

Генерация альтернативной энергии в производстве хлебобулочных изделий с применением теплового насоса

Дранников Алексей Викторович

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Адрес: 394036, Россия, г. Воронеж, пр-т Революции, д. 19

E-mail: drannikov@list.ru

Тертычная Татьяна Николаевна

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет им. Петра I»

Адрес: 394087, Россия, г. Воронеж, ул. Мичурина, д. 1

E-mail: tertychnaya777@yandex.ru

Шевцов Александр Анатольевич

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Адрес: 394036, Россия, г. Воронеж, пр-т Революции, д. 19

E-mail: shevalol@rambler.ru

Засыпкин Никита Владимирович

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

Адрес: 394036, Россия, г. Воронеж, пр-т Революции, д. 19

E-mail: zvnikita24@gmail.com

Развитие альтернативной энергетики открывает реальные перспективы в применении тепловых насосов в различных отраслях промышленности. Одновременное получение тепла и холода посредством тепловых насосов основано на использовании низкопотенциальной энергии, которая в значительных объемах сбрасывается в атмосферу. В этой связи внедрение теплонасосных технологий в производство хлебобулочных изделий позволит создать условия для экономии энергетических затрат и снизить влияние негативных факторов на экологическую безопасность. В работе обосновано энергоэффективное вовлечение двухступенчатого парокомпрессионного теплового насоса в технологическую схему, обеспечивающего повышение термодинамического совершенства сложной теплотехнологической системы. В качестве рабочих тел для первой ступени выбран фреон R600a, для второй ступени использована вода R718. Сопряжение ступеней осуществляется через конденсатор-испаритель, который для ступени низкого давления является конденсатором, а для ступени высокого давления испарителем. Установлены режимы функционирования теплового насоса для подготовки высокопотенциального и низкопотенциального теплоносителя для реализации энергоемких процессов расстойки, выпечки и охлаждения тестовых заготовок. Построены термодинамические диаграммы для фреона R600a и воды R718 наглядно отражающие рабочие циклы ступеней теплового насоса. В соответствии с методологией эксергетического анализа технология разбита на семь контрольных поверхностей, между которыми установлен обмен материальными и энергетическими потоками. По методике Бродянского В.М. выполнен эксергетический анализ, построена эксергетическая диаграмма Грассмана-Шаргута, свидетельствующие о повышении эксергетического КПД технологии получения хлебобулочных изделий с применением теплового насоса.

Ключевые слова: хлебобулочные изделия, теплонасосная технология, двухступенчатый парокомпрессионный тепловой насос, эксергетический анализ

Введение

В структуре себестоимости хлебобулочных изделий энергетические затраты составляют до 30 % и более (Ауэрман, 2005; Цыганова, 2014; Пашенко & Жаркова, 2008; Гаранина, 2018). Увеличение энергетических затрат на производство хлебобулоч-

ных изделий, связанных с непрерывным ростом цен на энергоносители ставят перед хлебопекарными предприятиями новые задачи по энергосбережению и поиску инновационных решений в снижении себестоимости выпускаемой продукции (Тенденция формирования хлебопекарного рынка России в 2010-2020 гг., 2021).

В поле зрения специалистов отрасли и ученых профильных вузов всегда остаются актуальные вопросы повышения энергоэффективности производства хлебобулочных изделий, которые в настоящее время решаются на основе принципов энергосбережения, в том числе и за счет внедрения энергосберегающих теплонасосных технологий и рециркуляционных схем на их основе (Chicherin, 2018a; Chicherin, 2018b).

Генерация возобновляемой энергии с использованием тепловых насосов составляет одно из основных направлений современных исследований в области развития альтернативной энергетики (Алексеев, 2009; Горшков, 2004; Chicherin, 2018a; Chicherin, 2018b).

Возможности подключения тепловых насосов для генерации альтернативной энергии в тепловых и тепломассообменных процессах пищевой и химической технологии обоснованы в работах (Бритиков & Шевцов, 2012; Остриков и др., 2020; Шевцов и др., 2018; Шевцов и др., 2019).

Многочисленные исследования показали преимущества парокомпрессионных двухступенчатых тепловых насосов (ПКТН), которые обеспечивают получение высокой температуры теплоносителей в технологическом процессе (Елистратов & Накоряков, 2007a; Елистратов & Накоряков, 2007b; Елистратов & Накоряков, 2008; Елистратов, 2009).

Цель работы – разработка теплонасосной технологии хлебобулочных изделий с использованием двухступенчатого парокомпрессионного теплового насоса (ПКТН).

Методы и материалы исследования

Методы

Предложен методологический подход к организации и формированию энергоэффективной технологий хлебобулочных изделий на основе принципов энергосбережения, основанных на рекуперации и утилизации вторичных энергоресурсов с возвратом

низкопотенциальной энергии в тепловые и тепло-массообменные процессы посредством теплового насоса. При разработке теплонасосной технологии хлебобулочных изделий использован балансовый метод распределения энергии в замкнутых термодинамических циклах по материальным и тепловым потокам в сочетании с комплексно-энергетическим подходом, подкрепленным методом эксергетического анализа при оценке термодинамического совершенства предлагаемой технологии.

Использование двухступенчатого ПКТН в технологии хлебобулочных изделий

На основании анализа накопленного опыта по эффективному замещению в системах теплоснабжения невозобновляемых источников энергии на теплоту возобновляемых и вторичных энергоресурсов посредством ТН^{1,2,3} предложена теплонасосная технология хлебобулочных изделий (Рисунок 1).

Особенностью технологического потока является применение хлебопекарной печи с секционной обогревающей рубашкой фирмы ThermoRoll. Хлебопекарная печь ThermoRoll – это современная сквозная ленточная печь в термомасляном исполнении с программируемым управлением всех функций. В такой печи в качестве высокотемпературного теплоносителя применяется специальное масло, которое подогревается до заданной температуры и с помощью маслонасоса перекачивается к нагревательным панелям, установленных в печи. Тепловое излучение нагревательных панелей при подаче воды обеспечивает необходимые термовлажностные условия в каждой секции по длине ленты, на которой располагаются тестовые заготовки^{1,2,3}.

В процессе выпечки осуществляется утилизация парообразующейся смеси, которая отводится из каждой секции термомасляной печи в теплообменник-рекуператор 15, охлаждается и методом отгонки разделяется на воду и этиловый спирт.

Разработан способ управления теплонасосной технологией в области допустимых технологиче-

¹ Шевцов, А. А., Ткач, В. В., Тертычная, Т. Н., & Сердюкова, Н. А. (2019). *Способ управления процессом переработки масличных семян в биодизельное топливо* (Патент РФ 2693046). Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова. <https://patents.google.com/patent/RU2693046C1/ru>

² Четверикова, И. В., Шевцов, А. А., Ткач, В. В., & Сердюкова, Н. А. (2019). *Способ комплексной переработки семян сои с выделением белоксодержащих фракций* (Патент РФ 2689672). Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова. <https://patents.google.com/patent/RU2689672C1/ru>

³ Чертов, Е. Д., Чешинский, В. Л., Магомедов, Г. О., Шевцов, А. А., Пономарева, Е. И., & Одинцова, А. В. (2017). *Способ производства хлебобулочных изделий* (Патент РФ 2613283). Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова. <https://patent.ru/patent/RU2689672C1>

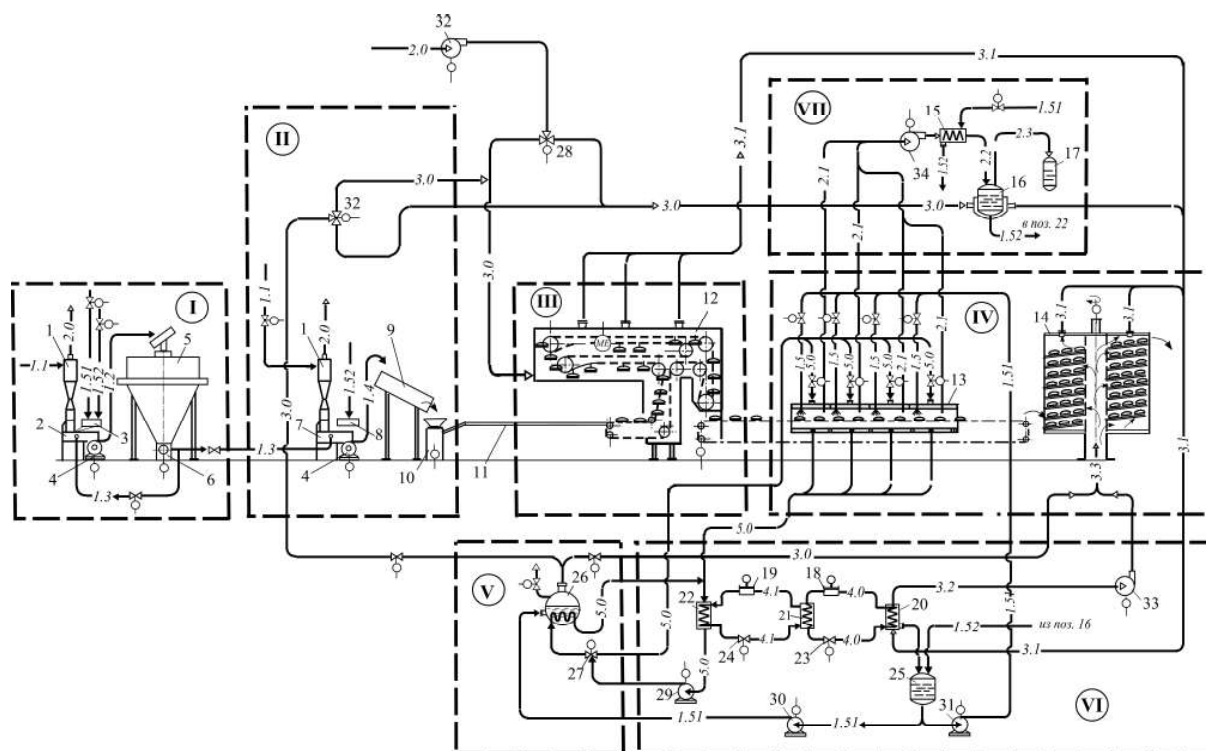


Рисунок 1. Теплонасосная технология хлебобулочных изделий

1, 6; машины тестомесильные 2, 7; дозировочные станции 3, 8; нагнетатель 4; бункер для брожения 5; корыто Рабиновича 9; тестоделитель 10; округлитель 11; расстойный шкаф 12; термомасляную поточную туннельную печь 13 с секционной обогревающей панелью и форсунками для впрыска воды; кулер конвективного охлаждения хлебобулочных изделий 14; конденсатор-рекуператор 15; теплообменный аппарат 16 с греющей рубашкой для разделения собранного конденсата методом отгонки на воду и спирт; сборник 17; двухступенчатый ПКТН, включающий компрессоры 18 и 19 соответственно первой и второй ступени, испаритель 20, конденсатор-испаритель 21, конденсатор 22, терморегулирующие вентили 23 и 24 соответственно первой и второй ступени; сборник конденсата 25; парогенератор 26; распределители потоков 27, 28; масляный насос 29; насосы 30, 31; вентиляторы 32, 33, 34; потоки: 1.1 – муки; 1.2 – закваски; 1.3 – выброженной закваски; 1.4 – замешанной закваски; 1.5 – воды; 1.51 – горячей воды; 1.52 – холодной воды; 2.0 – воздуха; 2.1 – парообразующей смеси; 2.2 – конденсата; 2.3 – спирта; 3.0 – насыщенного пара; 3.1 – отработанной паровоздушной смеси; 3.2 – охлажденной и осушенной паровоздушной смеси; 3.3 – паровоздушной смеси; 4.0, 4.1 – хладагента первой и второй ступени теплового насоса; 5.0 – термомасла.

ских свойств получаемых хлебобулочных изделий. В соответствии с программно-логическим алгоритмом сигналы отклонения текущих значений технологических параметров от заданных значений используются для оперативного управления технологией в целом⁴.

Регулирование технологических параметров в процессах расстойки, выпечки и охлаждения (Таблица 1) осуществляется в интервале заданных значений в соответствии с технологическими инструкциями⁵.

Для подготовки теплоносителей в замкнутых термодинамических циклах используется масло в

качестве промежуточного теплоносителя для получения насыщенного пара в парогенераторе 26 и в качестве основного высокопотенциального энергоносителя, подаваемого в секционную обогревающую панель термомасляной печи 13.

Эксергетический анализ технологии хлебобулочных изделий

Эксергетический анализ выполнялся для линии производства хлебобулочных изделий производительностью 0,8–1,2 т/ч. Линия включала циклон-разгрузитель, машины тестомесильные А2-ХТТ для замеса закваски и теста; дозировочную станцию СДМ-4М; лопастной нагнетатель;

⁴ Шевцов, А. А., Тертычная, Т. Н., Куликов, С. С., Дранников, А. В., & Засыпкин, Н. В. (2020). Способ управления технологией получения хлебобулочных изделий (Патент РФ 2758516). Воронежский государственный университет инженерных технологий. https://yandex.ru/patents/doc/RU2758516C1_20211029

⁵ Сборник технологических инструкций для производства хлеба и хлебобулочных изделий. (1989). М.: Прескурантиздат.

Таблица 1
Заданные значения регулируемых параметров

Параметры	Наименование хлеба	
	дарницкий подовый	украинский новый подовый
Температура, °С:		
в расстойном шкафу	38 ± 0,5	39 ± 0,5
в первой зоне выпечки	110 ± 0,5	118 ± 0,5
во второй зоне выпечки	180 ± 0,5	187 ± 0,5
в третьей зоне выпечки	230 ± 0,5	238 ± 0,5
в четвертой зоне выпечки	150 ± 0,5	170 ± 0,5
в кулере конвектив- ного охлаждения	15 ± 0,5	16 ± 0,5
термомасла после конденсатора	260 ± 0,5	280 ± 0,5
Относительная влажность паровоздушной смеси, %:		
в расстойном шкафу	77,0 ± 2,5	78,0 ± 2,5
в первой зоне выпечки	77,5 ± 2,5	78,5 ± 2,5
во второй зоне выпечки	77,5 ± 2,5	78,5 ± 2,5
в третьей зоне выпечки	77,5 ± 2,5	78,5 ± 2,5
в четвертой зоне выпечки	77,5 ± 2,5	78,5 ± 2,5
в кулере конвектив- ного охлаждения	60,5 ± 2,5	65,5 ± 2,5

бункер для брожения закваски И8-ХТА-12/2; дозатор закваски И8-ХТА-12/4; дозировочную станцию СДМ5; емкость для брожения теста И8-ХТА-12/6; тестоделитель «Кузбасс-68-2М»; ленточный округлитель; шкаф окончательной расстойки Т1-ХРЗ-120; термомасляную поточную четырехсекционную туннельную печь фирмы ThermoRol; кулер для конвективного охлаждения хлебобулочных изделий КВЛ-1.

Энергоэффективные режимы технологических операций в области допустимых свойств получаемой хлебной продукции осуществлялись с помощью двухступенчатого парокомпрессионного теплового насоса (Таблица 2).

Термодинамические циклы ступеней ПКТН обеспечивали реализацию заданных термовлажностных режимов процессов расстойки, выпечки и охлаждения тестовых заготовок (Рисунок 2).

Использование воды как наилучшего хладагента для второй ступени ПКТН имеет существенные преимущества. Сжатие водяных паров до высоких

температур обеспечивалось в многоступенчатом центробежном компрессоре типа Рутс (Chamoun et al., 2012).

Методика расчета эксергетических потерь

Расчет эксергии каждого материального и энергетического потока осуществлялся по методике⁶ Бродянского (Бродянский и др., 1988), в соответствии с моделью окружающей среды Шаргута (Шаргут & Петела, 1968) по схеме обмена потоками между контрольными поверхностями (Рисунок 3).

Технологическая система условно отделена от окружающей среды замкнутыми контрольными поверхностями: I – подготовки жидкой закваски, II – подготовки теста, III – расстойки тестовых заготовок, IV – выпечки и охлаждения тестовых заготовок; V – получения пара в парогенераторе; VI – подготовки термомасла в двухступенчатом каскадном парокомпрессионном тепловом насосе; VII – конденсации парообразующейся смеси в процессе выпечки и ее разделение методом отгонки на воду и спирт (Рисунок 1).

Таблица 2
Параметры двухступенчатого парокомпрессионного теплового насоса

Рабочее тело первой ступени (хладагент)	Фреон R600a
Температурой кипения в испарителе первой ступени, °С	минус 12
Коэффициент теплопередачи в испарителе, кВт/(м ² ·°С)	5,8-8,0
Температура конденсации в конденсаторе-испарителе, °С	110 - 120
Коэффициент теплопередачи в конденсаторе, кВт/(м ² ·°С)	2,2-3,5
Компрессор первой ступени	ФВБС6
Мощность электродвигателя компрессора первой ступени, кВт	4,2-4,5
Рабочее тело второй ступени (хладагент)	R718 (вода)
Температура кипения в конденсаторе-испарителе, °С	100
Температура конденсации в конденсаторе второй ступени, °С	260-280
Компрессор второй ступени	Cross Air
Мощность электродвигателя компрессора второй ступени, кВт	7,5-8,2

⁶ Бродянский, В. М., Верховкер, Г. П., Дубовской, С. В., Карчев, Я. Я., Лейтес, И. Л., Максимова, Т. В., Никитин, Д. Г., Нестеров, Б. П., Оносовский, В. В., Прохоров, В. И., Шилкопер, С. М., Сорин, М. В., Щеголев, Г. М., Хлебакин, Ю. М., Попов, А. И., & Янговский, Я. И. (1991). *Эксергетические расчеты технических систем. Справочное пособие*. Киев: Наукова Думка.

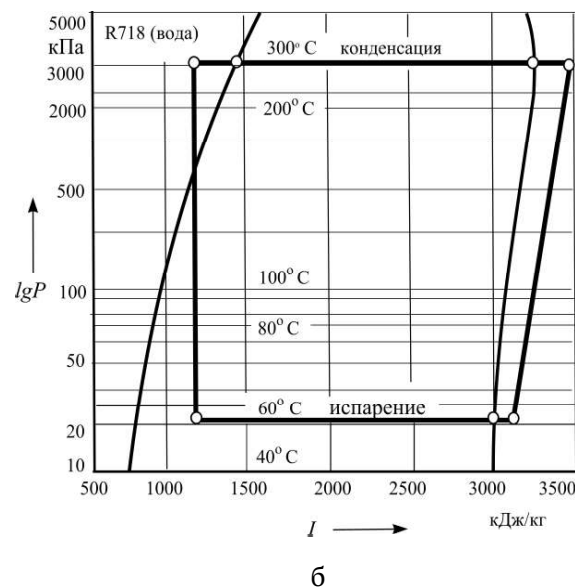
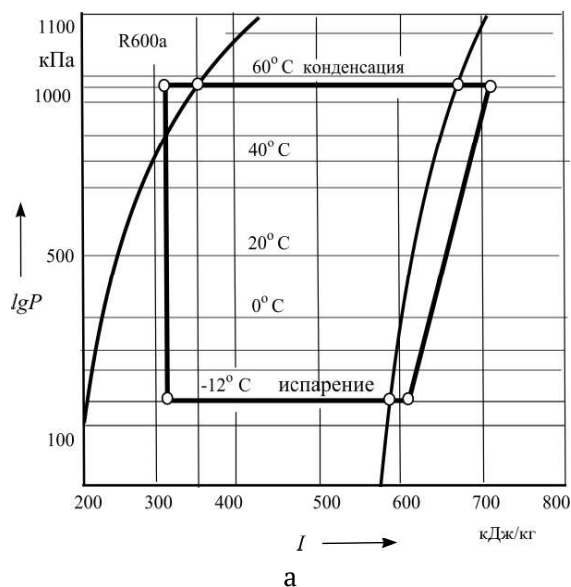


Рисунок 2. Термодинамические циклы в диаграмме $\lg P$ - I : а – первой ступени теплового насоса (R600a); б – второй ступени (R718); P – давление, кПа; I – энтальпия, кДж/кг

В качестве абсолютного эксергетического параметра, используемого в расчетах, выбрана эксергетическая мощность P_e , кДж/ч, учитывающая энергию материальных и тепловых потоков. Изменение эксергии по каждой контрольной поверхности технологической системы, состоящей из классических необратимых процессов с течением времени, определялась по формуле⁷.

$$\sum_{(i=1)}^n E_i^e = \sum_{(k=1)}^l E_k^e + \sum_{(j=1)}^m D_j, \quad (1)$$

где $\sum_{(i=1)}^n E_i^e$ – суммарная эксергия вводимых в контрольную поверхность материальных и энергетических потоков; $\sum_{(k=1)}^l E_k^e$ – суммарная эксергия выводимых из контрольной поверхности полезных материальных и энергетических потоков; $\sum_{(j=1)}^m D_j = T_o \Delta S$ – суммарные эксергетические потери (уравнение Гюи-Стодолы); $i = (\overline{1}; \overline{n})$ – количество вводимых материальных и энергетических потоков; $k = (\overline{1}; \overline{l})$ – количество выходящих полезных потоков; $j = (\overline{1}; \overline{m})$ – количество эксергетических потерь.

Распределение потоков и их обозначение (Таблица 3) легли в основу расчета эксергетического КПД и построения эксергетической диаграммы Грассмана-Шаргута.

Соотношение (1) для рассматриваемой технологической линии представлено в следующем виде:

$$E_1 + E_2 + \Sigma E^{ep} = E_3 + E_4 + E_5 + \Sigma D^i + \Sigma D^e, \quad (2)$$

где слагаемые этого уравнения – эксергетическая мощность (кДж/ч): исходной муки E_1 , компонентов E_2 , суммарная эксергия, вводимая в систему с электроэнергией для работы приводов машин; эксергетическая мощность, выводимая из системы с готовыми хлебобулочными изделиями E_3 , с водой E_4 , и воздухом пневмотранспорта E_5 ; сумма потерь эксергии в результате необратимости процессов, происходящих внутри контрольной поверхности ΣD^i ; сумма потерь эксергии во внешнюю среду ΣD^e .

Уравнение (2) отражает изменение эксергии теплотехнологической системы за счет ввода паровоздушной смеси в расстойный шкаф и кулер конвективного охлаждения готовых хлебобулочных изделий, подвода электроэнергии к приводам насосов, вентиляторов и компрессоров двухступенчатого парокомпрессионного теплового насоса; покрытия потерь, возникающих вследствие необратимости процессов получения закваски, муки, расстойки, выпечки, рекуперативного теплообмена при конденсации парообразующей смеси, ее разделение методом отгонки на воду и другие компоненты, в том числе этиловый спирт; изменения теплофизических свойств промежуточных продуктов; компенсации потерь, обусловленных действием окружающей среды.

Эксергия вводимых в систему внешних материальных потоков: исходной муки и компонентов E_1

⁷ Там же.

Таблица 3
Эксергия энергетических и материальных потоков

№ потоков	Наименование потока	E, кДж/ч
1	Мука	0
2	Замешанная закваска	0
3	Горячая вода	8496
4	Электроэнергия привода тестомесильной машины для замеса опары	19800
5	Электроэнергия привода дозатора дозировочной станции	5400
6	Электроэнергия привода мешалки бункера для брожения закваски	10800
7	Электроэнергия привода нагнетателя опары	7200
8	Электроэнергия привода вентилятора подачи воздуха в циклон-разгрузитель	10800
9	Выброженная закваска	52568
10	Воздух пневмотранспорта из циклона-разгрузителя	0
11	Мука	0
12	Холодная вода	0
13	Воздух пневмотранспорта в циклон -разгрузитель	0
14	Электроэнергия привода тестомесильной машины для замеса теста	14400
15	Электроэнергия привода дозатора закваски	5400
16	Электроэнергия привода лопастного нагнетателя теста	5400
17	Электроэнергия привода тестоделителя	10800
18	Электроэнергия привода ленточного округлителя	39600
19	Электроэнергия привода посадчика заготовок в люльки расстойного шкафа	5400
20	Замешанное тесто	89280
21	Тестовые заготовки после округлителя	17856
22	Воздух после циклона-разгрузителя	0
23	Пар на подготовку паровоздушной смеси в расстойный шкаф	33457
24	Воздух на получение паровоздушной смеси	0
25	Паровоздушная смесь в расстойный шкаф	31248
26	Электроэнергия привода конвейера расстойного шкафа	5400
27	Электроэнергия привода нагнетающего вентилятора	10800
28	Тестовые заготовки после расстойки	62496
29	Отработанная паровоздушная смесь	6570
30	Термомасло в термомасляную поточную туннельную печь	267840
31	Вода на увлажнение тестовых заготовок при выпечке	0
32	Электроэнергия привода конвейера термомасляной поточной туннельной печи	19800
33	Термомасло из термомасляной поточной туннельной печи	124992
34	Парообразующая смесь в процессе выпечки	535568
35	Готовые хлебопекарные изделия	17556
36	Термомасло в змеевик парогенератора	132774
37	Конденсат в парогенератор	52570
38	Термомасло из змеевика парогенератора	124992
39	Термомасло в термомасляную печь	267840
40	Электроэнергия привода компрессора первой ступени	16200
41	Электроэнергия привода компрессора второй ступени	29520
42	Электроэнергия привода маслососа	23400
43	Электроэнергия вентилятора рециркуляции охлаждаемой паровоздушной смеси	5400
44	Пар на подготовку паровоздушной смеси в аппарат для отгонки спирта	58420
45	Воздух на получение паровоздушной смеси	0
46	Паровоздушная смесь на отгонку спирта	53568
47	Электроэнергия привода вентилятора отвода парообразующей смеси	5400
48	Холодная вода на конденсацию парообразующей смеси	0
49	Отработанная вода	350
50	Вода после отгонки паров избыточного спирта из парообразующей смеси	520
51	Отработанная паровоздушная смесь	26784

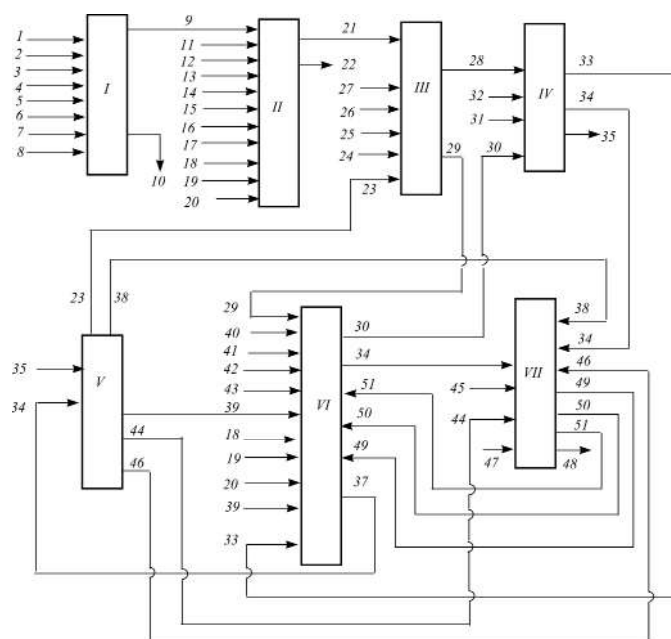


Рисунок 3. Схема обмена потоками между контрольными поверхностями

транспортирующего воздуха E_1^n , находящихся в термодинамическом равновесии с окружающей средой, равна нулю, поэтому исключалась из баланса.

Эксергия вещества в потоке, как правило, зависит от вида энергетических взаимодействий с окружающей средой и характеризуется температурой, давлением и химическим потенциалом⁸.

Термической составляющей эксергии обладали потоки, имеющие температуру выше принятой для окружающей среды (293,13 K). Удельную термическую эксергию вычисляли по уравнению Гюи–Стодоллы:

$$e_t = e - e_o = h - h_o - T_o (S - S_o) \quad (3)$$

где e , e_o , h , h_o , S , S_o , T , T_o – удельная термическая эксергия, кДж/кг, удельная энтальпия, кДж/кг, энтропия, кДж/(кг·K) и температура (K) продукта при текущих параметрах технологического процесса и в состоянии равновесия с окружающей средой.

Эксергию паровоздушной смеси, участвующей в процессах расстойки тестовых заготовок и охлаждения готовых хлебобулочных изделий, опре-

деляли, рассматривая её как бинарную смесь, состоящую из 1 кг воздуха и x кг водяных паров:

$$e_g = \bar{c}_g (T - T_o) - T_o \bar{c}_g \ln \frac{T}{T_o} - R \ln \frac{p - \phi p_s(T)}{p - \phi_o p_s(T_o)} + x(h - h_n^o) - T_o (S_n - S_n^o), \quad (4)$$

где \bar{c}_g – средняя удельная изобарная теплоемкость паровоздушной смеси между его текущим состоянием в потоке и состоянием равновесия с окружающей средой, кДж/(кг·K); p , p_o , ϕ , ϕ_o – полное давление, Па, и относительная влажность воздуха, %, в потоке и в окружающей среде; $p_s(T)$, $p_s(T_o)$ – давление насыщенного водяного пара при температуре потока и окружающей среды, Па; h_n , h_n^o , S_n , S_n^o – энтальпия и энтропия паровоздушной смеси при параметрах потока и окружающей среды, кДж/кг и кДж/(кг·K). Данные по теплофизическим свойствам воздуха, воды, сырья и продукта различной влажности и температуры^{9, 10} взяты из справочной литературы (Вукалович, 1967; Богословский, 2001).

Механическая составляющая эксергии характеризовалась различием в давлении потока веществ и окружающей среды:

$$e_p = \frac{R}{M} T_o \ln \left(\frac{p}{p_o} \right), \quad (5)$$

⁸ Там же.

⁹ Чубик, И. А., & Маслов, А. М. (1970). Справочник по теплофизическим характеристикам пищевых продуктов и полуфабрикатов. М.: Пищевая промышленность.

¹⁰ Миснар, А. (1968). Справочник. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. М.: Мир.

где R – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К); M – молярная масса газа, кг/моль; K ; P , P_0 – давление газа в рассматриваемом потоке и в состоянии равновесия с окружающей средой, кПа.

Химическая эксергия обусловлена тем, что получаемая закваска и тесто имеют концентрацию, отличающуюся от концентрации распределяемых в окружающей среде компонентов. Расчет химической эксергии соединений при получении закваски и теста определялся реакциями образования соединения из более простых веществ. Для этой реакции находится энергия Гиббса, которая суммируется с энергией компонентов реакции, значение которой, как правило, известно по термодинамическим справочникам. В общем случае химическая (концентрационная) эксергия каждого из потоков продуктов разделения заданного состава, извлекаемых из исходной смеси, определялась по той же формуле, что и термомеханическая эксергия потока. Отличие заключалось в том, что общая величина эксергии определялась алгебраической суммой идеальных работ изменения концентрации каждого компонента смеси¹¹.

Молярная химическая эксергия вещества вычислялась по формуле:

$$\varepsilon_{\mu} = \Delta G^0 + \sum A_i \cdot \varepsilon_i, \quad (6)$$

где ΔG^0 – энергия Гиббса образования вещества; A_i – коэффициенты в уравнении реакции, ε_i – молярная эксергии исходных веществ, кДж/моль.

Теплоемкость смеси муки и компонентов определяли методом нестационарного теплового режима (Волькенштейн, 1971) по формуле:

$$c_p(p, T) = c_p''(T) \frac{m''}{m} \frac{\tau - \tau_0}{\tau'' - \tau_0}, \quad (7)$$

где $c_p(p, T)$, $c_p''(T)$ – изобарная теплоемкость исследуемого образца при давлении p и температуре T и эталонного образца при соответствующем давлении p_0 и температуре T , кДж/кг·К; m и m'' – массы образца и эталонного вещества, кг; τ и τ'' – время запаздывания измерительных термодатчиков соответственно для исследуемого и эталонного образцов, с; τ_0 – время запаздывания измерительных термодатчиков пустой измерительной ячейки, с.

В расчетах учтено влияние на систему внутренних D^i и внешних D^e эксергетических потерь. Первые связаны с необратимостью любых реальных процессов, а вторые – с условиями взаимодействия системы с окружающей средой. В суммарное количество внутренних эксергетических потерь входили потери от конечной разности температур в результате рекуперативного теплообмена между потоками; электромеханические для работы приводов машин; потери возникающие при необратимом изменении свойств промежуточных продуктов; гидравлические потери, обусловленные внезапным увеличением удельного объема паровоздушной смеси, а также внезапным снижением напора термомасла при поступлении во внутреннюю полость оборудования.

Потери, обусловленные конечной разностью температур между потоками, определяли по формуле:

$$D^{mo} = Q^{mo} \cdot \tau_e, \quad (9)$$

где Q^{mo} – количество теплоты, переданное от одного потока к другому, кДж; τ_e – среднее значение фактора Карно для двух взаимодействующих потоков.

Фактор Карно или эксергетическая температурная функция (Бродянский, Фратшер, & Михалек, 1988) равна термическому КПД цикла Карно между температурами контрольной поверхности и условно принятой окружающей среды:

$$\tau_e = (T_{кп} - T_0)/T_{кп} \quad (9)$$

где $T_{кп}$ – температура теплоносителя внутри контрольной поверхности, К.

Эксергетические потери вследствие падения давления паровоздушной смеси при их подаче в контрольную поверхность определяли по формуле:

$$D^e = g \cdot \Delta H_z \cdot T_{кп}/T_{вх}, \quad (10)$$

где $T_{вх}$ – температура, К, газа (пара) на входе в контрольную поверхность; ΔH_z – гидравлические потери, м; g – ускорение силы тяжести, м/с².

По формуле Дарси-Вейсбаха найдены гидравлические потери при входе паровоздушной смеси в контрольную поверхность:

$$\Delta H_z = \xi \frac{v_{вх}^2}{2g}, \quad (11)$$

¹¹ Бродянский, В. М., Верховикер, Г. П., Дубовской, С. В., Карчев, Я. Я., Лейтес, И. Л., Максимова, Т. В., Никитин, Д. Г., Нестеров, Б. П., Оносовский, В. В., Прохоров, В. И., Шилкопер, С. М., Сорин, М. В., Щеголев, Г. М., Хлебалин, Ю. М., Попов, А. И., & Янговский, Я. И. (1991). *Эксергетические расчеты технических систем. Справочное пособие*. Киев: Наукова Думка.

где $v_{\text{вх}}$ – средняя скорость паровоздушной смеси по сечению подводящего трубопровода, м/с; ξ – коэффициент сопротивления, определяемый отношением внутреннего объема оборудования, рассматриваемого в качестве контрольной поверхности, к поперечному сечению входного отверстия.

Внешние потери D^e связаны с условиями сопряжения системы с окружающей средой. Эти потери обусловлены отличием определяющих потенциалов (температуры, давления, химического потенциала) внутри рассматриваемой системы от равновесных с окружающей средой значений.

Потери эксергии в окружающую среду, обусловленные несовершенством теплоизоляции, найдены по формуле:

$$D^e = Q_{\text{из}} \cdot \tau_e, \quad (12)$$

где $Q_{\text{из}}$ – суммарные потери тепла в окружающую среду через контрольную поверхность, кДж; τ_e – фактор Карно.

Эксергия каждого материального и энергетического потока, а также внутренние и внешние эксергетические потери составили эксергетический баланс теплотехнологической системы получения хлебобулочных изделий (Таблица 3).

Таблица 3

Внутренние и внешние эксергетические потери контрольных поверхностей

Контрольная поверхность	Наименование контрольной поверхности	Эксергетическая мощность, кДж/ч				Потери, %	КПД, %
		Воспри- нятая	Пере- данная	Потери			
				Обозначение	кДж/ч		
I	Подготовка жидкой закваски (тестомесильная машина, дозировочная станция, бункер для брожения, лопаст- ной нагнетатель, циклон разгрузитель)	62496	9989	D^i_I	28192	3,49	15,98
				D^e_I	24315	3,05	
II	Подготовка теста (тестомесильная ма- шина, дозировочная станция, дозатор закваски; емкость для брожения; те- стоделитель; округлитель, лопастной нагнетатель, циклон-разгрузитель)	89280	17856	D^i_{II}	36425	4,52	20,00
				D^e_{II}	34999	4,34	
III	Расстойка тестовых загото- вок (расстойный шкаф)	107136	13884	D^i_{III}	47760	5,92	12,96
				D^e_{III}	45492	5,64	
IV	Выпечка и охлаждение тестовых заготовок (термомасляная хлебопекарная печь, ку- лер для охлаждения готовых изделий)	267840	37847	D^i_{IV}	134507	16,68	14,13
				D^e_{IV}	95486	11,84	
V	Получение пара в парогене- раторе (парогенератор)	98208	15783	D^i_V	47213	5,85	16,07
				D^e_V	35212	4,34	
VI	Подготовка термомасла в двухступен- чатом парокомпрессионном тепловом насосе (испаритель, конденсатор-ис- паритель, конденсатор, компрес- соры ТРВ, маслонасос, насосы)	249984	51027	D^i_{VI}	109479	13,57	20,41
				D^e_{VI}	89478	11,09	
VII	Конденсация парообразующейся смеси в процессе выпечки и ее разделение ме- тодом отгонки на воду и спирт (рекупера- тивный теплообменник, устройство для отгонки спирта из парообразующей смеси)	89280	11287	D^i_{IV}	41515	5,15	12,64
				D^e_{IV}	36478	4,52	
	Итого	964224	157673	$\Sigma(D^i + D^e)$	806551	100	16,35

Результаты и обсуждения

Оценку термодинамического совершенства тепло-технологической системы получения хлебобулочных изделий проводили по эксергетическому КПД:

$$\eta_{\text{экс}} = \sum_{k=1}^l E_k^n / \sum_{i=1}^n E_i^3 \quad (13)$$

где $\sum_{k=1}^l E_k^n$ – суммарная эксергетическая мощность полезных потоков, кДж/ч; $\sum_{i=1}^n E_i^3$ – суммарная затраченная эксергетическая мощность, кДж/ч.

Эксергетический КПД предлагаемой теплонасосной технологии составил 16,35 %. Двухступенчатый ПКТН обеспечил реализацию резервов энергоэффективности и вернул значительную часть бросовой энергии в технологическую систему.

Эксергетическая диаграмма Грассмана-Шаргута (Рисунок 4) иллюстрирует возврат в систему вторичного низкопотенциального тепла, за счет чего существенно снижется расход энергии на единицу массы готовой хлебопекарной продукции.

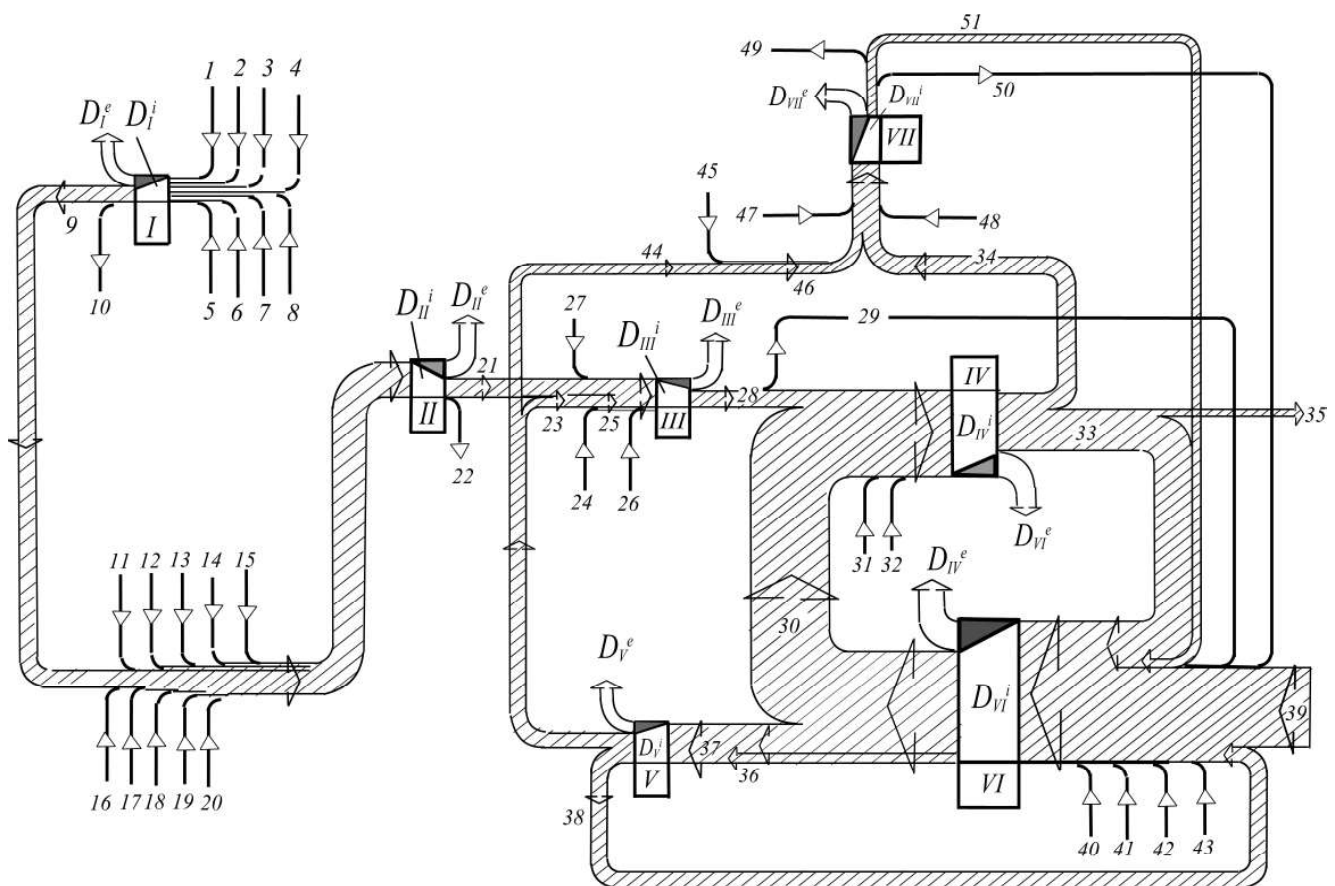


Рисунок 4. Эксергетическая диаграмма Грассмана-Шаргута

Вывод

Использование двухступенчатого ПКТН позволило повысить степень термодинамического совершенства технологии хлебобулочных изделий. Генерация альтернативной энергии за чет утилизации и рекуперации теплоты низкопотенциальных источников в замкнутых термодинамических циклах позволила вернуть в систему часть энергии отработанных теплоносителей и снизить

удельные энергозатраты на 25-30 % и как следствие снизить себестоимость хлебобулочных изделий.

Литература

Алексеев, С. В. (2009). *Исследования и разработки Сибирского отделения РАН в области энергоэффективных технологий*. Новосибирск: Наука.

- Ауэрман, Л. Я. (2005). *Технология хлебопекарного производства*. М.: Профессия.
- Богданова, О. В., Алексеева, Л. В., & Петрова, А. А. (2019). Современное состояние и тенденции развития Российского рынка хлеба и хлебобулочных изделий. *Вестник Тверского государственного университета*, 2, 167-174.
- Богословский, С. В. (2001). *Физические свойства газов и жидкостей*. СПб.: СПбГУАП.
- Бритиков, Д. А., & Шевцов, А. А. (2012). *Энергосбережение в процессах сушки зерновых культур с использованием теплонасосных технологий: Монография*. М.: ДеЛи плюс.
- Бродянский, В. М., Фратшер, В., & Михалек, К. (1988). *Эксергетический метод и его приложения*. М.: Энергоатомиздат.
- Волькенштейн, В. С. (1971). *Скоростной метод определения теплофизических характеристик материалов*. Л.: Энергия.
- Вукалович, М. П. (1967). *Теплофизические свойства воды и водяного пара*. М.: Машиностроение.
- Гаранина, В. В. (2018). Основные тенденции развития хлебопекарной отрасли в современных условиях. *Молодой ученый*, 50, 122-123.
- Горшков, В. Г. (2004). Тепловые насосы. Аналитический обзор. *Справочник промышленного оборудования*, 2, 47-80.
- Долинский, А. А., Драганов, Б. Х., & Морозюк, Т. В. (2007). Альтернативное теплоснабжение на базе тепловых насосов: критерии оценки. *Промышленная теплотехника*, 6, 67-71.
- Елистратов, С. Л. (2009). Оценка границ технико-экономической эффективности применения тепловых насосов. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Энергетика*, 15, 72-78.
- Елистратов, С. Л., & Накоряков, В. Е. (2007а). Передовые схемные решения теплонасосных установок. *Известия Вузов. Проблемы энергетики*, 11-12, 64-75.
- Елистратов, С. Л., & Накоряков, В. Е. (2007б). Экологические аспекты применения парокомпрессионных тепловых насосов. *Известия РАН. Энергетика*, 4, 76-83.
- Елистратов, С. Л., & Накоряков, В. Е. (2008). Энергетическая эффективность комбинированных отопительных установок на базе тепловых насосов с электроприводом. *Промышленная энергетика*, 3, 28-33.
- Закиров, Д. Г., Мухамедшин, М. А., Николаев, А. В., Файзрахманов, Р. А., & Рюмкин, А. А. (2018). Разработка и внедрение технологий использования низкопотенциального тепла тепловыми насосами. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*, 94, 85-90. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10012>
- Зверев, В. Г., Назаренко, В. А., & Теплоухов, А. В. (2010). Идентификация теплофизических характеристик материалов. *Инженерно-физический журнал*, 3, 614-621.
- Остриков, А. Н., Шевцов, А. А., Тертычная, Т. Н., & Сердюкова, Н. А. (2020). Технология получения гранул из шрота семян рапса с использованием двухступенчатого каскадного парокомпрессионного теплового насоса. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 4, 22-30. <https://doi.org/10.36107/spfr.2020.390>
- Пашенко, Л. П., & Жаркова, И. М. (2008). *Технология хлебобулочных изделий*. М.: КолосС.
- Тенденция формирования хлебопекарного рынка России в 2010-2020 гг. (2021). *Хлебопродукты*, 1, 16-17.
- Цыганова, Т. Б. (2014). *Технология и организация производства хлебобулочных изделий*. М.: Академия.
- Шаргут, Я., & Петела, В. (1968). *Эксергия*. М.: Энергия.
- Шахрай, Т. А., Воробьева, О. В., & Викторова, Е. П. (2021). Основные тенденции развития рынка функциональных хлебобулочных изделий. *Новые технологии*, 17(3), 51-58. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-3-51-58>
- Шевцов, А. А., Бунин, Е. С., Ткач, В. В., Сердюкова, Н. А., & Фофонов, Д. И. (2018). Эффективное внедрение парокомпрессионного теплового насоса в линию комплексной переработки семян масличных культур. *Хранение и переработка сельхозсырья*, 1, 60-64.
- Шевцов, А. А., Тертычная, Т. Н., Ткач, В. В., & Сердюкова, Н. А. (2019). Энергосберегающая технология выделения белоксодержащих фракций из масличных семян с применением парожеторного теплового насоса. *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*, 2, 35-40. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-2-35-40>
- Chamoun, M., Rulliere, R., Haberschill, P., & Berail, J. F. (2012). Вода как хладагент для нового высокотемпературного теплового насоса. *Холодильная техника*, 12, 30-35.
- Chicherin, S. (2018a). Low-temperature district heating distributed from transmission-distribution junctions to users: Energy and environmental modeling. *Energy Procedia*, 147, 382-389. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.107>
- Chicherin, S. V. (2018b). Comparison of a district heating system operation based on actual data – Omsk city, Russia, case study. *International Journal of Sustainable Energy*, 38(6), 603-614. <https://doi.org/10.1080/14786451.2018.1548466>

Generation of Alternative Energy in Production Bakery Products with the use of Heat Pump

A.V. Drannikov,

Voronezh State University of Engineering Technologies,
394036, Russia, Voronezh, Revolution Avenue, 19
E-mail: drannikov@list.ru

T. N. Tertychnaya,

Voronezh State Agrarian University named after Peter I",
394087, Russia, Voronezh, st. Michurina, 1
E-mail: tertychnaya777@yandex.ru

A.A. Shevtsov,

Voronezh State University of Engineering Technologies,
394036, Russia, Voronezh, Revolution Avenue, 19
E-mail: shevalol@rambler.ru

N.V. Zasyupkin,

Voronezh State University of Engineering Technologies,
394036, Russia, Voronezh, Revolution Avenue, 19
E-mail: zvnikita24@gmail.com

The development of alternative energy opens up real prospects for the use of heat pumps in various industries. The simultaneous production of heat and cold by means of heat pumps is based on the use of low-potential energy, which is discharged into the atmosphere in significant volumes. In this regard, the introduction of heat pump technologies in the production of bakery products will create conditions for saving energy costs and reduce the impact of negative factors on environmental safety. The paper substantiates the energy-efficient involvement of a two-stage vapor compression heat pump in the technological scheme, which ensures an increase in the thermodynamic perfection of a complex heat technology system. Freon R600a was selected as working fluids for the first stage, R718 water was used for the second stage. The stages are connected via a condenser-evaporator, which is a condenser for the low-pressure stage and an evaporator for the high-pressure stage. The modes of operation of the heat pump for the preparation of high-potential and low-potential heat carrier for the implementation of energy-intensive processes of proofing, baking and cooling of dough pieces have been established. Thermodynamic diagrams for R600a freon and R718 water are built, which clearly reflect the operating cycles of the heat pump stages. In accordance with the methodology of exergy analysis, the technology is divided into seven control surfaces, between which the exchange of material and energy flows is established. According to the method of V.M. Brodyansky. an exergy analysis was carried out, an exergy diagram of Grassmann-Shargut was constructed, indicating an increase in the exergy efficiency of the technology for obtaining bakery products using a heat pump.

Keywords: bakery products, heat pump technology, two-stage steam compression heat pump, energetic analysis.

References

- Alekseenko, S. V. (2009). *Issledovaniya i razrabotki Sibirskogo otdeleniya RAN v oblasti energoefektivnykh tekhnologii* [Research and development of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences in the field of energy efficient technologies]. Novosibirsk: Nauka.
- Auerman, L. Ya. (2005). *Tekhnologiya khlebopekarnogo proizvodstva* [Technology of bakery production]. Moscow: Professiya.
- Bogdanova, O. V., Alekseeva, L. V., & Petrova, A. A. (2019). *Sovremennoe sostoyanie i tendentsii razvitiya Rossiiskogo rynka khleba i khlebobulochnykh izdelii* [Current state and development trends of the Russian market of bread and bakery products].

- Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tver State University], 2, 167-174.
- Bogoslovskii, S. V. (2001). *Fizicheskie svoystva gazov i zhidkostei* [Physical properties of gases and liquids]. S-Petersburg: SPbGUAP.
- Britikov, D. A., & Shevtsov, A. A. (2012). *Energoberezhenie v protsessakh sushki zernovykh kul'tur s ispol'zovaniem teplonasosnykh tekhnologii: Monografiya* [Energy saving in the processes of drying grain crops using heat pump technologies: Monograph]. Moscow: DeLi plyus.
- Brodyanskii, V. M., Fratsher, V., & Mikhalek, K. (1988). *Eksergeticheskii metod i ego prilozheniya* [The exergy method and its applications]. Moscow: Energoatomizdat.
- Dolinskii, A. A., Draganov, B. Kh., & Morozyuk, T. V. (2007). Al'ternativnoe teplosnabzhenie na baze teplovykh nasosov: kriterii otsenki [Alternative heat supply based on heat pumps: evaluation criteria]. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 6, 67-71.
- Elistratov, S. L. (2009). Otsenka granits tekhniko-ekonomicheskoi effektivnosti primeneniya teplovykh nasosov [Assessment of the boundaries of the technical and economic efficiency of the use of heat pumps]. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Energetika* [Bulletin of the South Ural State University. Energy], 15, 72-78.
- Elistratov, S. L., & Nakoryakov, V. E. (2007a). Ekologicheskie aspekty primeneniya parokompressionnykh teplovykh nasosov [Environmental aspects of the use of vapor compression heat pumps]. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy], 4, 76-83.
- Elistratov, S. L., & Nakoryakov, V. E. (2007b). Peredovye skhemnye resheniya teplonasosnykh ustanovok [Advanced circuit solutions for heat pump installations]. *Izvestiya Vuzov. Problemy energetiki* [Izvestiya Universities. Energy Issues], 11-12, 64-75.
- Elistratov, S. L., & Nakoryakov, V. E. (2008). Energeticheskaya effektivnost' kombinirovannykh otopitel'nykh ustanovok na baze teplovykh nasosov s elektroprivodom [Energy efficiency of combined heating systems based on electrically driven heat pumps]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Energy], 3, 28-33.
- Garanina, V. V. (2018). Osnovnye tendentsii razvitiya khlebopekarnoi otrasli v sovremennykh usloviyakh [The main trends in the development of the baking industry in modern conditions]. *Molodoi uchenyi* [Young Scientist], 50, 122-123.
- Gorshkov, V. G. (2004). Teplovye nasosy. Analiticheskii obzor [Heat pumps. Analytical review]. *Spravochnik promyshlennogo oborudovaniya* [Directory of Industrial Equipment], 2, 47-80.
- Ostrikov, A. N., Shevtsov, A. A., Tertychnaya, T. N., & Serdyukova, N. A. (2020). Tekhnologiya polucheniya granul iz shrota semyan rapsa s ispol'zovaniem dvukhstupenchatogo kaskadnogo paro-kompresionnogo teplovogo nasosa [Technology for obtaining granules from rapeseed meal using a two-stage cascade vapor-compression heat pump]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya* [Storage and processing of Farm Products], 4, 22-30. <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.390>
- Pashchenko, L. P., & Zharkova, I. M. (2008). *Tekhnologiya khlebobulochnykh izdelii* [Technology of bakery products]. Moscow: KolosS.
- Shakhrai, T. A., Vorob'eva, O. V., & Viktorova, E. P. (2021). Osnovnye tendentsii razvitiya rynka funktsional'nykh khlebobulochnykh izdelii [The main trends in the development of the market of functional bakery products]. *Novye tekhnologii* [New Technologies], 17(3), 51-58. <https://doi.org/10.47370/2072-0920-2021-17-3-51-58>
- Shargut, Ya., & Petela, V. (1968). *Eksergiya* [Exergy]. Moscow: Energiya.
- Shevtsov, A. A., Bunin, E. S., Tkach, V. V., Serdyukova, N. A., & Fofonov, D. I. (2018). Effektivnoe vnedrenie parokompressionnogo teplovogo nasosa v liniyu kompleksnoi pererabotki semyan maslichnykh kul'tur [Efficient implementation of a vapor compression heat pump in the line of complex processing of oilseeds]. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya* [Storage and processing of Farm Products], 1, 60-64.
- Shevtsov, A. A., Tertychnaya, T. N., Tkach, V. V., & Serdyukova, N. A. (2019). Energoberegayushchaya tekhnologiya vydeleniya beloksoderzhashchikh fraktsii iz maslichnykh semyan s primeneniem paroezhكتورного teplovogo nasosa [Energy-saving technology for the extraction of protein-containing fractions from oilseeds using a steam jet heat pump]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii* [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies], 2, 35-40. <https://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-2-35-40>
- Tendentsiya formirovaniya khlebopekarnogo rynka Rossii v 2010-2020 gg* [The trend in the formation of the Russian bakery market in 2010-2020]. (2021). *Khleboprodukty* [Bakery Products], 1, 16-17.
- Tsyganova, T. B. (2014). *Tekhnologiya i organizatsiya proizvodstva khlebobulochnykh izdelii* [Technology and organization of production of bakery products]. Moscow: Akademiya.
- Vol'kenshtein, B. C. (1971). *Skorostnoi metod opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik materialov* [High-speed method for determining the thermophysical characteristics of materials]. Leningrad: Energiya.

- Vukalovich, M. P. (1967). *Teplofizicheskie svoistva vody i vodyanogo para* [Thermophysical properties of water and steam]. Moscow: Mashinostroenie.
- Zakirov, D. G., Mukhamedshin, M. A., Nikolaev, A. V., Faizrahmanov, R. A., & Ryumkin, A. A. (2018). Razrabotka i vnedrenie tekhnologii ispol'zovaniya nizkopotentsial'nogo tepla teplovymi nasosami [Development and implementation of technologies for the use of low-grade heat by heat pumps]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produktsii rastenievodstva i zhivotnovodstva* [Technologies and Technical Means of Mechanized Production of Crop And Livestock Products], 94, 85-90. <https://doi.org/10.24411/0131-5226-2018-10012>
- Zverev, V. G., Nazarenko, V. A., & Teploukhov, A. V. (2010). Identifikatsiya teplofizicheskikh kharakteristik materialov [Identification of thermophysical characteristics of materials]. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal* [Engineering Physics Journal], 3, 614-621.
- Chamoun, M., Rulliere, R., Haberschill, P., & Berail, J. F. (2012). Voda kak khladagent dlya novogo vysokotemperaturnogo teplovogo nasosa [Water as refrigerant for new high temperature heat pump]. *Kholodil'naya tekhnika* [Refrigeration Technology], 12, 30-35.
- Chicherin, S. (2018a). Low-temperature district heating distributed from transmission-distribution junctions to users: Energy and environmental modeling. *Energy Procedia*, 147, 382-389. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.07.107>
- Chicherin, S. V. (2018b). Comparison of a district heating system operation based on actual data – Omsk city, Russia, case study. *International Journal of Sustainable Energy*, 38(6), 603-614. <https://doi.org/10.1080/14786451.2018.1548466>