса. Такой подход использовался, например, в монографии по технологическим аспектам переработки сахара [1], в

справочниках и учебниках [2], [3].

На энергетических балансах базируются также работы по: повышению энергоэффективности, разработке энергосберегающих технических решений производства сахара, оценке эффективности оборудования, исследованию процессов экстракции в сахарном производстве [4], [5], улучшению характеристик процессов прессования жома, предпроектной оценке сахарного завода [6]. В качестве примера в табл.1 представлен тепловой баланс типового сахарного завода.

Вместе с тем, для выявления необратимости протекающих в системе процессов необходимо привлечение не только Первого, но и Второго закона термодинамики, а, следовательно, использование эксергетического метода с последующим выходом на термоэкономический анализ.

© Мельник С.И., Никульшин В.Р., Денисова А.Е., А.В. Белоусов, 2018

Таблица 1 - Тепловой баланс типового сахарного завода [1]

Наименование показателя		Количество теплоты, кДж/кг	Доля теплоты, %
Приход теплоты			
1	Греющий пар из ТЭЦ	1471,86	71,98
2	Сырье	37,71	1,84
3	Барометрическая вода	169,35	8,28
4	Известковое молоко и сатурационный газ	62,26	3,04
5	Электроэнергия	76,59	3,74
6	Возврат конденсата из ТЭЦ	146,65	7,17
7	Возврат жомпрессовой воды	80,48	3,94
ВСЕГО:		2044,88	100,00
Расход теплоты			
1	Конденсат в ТЭЦ	482,68	23,60
2	Конденсат в аммиачный сборник	257,18	12,58
3	Жом отжатый	138,18	6,76
4	Сахар	12,06	0,59
5	Фильтрационный осадок	21,70	1,06
6	Пар на конденсатор	527,94	25,82
7	Аспирация	6,28	0,31
8	Тепловые потери через поверхность оборудования и трубопроводы	477,40	23,35
9	Тепловые потери при 1-й сатурации	74,16	3,63
10	Тепловые потери при 2-й сатурации	28,99	1,42
11	Сульфитация воды	10,60	0,52
12	Сульфитация сока	5,65	0,28
13	Сульфитация сиропа	2,01	0,10
ВСЕГО:		2044,88	100,00

Из наиболее интересных работ можно отметить применение эксергетического подхода для совершенствования когенерационных систем в сахарной промышленности [7], исследования эффективности и воздействия на окружающую среду системы по производству сахара и этанола, оптимизации сахарного завода [8], [9].

Термоэкономический анализ использовался для: исследования систем выпаривания в сахарной промышленности и совершенствования процесса производства сахара на действующих предприятиях [10], оптимизации совместной выработки сахара, этанола и электричества [11].

Цель работы. Определение основных эксергетических показателей типовых процессов получения сахара, формирование соответствующих энергосберегающих опций, проведение на этой основе термодинамического анализа системы в целом для ее последующей термоэкономической оптимизации.

II. Энергосберегающие опции. Анализ источников энергетических потерь в системах производства сахара, рассмотренных выше, а также исследованных в [12], [13], позволил сформировать следующие три группы энергосберегающих опций:

1. Опции, использующие вторичные энергоресурсы: использование горячего сока на клеровку желтого сахара; использование утфельного пара; обогрев вакуум-аппаратов утфельным паром; использование теплоты конденсатов для нагрева оттеков в продуктовом отделении; применение конденсата для нагрева диффузионного или дефекованного сока; применение конденсата для

нагрева сока 1-й сатурации перед фильтрацией (отстойниками); использование конденсата для нагрева сока перед 2-й сатурацией и сока перед выпарной установкой; использование теплоты сатурационных газов; использование деаммонизированных конденсатов и жомпрессовой воды для питания диффузионных установок; использование утфельного пара для нагрева диффузионного или дефекованного сока.

2. Опции, изменяющие параметры энергоносителей: компрессия вторичного пара МВУ; снижение температуры отбора диффузионного сока; снижение температуры горячей дефекации, процесса 1-й и 2-й сатурации; использование теплоты неконденсирующихся газов; снижение возврата нефильтрованного сока 1-й сатурации, в том числе возврат густой суспензии; применение комбинированной пробелки сахара; повышение разрежения в вакуум-аппаратах за счет снижения подсосов воздуха, улучшения работы конденсационной установки, снижения аэродинамических потерь в трубопроводах.

3. Опции, основанные на конструктивно-компоновочных решениях (структурные изменения): применение гидродинамического испарителя; перенос пароотбора на конечные корпуса МВУ; увеличение числа корпусов МВУ; улучшение циркуляции утфеля в вакуум-аппарате вдуванием пара, аммиачных газов, воздуха; нагрев оттеков в продуктовом отделении в пластинчатых подогревателях; снижение поступления пара из последнего корпуса в конденсатор; улучшение тепловой изоляции

оборудования и трубопроводов; отвод пропарки вакуум-аппаратов в клеровочные мешалки.

Нетрудно видеть, что выявленные потенциалы энергосбережения могут служить основой для последующего поиска рациональных вариантов схем производства сахара. Однако, следует учитывать, что реализация большинства из них (например, использование утфеляного пара, компрессия вторичного пара МВУ, перенос пароотбора на конечные корпуса, увеличение числа корпусов МВУ и т.д.) потребует существенных капитальных вложений. Поэтому, окончательное решение о применении конкретных энергосберегающих опций требует проведения соответствующей термоэкономической оценки [5], [10], которая, как известно, предполагает проведение термодинамического анализа системы с расчетом соответствующих эксергетических потоков и потерь эксергии как в отдельных элементах сахарного производства, так и в системе в целом.

III. Термодинамический анализ типовой схемы получения сахара. Рассмотрим типовую технологическую схему производства сахарного завода производительностью 3000 т/сутки и определим соответствующие эксергетические показатели по методике, изложенной в [14]. Агрегированная технологическая схема производства сахара приведена на рис.1 и состоит из следующих основных блоков.

Блок I. Аффинация утфеля. Аффинация является эффективным способом повышения качества аффинируемого сахара-сырца. Улучшение качества аффинируемого сахара достигается путем замены пленки маточного раствора на поверхности аффинируемого сахара на меньшее ее количество и более высокого качества. Процесс аффинации состоит из двух ступеней: приготовления аффинационного утфеля и его центрифугирования аффинационного утфеля. Аффинации можно подвергать любой сахар: сахар-сырец, желтые сахара и сахар утфеля первого продукта.

Блок II. Фуговка и пробеливание. Применяется способ двухступенчатой промывки (пробеливания) сахара в центрифуге — вначале сахарсодержащим раствором, а затем водой. Данный способ в зависимости от условий его проведения позволяет не только уменьшить количество воды на пробелку и уменьшить за счет этого растворение сахара, но и улучшить его качество.

Пробеливание сахара в центрифуге можно проводить и сахарсодержащим раствором, цветность которого ниже цветности маточного раствора, содержащегося на поверхности кристаллов сахара, например, сиропом.

Блок III. Клеровка сахара-сырца. Клеровка сахара-сырца — растворение сахара-сырца промием до определенного значения СВ клеровки с поддержанием необходимой температуры.

Блок IV. Дефекация. Дефекация — достаточно

полное разложение редуцирующих веществ и амидов в клеровке, в результате чего улучшается термоустойчивость клеровки на последующих станциях производства, а также улучшается скорость осаждения и фильтрования взвешенных веществ в клеровке. Дефекация имеет целью очистку диффузионного сока посредством коагуляции известью белков и красящих веществ и осаждения ряда анионов, дающих нерастворимые соли с ионом кальция извести (анионы щавелевой, фосфорной и ряда других кислот); кроме того, на дефекации идет ряд реакций разложения несахаров.

Блок V. Сатурация. Дефекованную клеровку подвергают двухступенчатой сатурации: на первой ступени ее обрабатывают сатурационным газом до pH 10...10,5 (щелочность по фенолфталеину 0,06...0,09 % CaO), на второй ступени — до pH 9...9,2 (щелочность по фенолфталеину 0,03...0,04 % CaO). Первая сатурация — осаждение в виде карбоната кальция избытка извести, прибавленной во время дефекации с помощью подачи в аппарат сатурационного газа. Вторая сатурация — снижение солей кальция в клеровке, дополнительная очистка от несахаров и термоустойчивость клеровки.

Блок VI. Подогрев сиропа. Отсатурированный сок нагревают до 90° С, чтобы улучшить фильтрацию.

Блок VII. Фильтрация. Цель фильтрования — удаление максимально возможного количества взвешенных частиц из сока. Технологической схемой производства предусматривается фильтрование сока I сатурации (основное и контрольное), сока II сатурации, сиропа с клеровкой. Фильтрование сока I сатурации для повышения производительности вакуум-фильтров проводится в две стадии: сначала сок в отстойниках или фильтрах-сгустителях разделяется на декантат (осветленная часть сока) и сгущенную суспензию (жидкая среда со взвешенными в ней твердыми частицами). Затем, сгущенную суспензию направляют в вакуум-фильтры. Фильтрат из вакуум-фильтров и декантат из отстойников смешивают и еще раз пропускают через контрольные фильтры.

Блок VIII. Сульфитация. Полученный сок обрабатывают газом SO₂ (сульфитация) для дополнительного обесцвечивания его и еще раз фильтруют. Очищенный сок светло-желтого цвета. В нем содержится около 15 % сухих веществ и около 14 % сахара.

Блок IX. Фильтрация. После операции блока VIII сироп подвергают дополнительной фильтрации для дополнительной очистки.

Блок X. Клеровка. Операция предусматривает дополнительную очистку сиропа свежим паром.

Блок XI. Фильтрация через адсорбент. Производится дополнительная очистка от коллоидных примесей.

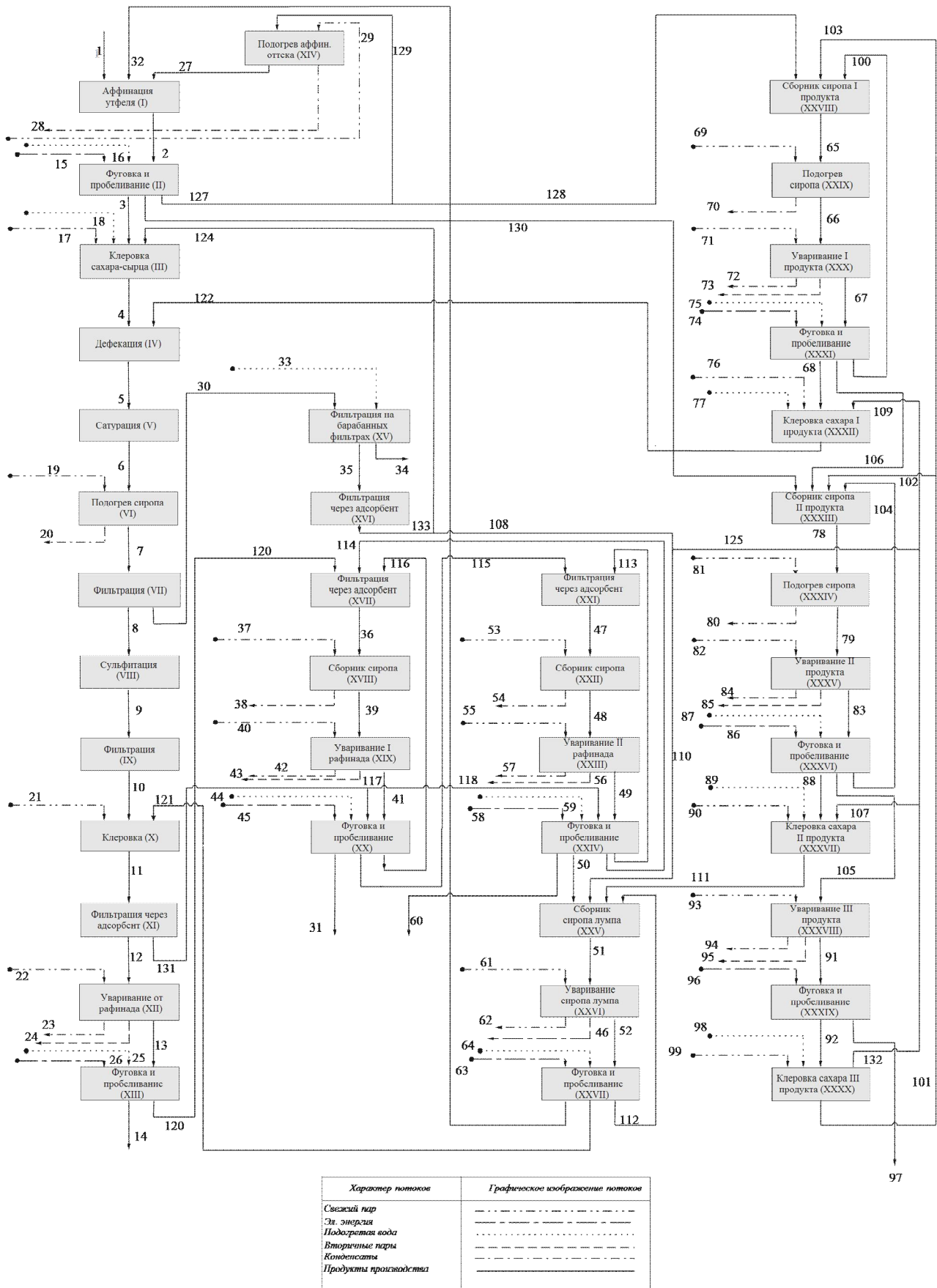


Рис. 1 – Агрегированная технологическая схема производства сахара

Блок XII. Уваривание от рафинада. Применяется с целью удаления крупных кристаллов сахара. Данная процедура производится в вакуумных ТОА.

Блок XIII. Фуговка и пробеливание. Производится с целью получения товарного продукта — рафинированного песка.

Блок XIV. Подогрев аффинового оттока. Подогрев оттока до 70 °С для последующей поддачи в блок I.

Блок XV. Фильтрация на барабанных фильтрах. Цель процесса — очистка суспензии после блока VII для дальнейшего технологического использования.

Блок XVI. Фильтрация через адсорбент. Аналогично блоку XI. Отличие заключается в использовании другого фильтрующего материала.

Блок XVII. Фильтрация через адсорбент. Аналогично блоку XVI. Фильтрация подвергается оттек после блока XIII, второй оттек после уваривания I продукта, третий оттек после уваривания III продукта.

Блок XVIII. Сборник сиропа. Осуществляется сборка сиропа после фильтрации и соответствующая обработка технологическим паром с целью очистки.

Блок XIX. Уваривание I рафинада. Процесс производится в первом корпусе выпарной станции с целью получения I рафинада (первое нормированное значение сухих веществ согласно технологического регламента).

Блок XX. Фуговка и пробеливание. Производится промежуточная очистка продукта перед второй ступенью уваривания. Первый оттек подается в блок XXI, рафкашка выводится из технологического цикла для дальнейшей переработки, второй оттек подается в блок XVII.

Блок XXI. Фильтрация через адсорбент. Аналогично блоку XI. Фильтруется первый оттек после блока XX и второй оттек после блока XXIV.

Блок XXII. Сборник сиропа. Осуществляется сборка сиропа после фильтрации и соответствующая обработка технологическим паром с целью очистки.

Блок XXIII. Уваривание II рафинада. Процесс производится во втором корпусе выпарной станции с целью получения II рафинада (второе нормированное значение сухих веществ согласно технологического регламента).

Блок XXIV. Фуговка и пробеливание. Производится промежуточная очистка продукта перед третьей ступенью уваривания.

Блок XXV. Сборник сиропа лумпа. Осуществляется сборка технологических потоков различных параметров и чистоты.

Блок XXVI. Уваривание сиропа лумпа. Производится с целью получения сиропа усредненной консистенции и чистоты.

Блок XXVII. Фуговка и пробеливание. Производится финальная очистка продукта перед увариванием.

Блок XXVIII. Сборник сиропа первого

продукта. Осуществляется сбор потоков различных видов для последующего направления в выпарную станцию.

Блок XXIX. Подогрев сиропа. Предварительный нагрев сиропа до температуры согласно технологического регламента.

Блок XXX. Уваривание первого продукта. Процесс производится в первом корпусе выпарной станции с целью получения I продукта (первое нормированное значение сухих веществ согласно технологического регламента).

Блок XXXI. Фуговка и пробеливание. Производится очистка продукта перед дальнейшим увариванием.

Блок XXXII. Клеровка сахара первого продукта. Разбавление сахара первого продукта.

Блок XXXIII. Сборник сиропа второго продукта. Осуществляется сбор потоков различных видов для последующего направления в последующий корпус выпарной станции.

Блок XXXIV. Подогрев сиропа. Предварительный нагрев сиропа до температуры согласно технологического регламента.

Блок XXXV. Уваривание второго продукта. Процесс производится во втором корпусе выпарной станции с целью получения II продукта (второе нормированное значение сухих веществ согласно технологического регламента).

Блок XXXVI. Фуговка и пробеливание. Производится очистка продукта перед дальнейшим увариванием.

Блок XXXVII. Клеровка сахара второго продукта. Разбавление сахара второго продукта.

Блок XXXVIII. Уваривание третьего продукта. Процесс производится в третьем корпусе выпарной станции с целью получения III продукта (третье нормированное значение сухих веществ согласно технологического регламента).

Блок XXXIX. Фуговка и пробеливание. Производится очистка продукта перед разбавлением в блоке XXXX.

Блок XXXX. Клеровка сахара третьего продукта. Разбавление сахара третьего продукта.

Подробное описание каждого из блоков и соответствующих технологических операций приведено в [3].

Применение подхода, изложенного в [14], реализованного в виде процедур встроенного языка высокого уровня математического пакета Maple 2017, позволило получить термодинамические характеристики как отдельных блоков схемы, так и агрегированных по технологическому признаку групп элементов (процессов). Анализ производственных процессов удобно проводить по технологическим операциям, которые циклично повторяются при выполнении технологического регламента производства сахара, объединённым в следующие характерные группы, а именно: клеровка продуктов, подогрев сиропа, варка уфелей, сбор сиропов, фильтрация продуктов, химико-

технологическая обработка продуктов, фуговка и полученные результаты (табл. 2: СТС – степень пробеливание. Последовательно анализируем термодинамического совершенства).

Таблица 2 – Эксергетические характеристики процессов получения сахара

№	Наименование продуктов	Эксергия на входе $E_{вх}$, кВт	Эксергия на выходе $E_{вых}$, кВт	Потери эксергии П, кВт	СТС, v
Клеровка продукта					
1	Аффинационный сахар-сырец	373	186	187	0,5
2	Сироп после до насыщения сахаром лумпа	382	317	65	0,83
3	Сахар I продукта	75	40	35	0,53
4	Сахар 2 продукта	136	84	52	0,64
5	Сахар 3 продукта	56	38	18	0,68
Итого по клеровке продукта		1022	665	357	0,65
Подогрев сиропов					
1	Второй аффинационный оттек	54	32	22	0,59
2	Сироп аффинационного сахара	405	312	93	0,77
3	Сироп I рафинада в сборнике	170	154	16	0,9
4	Сироп II рафинада	113	102	11	0,9
5	Сироп 1 продукта	120	90	30	0,75
6	Сироп 2 продукта	172	141	31	0,82
Итого по подогреву сиропов		1034	831	203	0,8
Процессы варки утфелей					
1	Утфель 0 рафинада	3094	1643	1451	0,55
2	Утфель I рафинада	1511	799	712	0,53
3	Утфель II рафинада	746	410	336	0,55
4	Утфель лумпа	844	476	368	0,56
5	Утфель 1 продукта	684	369	315	0,54
6	Утфель 2 продукта	1165	635	530	0,54
7	Утфель 3 продукта	192	116	76	0,60
Итого по процессам варки утфелей		8236	4448	3788	0,54
Сбор сиропов					
1	Сироп лумпа	119	110	9	0,93
2	Сироп 1 продукта	65	59	6	0,91
3	Сироп 2 продукта	125	115	10	0,92
Итого по сбору сиропов		309	284	25	0,92
Фильтрация					
1	Сироп до сульфитации	290	260	30	0,89
2	Сироп после сульфитации	246	230	16	0,93
3	Сироп донасыщенный	317	290	27	0,91
4	Сироп I рафинада	155	138	17	0,89
5	Сироп II рафинада	93	87	6	0,91
6	Суспензия	13	8	5	0,62
7	Промои	8	7	1	0,88
Итого при фильтрации		1122	1020	102	0,91
Обработка продуктов					
1	Аффинация сахара-сырца	207	176	31	0,85
2	Дефекация сиропа	226	206	20	0,91
3	Сатурация сиропа	206	187	19	0,91
4	Сульфитация сиропа	260	246	14	0,95
Итого при обработке продуктов		899	815	84	0,91
Фуговка и пробеливание					
1	Аффинационный утфель	296	188	108	0,64
2	Утфель 0 рафинада	401	215	186	0,54
3	Утфель I рафинада	197	140	57	0,72
4	Утфель II рафинада	130	74	56	0,57
5	Утфель лумпа	147	90	57	0,6
6	Утфель 1 продукта	127	67	60	0,53
7	Утфель 2 продукта	278	133	145	0,48
8	Утфель 3 продукта	93	42	51	0,45
Итого по процессам фуговки и пробеливания		1669	949	720	0,57

При клеровке продукта, наибольшие потери эксергии (187 кВт) приходятся на процесс получения аффинационного сахара-сырца при минимальном значении степени термодинамического совершенства 0,5. Это обусловлено диссипативными потерями процессов центрифугирования, механического разделения и измельчения, диффузии, при которых затрачивается электроэнергия на приводы оборудования. В процессах подогрева сиропов потери эксергии вызываются необратимостью теплообмена при достаточно высоких температурных напорах, а также диссипативными потерями процессов перекачки данного продукта на последующие технологические этапы. Наибольшие потери эксергии (93 кВт) приходятся на процесс подогрева сиропа аффинационного сахара при невысоком значении степени термодинамического совершенства 0,77. При варке утфелей наибольшие потери эксергии (1451 кВт) приходятся на процесс варки утфеля первичного рафинада при невысоком значении степени термодинамического совершенства 0,55, что является следствием больших тепловых потоков и необратимости процессов теплообмена при достаточно высоких температурных напорах при получении утфельной массы путем удаления воды из концентрированных сахаросодержащих растворов до пересыщения выпариванием. Кроме того, свой вклад вносят диссипативные потери при введении затравочного материала в пересыщенный раствор и наращивании кристаллов сахарозы. В процессах сбора сиропов потери эксергии обусловлены диссипациями при транспортировке данного продукта из нескольких мест с последующим их смешением и прямыми потерями эксергии теплоты в окружающую среду в этом оборудовании из-за несовершенства тепловой изоляции. Наибольшие потери эксергии (10 кВт) приходятся на процесс

сбора сиропа 2 продукта при достаточно высоком значении степени термодинамического совершенства 0,92. При фильтрации наибольшие потери эксергии (30 кВт) приходятся на процесс фильтрования сиропа до сульфитации при достаточно высоком значении степени термодинамического совершенства 0,89. Это объясняется диссипативными процессами при фильтрации и качеством технологического фильтрационного материала. В процессах обработки продуктов наибольшие потери эксергии (31 кВт) приходятся на процесс аффинации сахара-сырца при минимальном значении степени термодинамического совершенства 0,85, что обусловлено необратимостью физико-химических процессов очистки сахара-сырца.

При фуговке и пробеливании потери эксергии являются следствием дополнительных расходов теплоты на подогрев и уваривание первичной утфельной массы и необратимостью процессов теплообмена при достаточно высоких температурных напорах. Кроме того, свой вклад вносят диссипативные потери процессов перекачки данного продукта на последующие технологические этапы. Наибольшие потери эксергии (186 кВт) приходятся на процесс образования утфельной массы рафинада в начальном состоянии при невысоком значении степени термодинамического совершенства 0,54.

Как следует из рассмотрения результатов, приведенных в табл. 3, наибольшие эксергетические потери наблюдаются в процессе варки утфелей (более 70 % эксергетических потерь всего процесса производства сахара). Кроме того, варка утфелей характеризуется также наименьшей степенью термодинамического совершенства из всех рассматриваемых процессов (0,54), поэтому именно этим процессам традиционно и уделяется наибольшее внимание [1], [5], [12].

Таблица 3 – Эксергетические характеристики технологической схемы производства сахара

№	Наименование продуктов	Эксергия на входе $E^{вх}$, кВт	Эксергия на выходе $E^{вых}$, кВт	Потери эксергии Π , кВт	СТС, v
1	Клеровка продуктов	1022	665	357	0,65
2	Подогрев сиропов	1034	831	203	0,80
3	Варка утфелей	8236	4448	3788	0,54
4	Сборы сиропов	309	284	25	0,92
5	Фильтрация сиропов	1122	1020	102	0,91
6	Обработка продуктов	899	815	84	0,91
7	Фуговка и пробеливание сахара	1669	949	720	0,57
Всего		14291	9012	5279	0,63

Выводы:

1. На основании проведенного термодинамического анализа систем производства сахара сформированы три группы энергосберегающих опций: использующих вторичные энергоресурсы; изменяющих параметры энергоносителей; основанных на конструктивных компоновочных решениях (структурные изменения системы).

2. Рассчитаны основные эксергетические показатели типовой схемы производства сахара производительностью 3000 т сахара в сутки, анализ которых показал, что основным источником

эксергетических потерь (более 70 %) в системах производства сахара являются процессы варки утфелей, характеризующиеся также невысокой степенью термодинамического совершенства (0,54). Потери эксергии как в этих процессах, так и в части остальных, обусловлены значительными тепловыми потоками и необратимостью процессов теплообмена при существенных температурных напорах, а также диссипативными потерями процессов центрифугирования, механического разделения, диффузии и транспорта потоков.

3. Показано, что выявленные потенциалы энергосбережения и рассчитанные эксергетические

характеристики системы могут служить основой для последующей термoeкономической оптимизации систем производства сахара, поскольку реализация

большинства из энергосберегающих опций требует существенных капитальных вложений.

Список литературы

1. Штангеев К.О. *Впарні установки та теплові схеми цукрових заводів*. Київ: ЮНІДО. 2015. 66 с.
2. Сапронов А.Р., Сапронова Л.А., Ермолаев С.В. *Технология сахара: учебник*. С.-Петербург: ИД «Профессия». 2013. 296 с.
3. Славянский А.А. *Промышленное производство сахара: Учебное пособие*. М.: МГУТУ имени К.Г. Разумовского. 2015. 255 с.
4. Sobczyński J. *Ocena eksploatacji instalacji ekstraktora korytowego współpracującego z zaparzalnikiem w Cukrowni Miejska Górka*. *Gazeta Cukrownicza*. 2010. № 46, pp. 103–105.
5. Schulze T. A look at technological and technical tower extraction trends SUGAR INDUSTRY. *Zuckerindustrie*. 2015. vol. 140. № 12, pp. 748–752.
6. Yousif Karm and Ahmed Rahamatalla. 2014. *Previous Study of Elgunied Sugar Factory*.
7. R. Palacois-Bereche, A. Ensinas, M. Modesto, S.A. Nebra. *New alternatives for the fermentation process in the ethanol production from sugarcane: extractive and low temperature fermentation*. *Energy*. 2014. vol. 70, pp. 595–604. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.032>.
8. T. Taner, M. Sivrioglu. *Data on energy, exergy analysis and optimization for a sugar factory*. *Data in Brief*. 2015. № 5, pp. 408–410. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/dib.
9. Tolga Taner, Mecit Sivrioglu. *Energy exergy analysis and optimisation of a model sugar factory in Turkey*. *Energy*. 2015. vol. 93, pp. 641–654.
10. G.D. Vuckovic, M.M. Stojiljkovic, M.C. Vukic, G.M. Stefanovic, E.M. Dedeic. *Advanced exergy analysis and exergoeconomic performance evaluation of thermal processes in an existing industrial plant*. *Energy Convers. Manag.* 2014. vol. 85, pp. 655–662. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.049>.
11. L.F. Pellegrini, S. Oliveira Junior. *Combined production of sugar, ethanol and electricity: Thermoeconomic and environmental analysis and optimization*. *Energy*. 2011. vol. 36, pp. 3704–3715. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.08.01>.
12. Luiz Felipe Pellegrini, Silvio de Oliveira Junior. *Combined production of sugar, ethanol and electricity: Thermoeconomic and environmental analysis and optimization*. *Energy*. 2011. vol. 36, pp. 3704–3715.
13. Мельник С.И., Никульшин В.Р., Денисова А.Е. *Потенциалы энергосбережения в энерготехнологических системах производства сахара*. Праці VII Міжнарод. конф. «Муниципальная энергетика: Проблемы, решения». Миколаїв. 21–22 грудня 2017. С. 31–33.
14. Мельник С.И. *Анализ производственного процесса сахарорафинадного производства с использованием эксерготопологических моделей на графах*. *Наук. праці ОНАХТ*. 2011. вип. 39. Том 1. С. 240–243.
2. Sapronov A.R., Sapronova L.A., Ermolaev S.V. *Tehnologija sahara: uchebnik* [Technology of sugar: a textbook]. St. Petersburg: ID «Professija» Publ. 2013. 296 p.
3. Slavjanskij A.A. *Promyshlennoe proizvodstvo sahara: Uchebnoe posobie*. [Industrial production of sugar: Tutorial]. Moscow: MGUTU im. K.G. Razumovskogo Publ. 2015. 255 p.
4. Sobczyński J. *Ocena eksploatacji instalacji ekstraktora korytowego współpracującego z zaparzalnikiem w Cukrowni Miejska Górka* [Evaluation of the operation of the extractor in the Miejska Górka Sugar Factory]. *Gazeta Cukrownicza*. 2010. no. 4, pp. 103–105.
5. Schulze T. *A look at technological and technical tower extraction trends SUGAR INDUSTRY*. *Zuckerindustrie*. 2015. vol. 140. no. 12, pp. 748–752.
6. Yousif Karm and Ahmed Rahamatalla. 2014. *Previous Study of Elgunied Sugar Factory*.
7. R. Deshmukh, A. Jacobson, D. Kammer. *Thermal gasification or direct combustion? Comparison of advanced cogeneration systems in the sugarcane industry*. *Biomass Bioenergy*. 2013. vol. 55, pp. 163–174. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.033>.
8. T. Taner, M. Sivrioglu. *Data on energy, exergy analysis and optimization for a sugar factory*. *Data in Brief*. 2015. no. 5, pp. 408–410. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/dib.
9. Tolga Taner, Mecit Sivrioglu. *Energy exergy analysis and optimisation of a model sugar factory in Turkey*. *Energy*. 2015. vol. 93, pp. 641–654.
10. Vuckovic G.D., Stojiljkovic M.M., Vukic M.C., Stefanovic G.M., Dedeic E.M. *Advanced exergy analysis and exergoeconomic performance evaluation of thermal processes in an existing industrial plant*, *Energy Convers. Manag.* 2014. vol. 85, pp. 655–662. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.049>.
- L.F. Pellegrini, S. Oliveira Junior. *Combined production of sugar, ethanol and electricity: Thermoeconomic and environmental analysis and optimization*. *Energy*. 2011. vol. 36, pp. 3704–3715. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.08.01>.
12. Luiz Felipe Pellegrini, Silvio de Oliveira Junior. *Combined production of sugar, ethanol and electricity: Thermoeconomic and environmental analysis and optimization*. *Energy*. 2011. vol. 36, pp. 3704–3715.
13. Mel'nik S.I., Nikul'shin V.R., Denisova A.E. *Potencialy jenergosberezhenija v jenergotehnologicheskikh sistemah proizvodstva sahara*. [Potential of energy saving in energy technology systems of sugar production]. *Praci VII Mizhnarod. konf. "Municipal'na energetyka: Problemy, rishennja"*. [Municipal Energy: Problems, Solutions. Abstracts of the VII Int. Conf. 21–22 december 2017, Mikolaev]. *Mykolai'v. 21–22 grudnja 2017*, pp. 31–33.
14. Mel'nik S.I. *Analiz proizvodstvennogo processa sahara-rafinaadnogo proizvodstva s ispol'zovaniem jeksergotopologicheskikh modelej na grafah* [Analysis of a sugar production based on exergy-topological models]. *Nauk. praci ONAHT*. 2011. vol. 39. Tom 1, pp. 240–243.

Поступила (received) 23.05.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Мельник Сергій Ігоревич (Мельник Сергей Игоревич, Melnik Sergiy Igorevich) – інженер, старший викладач кафедри загальної, теоретичної та нетрадиційної енергетики, Одеський національний політехнічний університет; м. Одеса, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4784-9736>; e-mail: mardaud@i.ua

Никульшин Володимир Русланович (Никульшин Владимир Русланович, Nikulshin Vladimir Ruslanovich) — доктор технічних наук, професор завідувач кафедри загальної, теоретичної та нетрадиційної енергетики, Одеський національний політехнічний університет; м. Одеса, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5946-8562>; e-mail: vnikul@paco.net.

Денисова Алла Євсївна (Денисова Алла Евсеевна, Denysova Alla Evsivna) – доктор технічних наук, професор кафедри теплових електричних станцій і енергосберегаючих технологій, Одеський національний політехнічний університет; м. Одеса, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3906-3960>; e-mail: alladenysova@gmail.com

Белуосов Олександр Валерійович (Белуосов Александр Валериевич, Belousov Olexsandr Valeriyovych) – магістр, завідувач лабораторії інноваційних технологій дидактики польської мови "Polonia Tantum", Одеський національний політехнічний університет; м. Одеса, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6652-7858>; e-mail: wywka3@i.ua.