

Алгоритм микропроцессорного управления режимами теплонасосной технологии получения сухих CO₂-экстрактов из растительного сырья

Александр А. Шевцов ¹	shevalol@rambler.ru	ID 0000-0003-2599-5692
Яна П. Домбровская ²	yana_dombrovskaya@inbox.ru	ID 0000-0003-2363-7648
Алексей В. Дранников ²	drannikov@list.ru	ID 0000-0002-3060-8688

¹ Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж, Россия

² Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. Широкое применение средств микропроцессорной техники в различных отраслях промышленности и их постоянное эволюционное обновление создают все предпосылки для решения прикладных задач управления тепловыми и тепло-массообменными процессами в технологии получения сухих CO₂-экстрактов из растительного сырья. Эффективное замещение в системах теплоснабжения невозобновляемых источников энергии на теплоту возобновляемых и вторичных энергоресурсов реализовано в теплонасосной технологии получения сухих CO₂-экстрактов, в которой рассматриваются два смежных процесса – сверхкритическая флюидная CO₂-экстракция растительного сырья и распылительная сушка жидкого экстракта с использованием каскадного трехступенчатого теплового насоса. Микропроцессорное управление технологическими режимами достаточно сложной технологии невозможно без средств автоматизации, компьютерного и программного обеспечения. В этой связи предложен алгоритм микропроцессорного управления технологией получения сухих CO₂-экстрактов с учетом накладываемых на управляемые параметры двухсторонних ограничений. Показано, что повышение точности и надежности управления на всех этапах получения сухих CO₂-экстрактов позволяет обеспечить стабилизацию технологических режимов в области допустимых значений, обусловленных получением высококачественного продукта при минимальных энергетических затратах. В работе представлена функциональная схема многоканальной системы управления, включающая двухколонный экстрактор с реверсивными насосами, распылительную сушилку, каскадный трехступенчатый тепловой насос (рабочие тела – фреоны R123, R124 и R1270) и двухсекционный аппарат для конденсации влаги из отработанного воздуха с регенерацией. Предложены расчетные зависимости для определения количества испарившейся влаги и текущего коэффициента теплопередачи, по отклонению которого корректируется соотношение расходов воздуха и тосола. Экспериментальная проверка алгоритма проведена на установке с экстракционным автоклавом (рабочее давление до 500 атм, температура до 250 °С) в производственных условиях НПЦ ВНИИ Комбикормовой промышленности (г. Воронеж). Для трех видов сырья (корни цикория, трава зверобоя, *Spirulina platensis*) определены оптимальные интервалы регулирования технологических параметров при докритической и сверхкритической экстракции. Реализация предложенного алгоритма позволяет снизить удельные энергозатраты на 7–10% за счет рационального использования энергоносителей в замкнутых термодинамических циклах.

Ключевые слова: микропроцессорное управление, алгоритм, теплонасосная технология, сухие CO₂-экстракты.

Algorithm of microprocessor control of heat pump technology modes for obtaining dry CO₂ extracts from plant raw materials

Alexander A. Shevtsov ¹	shevalol@rambler.ru	ID 0000-0003-2599-5692
Iana P. Dombrovskaja ¹	yana_dombrovskaya@inbox.ru	ID 0000-0003-2363-7648
Alexey V. Drannikov ¹	drannikov@list.ru	ID 0000-0002-3060-8688

¹ Air Force Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Voronezh, Russia

² Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. The wide application of microprocessor technology in various branches of industry and its constant evolutionary updating create all the prerequisites for solving applied problems of controlling thermal and heat-mass exchange processes in the technology of obtaining dry CO₂ extracts from plant raw materials. An effective replacement of non-renewable energy sources in heat supply systems with heat from renewable and secondary energy resources is implemented in the heat pump technology for obtaining dry CO₂ extracts, which considers two related processes – supercritical fluid CO₂ extraction of plant materials and spray drying of liquid extract using a cascade three-stage heat pump. Microprocessor control of technological modes of a rather complex technology is impossible without automation tools, computer and software. In this regard, an algorithm for microprocessor control of the technology for obtaining dry CO₂ extracts is proposed, taking into account the bilateral restrictions imposed on the controlled parameters. It is shown that increasing the accuracy and reliability of control at all stages of obtaining dry CO₂ extracts allows for stabilization of process modes in the range of acceptable values, due to obtaining a high-quality product with minimal energy costs. The paper presents a functional diagram of a multichannel control system, including a two-column extractor with reversible pumps, a spray dryer, a cascaded three-stage heat pump (working media - freons R123, R124 and R1270) and a two-section apparatus for condensation of moisture from exhaust air with regeneration. Calculated dependences are proposed for determining the amount of evaporated moisture and the current heat transfer coefficient, according to the deviation of which the ratio of air and antifreeze consumption is adjusted. The experimental verification of the algorithm was carried out on an extraction autoclave unit (operating pressure up to 500 atm, temperature up to 250 °C) in the production conditions of the NPC All-Russian Research Institute of the Feed Industry (Voronezh). Optimal intervals for regulating technological parameters during subcritical and supercritical extraction have been determined for three types of raw materials (chicory roots, St. John's wort, *Spirulina platensis*). The implementation of the proposed algorithm makes it possible to reduce specific energy consumption by 7-10% due to the rational use of energy resources in closed thermodynamic cycles.

Keywords: microprocessor control, algorithm, heat pump technology, dry CO₂ extracts.

Для цитирования

Шевцов А.А., Домбровская Я.П., Дранников А.В. Алгоритм микропроцессорного управления режимами теплонасосной технологии получения сухих CO₂-экстрактов из растительного сырья // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 2. С. 36–43. doi:10.20914/2310-1202-2026-2-36-43

For citation

Shevtsov A.A., Dombrovskaya Ya.P., Drannikov A.V. Algorithm of microprocessor control of heat pump technology modes for obtaining dry CO₂ extracts from plant raw materials. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 2. pp. 36–43. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-2-36-43

Введение

Перерабатывающая промышленность остаётся важнейшим сектором пищевой промышленности, развитие которого основано на результатах наукоёмких исследований пищевой технологии. Важнейшим фактором повышения эффективности производства является снижение энергетических затрат, приходящихся на единицу массы получаемой продукции [1]. Значительные возможности снижения энергозатрат, составляющих до 30% и более от себестоимости готовой продукции, создаются при автоматизации технологических процессов [2, 3] с использованием микропроцессорного управления технологическими параметрами. В настоящее время этот перспективный путь управления находит достойное место в решении актуальных задач энергосбережения [4–7].

Увеличение объёмов сухих CO₂-экстрактов из растительного сырья и снижение их себестоимости представляют собой актуальную задачу, для решения которой разработана многоканальная система управления, позволяющая управлять температурными режимами сверхкритической флюидной CO₂-экстракции растительного сырья и распылительной сушки жидкого экстракта с использованием каскадного трехступенчатого теплового насоса [8, 9]. Составной частью системы является микропроцессор, обеспечивающий приём и первичную обработку информации, полученной от датчиков, выдачу сигналов управления и связь системы с компьютером на основе программно-логического алгоритма управления.

В этой связи сформулирована цель работы: разработка алгоритма многоканального управления технологией получения сухих CO₂-экстрактов по информации о ходе технологических процессов, получаемой с датчиков, и формирование в микропроцессоре выходных сигналов, устанавливающих логическую последовательность подачи управляющих воздействий, обеспечивающих стабилизацию технологических параметров в диапазоне заданных значений.

Методы

Для определения связей между технологическим оборудованием и средствами автоматизации, а также связей между отдельными элементами автоматизации разработана функциональная схема управления технологией получения сухих CO₂-экстрактов (рисунок 1).

Схема содержит колонны экстрактора 1, 2; затворы 3–10; заслонки 39 – 42, 55–62; реверсивные насосы 11, 12, транспортеры 13, 14; газожидкостный сепаратор 15; газгольдер 16; двухступенчатый компрессор 17, рекуперативные теплообменники 18, 21, 54; резервуар для

сжиженного диоксида углерода 19; флюидный насос 20; компрессор 22; распылительная сушилка 23 с форсункой; каскадный трехступенчатый тепловой насос, включающий компрессоры 24, 25, 26 соответственно первой второй и третьей ступени, конденсатор первой ступени 27, испарители-конденсаторы 28, 29; испаритель третьей ступени 30; терморегулирующие вентили 31, 32, 33; резервуар для накопления тосола 34; фильтр тонкой очистки отработанного воздуха 35; двухсекционный аппарат для конденсации влаги из воздуха с секциями 36 и 37; сборник конденсата 38; вентилятор 43; насосы 44, 45, 46; смесители 47, 48, 49; распределители потоков 50, 51, 52, 53; ресивер 63; микропроцессор 64; материальные и тепловые потоки: 1.0 – исходное измельченное растительное сырьё; 1.1 – жидкий экстракт с высоким содержанием CO₂, 1.2 – отработанное растительное сырьё; 1.3 – пары диоксида углерода; 1.4 – сжиженный диоксид углерода; 1.5 – жидкий экстракт без CO₂; 1.6 – сухой экстракт; 2.0 – воздух; 3.0 – конденсат; 4.0 – тосол; 5.0 – фреон R123; 6.0 – фреон R124; 7.0 – фреон R1270 (пропелен), датчики: расхода – FE; температуры – TE; уровня – HE; давления – PE; концентрации – CE.

В двухколонный экстрактор с попеременной работой колонн 1 и 2 в режимах экстракции и разгрузки подается измельченное растительное сырьё и проводится экстракция диоксидом углерода в суб- или сверхкритическом состоянии с циркуляцией диоксида углерода через слой сырья реверсивными насосами 11 и 12 [10, 11].

Отработанное растительное сырьё из колонн 1 и 2 соответственно через затворы 9, 10 выгружается и отводится транспортерами 13, 14. Во время проведения экстракции в колонне 1 исходное растительное сырьё загружается в колонну 2. Отделившиеся пары диоксида углерода из газожидкостного сепаратора 15 направляются в газгольдер 16, а затем подвергаются компрессионному сжатию в двухступенчатом компрессоре 17 и конденсируются их при температуре минус 40 °С в рекуперативном теплообменнике 18 за счет теплообмена с промежуточным хладагентом, в качестве которого используется тосол с температурой минус 45 °С, подготовленного в испарителе 30 третьей ступени каскадного теплового насоса.

Полученный после рекуперативного теплообменника 18 сжиженный диоксид углерода отводится в резервуар 19 и флюидным насосом 20 подается в рекуперативный теплообменник 21, в котором нагревается до суб- или сверхкритического состояния при рекуперативном теплообмене со смесью горячей и холодной воды, подготовленной в смесителе 49.

Жидкий экстракт из газожидкостного сепаратора 15 компрессором 22 под давлением 5 МПа подается в форсунку распылительной сушилки 23. Одновременно в нижнюю часть распылительной сушилки в противотоке подается сушильный агент, в качестве которого используют воздух, нагретый в калорифере 54. Нагревание воздуха происходит при рекуперативном теплообмене с горячей водой, нагретой в конденсаторе 27 первой ступени каскадного теплового насоса.

После распылительной сушки отработанный воздух подвергается тонкой очистке в фильтре 35 до содержания пылевидной фракции не более 30 мг/м³ и проводится его кондиционирование в секции двухсекционного аппарата, работающей в режиме конденсации.

В эту же секцию через распределитель потоков 53 из резервуара 34 насосом 46 подается тосол с температурой минус 10 °С. На охлаждающей поверхности секции, работающей в режиме конденсации, посредством рекуперативного теплообмена отработанный воздух достигает «точку росы», и содержащаяся в нем влага конденсируется в снеговую шубу. При этом секция 37 двухсекционного аппарата для конденсации влаги из воздуха, работающая в режиме регенерации, отключается из контура рециркуляции тосола и размораживается горячей водой, подаваемой насосом 44 через распределитель потоков 50. Образовавшийся конденсат при размораживании снеговой шубы отводится сначала в сборник конденсата 38, а затем насосом 45 в смеситель 49. Переключение секций двухсекционного аппарата для конденсации влаги из отработанного воздуха с режима конденсации на режим регенерации и наоборот осуществляют синхронизированной работой клапанов 39, 40, 41, 42.

Температурные режимы при подготовке горячей воды и тосола обеспечивает каскадный трехступенчатый тепловой насос. С точки зрения минимальной мощности на компрессионное сжатие, что непосредственно связано с экономией энергетических ресурсов, в качестве рабочих тел используются: на первой ступени фреон R123, на второй ступени фреон R124 и на третьей ступени фреон R1270 (пропелен).

Кондиционированный воздух нагревается при рекуперативном теплообмене с горячей водой и вентилятором 43 возвращается в распылительную сушилку 23 с образованием контура рециркуляции.

Отработанную смесь горячей и холодной воды после рекуперативного теплообменника 21 и воды после секции 36 или 37, работающей в режиме регенерации смешиваются в смесителях 47, 48 и возвращаются в конденсатор 27 третьей ступени каскадного трехступенчатого теплового насоса в режиме замкнутого цикла.

Распределение потоков горячей воды после конденсатора 27 осуществляется с помощью распределителей потоков 50 и 51, распределение отработанного воздуха после фильтра тонкой очистки в секции 36, 57 распределителем 52 и тосола после резервуара 34 распределителем 53.

Полученные по предлагаемой технологии сухие СО₂-экстракты в виде порошков хорошо растворяются в воде, характеризуются вяжущими, желчегонными, противомикробными, дезинфицирующими, общеукрепляющими эффектами [9].

Информация о ходе технологических процессов при получении сухих СО₂-экстрактов из растительного сырья с помощью датчиков передается в микропроцессор 64, который по заложенному в него программно-логическому алгоритму осуществляет оперативное управление технологическими параметрами с учетом накладываемых на них ограничений, обусловленных рациональным использованием энергоносителей и снижением удельных энергозатрат. В установившемся режиме функционирования технологии микропроцессор непрерывно измеряет:

- количество растительного сырья, загружаемого в колонны экстрактора 1 и 2, воздействием на его расход;
- расход и температуру диоксида углерода, подаваемого флюидным насосом 20 в колонну экстрактора, работающую в режиме экстракции;
- частоту изменения направления движения жидкого диоксида углерода в режиме реверсивной циркуляции через слой измельченного сырья реверсивными насосами 11, 12 в колоннах экстрактора, работающих в режиме экстракции при закрытых затворах 3–10;
- продолжительность экстракции;
- расходы твердой фракции (отработанного растительного сырья), отводимой через затворы 9, 10 из колонн экстрактора 1, 2, работающих в режиме выгрузки, и жидкого экстракта с содержанием СО₂, отводимого в сепаратор 15;
- расход отделившихся паров диоксида углерода от жидкого экстракта, отводимого из газгольдера 16;
- давление и температуру сжижения диоксида углерода, подаваемого в сборник 19;
- давление жидкого экстракта без СО₂, создаваемого форсункой распылительной сушилки 23;
- расход и влажность сухого экстракта, отводимого из распылительной сушилки 23;
- влагосодержание и расход воздуха до и после распылительной сушилки 23;
- температуру конденсации влаги из воздуха в секции 36 или 37 двухсекционного аппарата для конденсации влаги, работающей в режиме конденсации;

- давление компрессионного сжатия рабочих тел в первой, второй и третьей ступени каскадного трехступенчатого теплового насоса;
- давление рабочих тел после дросселирования при истечении через терморегулирующие вентили первой 31, второй 32 и третьей 33 ступени каскадного трехступенчатого теплового насоса;
- температуру конденсации рабочего тела в конденсаторе 27 первой ступени, температуру рабочих тел в конденсаторах-испарителях второй и третьей ступенях 28 и 29, температуру кипения рабочего тела в испарителе 30 третьей ступени каскадного трехступенчатого теплового насоса;

- температуру и расход тосола, подаваемого из испарителя третьей ступени 30 в рекуперативный теплообменник 18 на сжижение диоксида углерода;
- температуру и расход горячей воды, подаваемой насосом 44 в рекуперативный теплообменник 21 на нагревание сжиженного диоксида углерода, на нагревание кондиционированного воздуха в рекуперативный теплообменник 54 и на размораживание секции 36 или 37 двухсекционного аппарата для конденсации влаги, работающей в режиме регенерации.

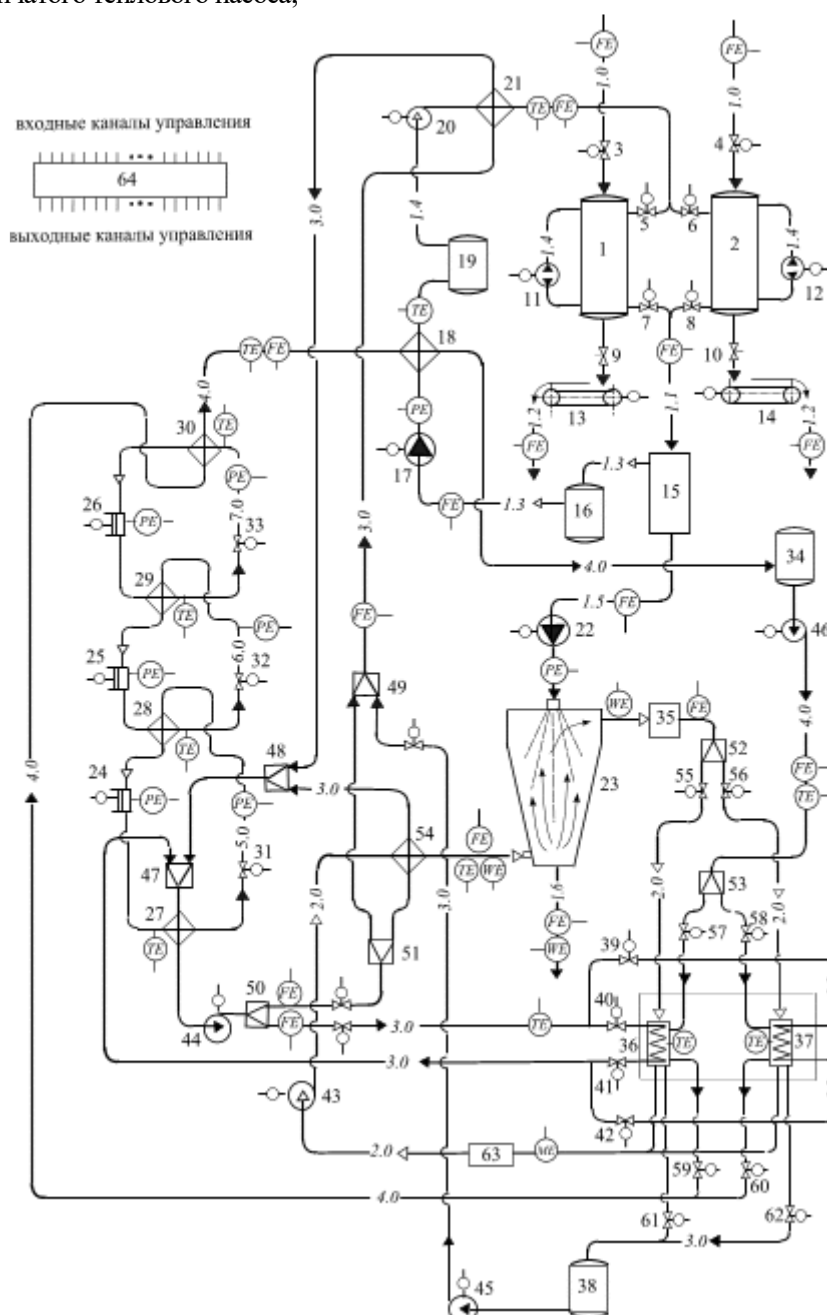


Рисунок 1. Функциональная схема микропроцессорного управления теплонасосной технологией получения сухих CO₂-экстрактов из растительного сырья
 Figure 1. Functional diagram of microprocessor control of heat pump technology for obtaining dry CO₂ extracts from plant materials

По измеренным параметрам микропроцессор осуществляет:

- регулирование расхода и давления диоксида углерода в субкритическом или в сверхкритическом состоянии при наполнении колонн двухколонного экстрактора в зависимости от объема загруженного измельченного растительного сырья воздействием на мощность привода флюидного насоса 20;

- синхронизированную работу затворов 3 – 10 с переключением колонн 1, 2 с режима экстракции на режим выгрузки отработанного сырья;

- программированное по времени управление режимом реверсивной циркуляции диоксида углерода через слой измельченного растительного сырья в колоннах двухколонного экстрактора 1 и 2, работающих в режиме экстракции, с изменением направления движения CO₂ реверсивными насосами 11 и 12;

- регулирование температуры и расхода воздуха, подаваемого на сушку, в зависимости от расхода жидкого экстракта без CO₂, поступающего в распылительную сушилку, с коррекцией по влажности сухого экстракта;

- стабилизацию давления жидкого экстракта в форсунке распылительной сушилки;

По измеренным значениям влагосодержания воздуха до и после распылительной сушилки 23 микропроцессор непрерывно определяет количество испарившейся влаги из жидкого экстракта по формуле:

$$U = (x_{\text{вых}} - x_{\text{вх}}) \rho_{\text{св}} V,$$

где $x_{\text{вх}}$, $x_{\text{вых}}$ – влагосодержание воздуха на входе и выходе из распылительной сушилки, кг/кг; ρ – плотность воздуха, кг/м³; V – объемный расход воздуха, м³/ч, и по количеству испарившейся влаги устанавливает расход тосола, подаваемого на конденсацию водяных паров из воздуха в секцию двухсекционного аппарата 36 или 37, работающую в режимах конденсации.

Процесс конденсации влаги сопровождается увеличением снеговой шубы на охлаждающей поверхности секции двухсекционного аппарата 36 или 37, работающей в режиме конденсации, и снижением коэффициента теплопередачи от тосола к воздуху.

По измеренным значениям расхода и температуры воздуха на входе и выходе из секции двухсекционного аппарата для конденсации влаги, работающей в режиме конденсации, а также температуры тосола на входе в эту секцию микропроцессор вычисляет текущее значение коэффициента теплопередачи по формуле:

$$k = \frac{Q}{F \Delta t_{\text{п}}},$$

где $Q = V c \rho (t_1 - t_2)$ – количество теплоты, подаваемой воздухом в секцию двухсекционного аппарата для конденсации влаги, работающей в режиме конденсации, кДж/ч; c , ρ – средние значения теплоемкости, кДж/(кг·К), плотности, кг/м³, воздуха; V – объемный расход воздуха, м³/ч; F – площадь охлаждающей поверхности секции двухсекционного аппарата для конденсации влаги, работающей в режиме конденсации, м²; $\Delta t_{\text{ср}} = (t_1 - t_2) / \ln[(t_1 - t_3) / (t_2 - t_3)]$ – среднелогарифмический температурный напор, °С; t_1 , t_2 – температура воздуха соответственно на входе и выходе из секции двухсекционного аппарата для конденсации влаги, работающей в режиме конденсации, °С; t_3 – температура тосола на входе в секцию двухсекционного аппарата для конденсации влаги, работающей в режиме конденсации, °С,

и вырабатывает сигнал отклонения текущего значения коэффициента теплопередачи от заданного значения, по которому корректирует соотношение расходов «воздух – тосол» воздействием на расхода тосола.

При превышении влагосодержания кондиционированного воздуха значения 0,005 кг/кг микропроцессор посредством синхронизированной работы заслонок 55 – 62 переключает секцию аппарата для конденсации влаги из воздуха, работающую в режиме конденсации, на режим регенерации, с одновременной подачей горячей воды на размораживание секции, работающей в режиме регенерации, и отводом образовавшегося конденсата в сборник 38.

Подготовленный кондиционированный воздух направляют в ресивер 63, а затем вентилятором 45 подают сначала в рекуперативный теплообменник 54 и затем в распылительную сушилку в режиме замкнутого цикла.

Микропроцессор стабилизирует:

- температуру горячей воды при рекуперативном теплообмене с конденсируемыми парами фреона R123 в конденсаторе 27 первой ступени каскадного трехступенчатого теплового насоса;

- устанавливает заданные значения:

- температуры конденсации паров фреона R123 и кипения фреона R124 в испарителе-конденсаторе 28 первой-второй ступени;

- температуры конденсации паров фреона R124 и кипения фреона R1270 в испарителе-конденсаторе 29 второй-третьей ступени;

- температуру тосола, получаемого при рекуперативном теплообмене с кипящим фреоном R 1270 в испарителе третьей ступени каскадного трехступенчатого теплового насоса.

Результаты и обсуждение

Предлагаемый алгоритм управления технологией получения сухих CO₂-экстрактов из растительного сырья прошел производственную проверку на экспериментальном оборудовании в производственных условиях НПЦ ВНИИ Комбикормовой промышленности (г. Воронеж).

Выполнены экспериментальные исследования в установке для экстракции в суб- и сверхкритической среде фирмы ООО «ЛТД», содержащей экстракционный автоклав со следующими техническими характеристиками:

Рабочее давление (атм.) до	500;
Рабочая температура (°C) до	250;
Материал (из которого выполнен экстрактор) нерж. сталь	316L;
Внутренний объём (л)	1,5;
Внутренний диаметр (мм)	106;
Внутренняя высота (мм)	180;
Материал уплотнений	политетрафторэтилен (тефлон);
Используемые флюиды	сверхкритический диоксид углерода

Исследования процесса суб- и сверхкритической CO₂-экстракции проводили с измельченным растительным сырьем на мельнице-дезинтеграторе МД-2, которое помещали в экстракционный картридж экстракционного сосуда. После установки картриджа в автоклав и закрытия крышки запускали в работу компрессор высокого давления с регулируемым приводом серии FROSP КВД и нагнетали суб- или сверхкритический диоксид углерода в экстракционный сосуд, где он взаимодействовал с измельченным растительным сырьем и растворял экстрагируемые вещества. Режим экстракции в жидком или флюидном состоянии CO₂ задавался перед

началом работы. Далее суб- или сверхкритический диоксид углерода с растворенными в нем экстрагируемыми веществами направлялся в сепаратор, в котором диоксид углерода менял свое агрегатное состояние, т. е. переходил в газовую фазу, газ отделялся от экстракта и направлялся в газгольдер. Отделившийся экстракт накапливался в нижней части автоклава и сливался в заранее подготовленную емкость. В процессе эксперимента по счетчику определяли затраты электроэнергии на процесс CO₂-экстракции (таблица 1).

Управление технологией реализовано с помощью следующих контрольно-измерительных приборов и средств автоматизации.

Для регулирования расходов воздуха, воды и тосола использовались регуляторы фирмы Bürkert, в которых регулирующий клапан служит дроссельным участком. От разности давлений на клапане, заданной плотности и температуры среды определялся номинальный расход. Характеристики потока с датчика передавались в микропроцессор, который регулировал объемный расход, изменяя ход регулирующего клапана.

Для регулирования температурно-влажностных режимов тепловых и теплообменных процессов использовались программные задатчики ОВЕН МПР51-Щ4, к входам которых подключались датчики термометры сопротивления ТСМ/ТСП, установленные в потоках энергоносителей и в рабочих объемах аппаратов, а выход подключался к микропроцессору, который в свою очередь управлял электрическими исполнительными механизмами серии МЭО.

Контроль и регулирование давления CO₂ в потоках осуществлялось регулятором РДГК-10М фирмы TechnoComGroup.

Таблица 1.

Параметры процессов экстракции и сушки растительного сырья

Table 1.

Parameters of extraction and drying processes of plant raw materials

Растительное сырье	Способ экстракции	Режимы экстракции					Режимы распылительной сушки					k , Вт/(м ² ·С)	Выход экстракта, %	Энергозатраты, кДж/кг	
		$d_{эв}$, мм	T , °С	P , МПа	τ , мин	$\tau_{р}$, мин	$P_{ф}$, МПа	G , м ³ /ч	v_0 , м/с	$T_в$, °С	$x_в$, г/кг				W , %
Корни цикория	I	2,0	10–12	10,0–10,4	60	5	0,3	4,1–4,2	0,4–0,5	58–60	5,0	1,8–2,4	600–650	20,2	310000
		4,0	14–15	12,2–13,0	50	5	0,2	4,0–4,1	0,2–0,3	55–57	4,8	2,2–2,5	650–700	22,3	308000
	II	6,0	39–41	20,1–20,5	3	3	0,4	4,1–4,2	0,4–0,5	55–56	4,9	1,7–2,0	750–800	24,5	264000
		8,0	49–51	38,5–40,0	23	3	0,5	4,1–4,2	0,4–0,5	55–57	5,0	2,7–3,0	650–700	25,2	288000
Трава зверобоя	I	0,25	10–11	10,0–10,5	60	5	0,3	4,1–4,2	0,3–0,4	58–60	5,0	1,5–1,8	600–650	1,5	310200
		0,50	20–21	12,1–13,0	40	5	0,2	4,0–4,1	0,3–0,4	55–57	4,8	1,6–1,9	750–800	1,8	332500
	II	0,50	40–41	15,5–16,0	18	3	0,4	4,0–4,1	0,2–0,3	55–56	4,9	2,7–3,0	650–700	2,8	360100
		1,00	49–50	38,0–40,0	15	3	0,5	4,1–4,2	0,4–0,5	55–57	5,0	2,9–3,0	750–800	3,2	360100
	I	0,25	9–10	10,0–10,5	35	5	0,3	4,1–4,2	0,3–0,4	58–60	5,0	2,2–2,5	650–700	0,05	450520
		0,50	14–15	12,1–13,0	40	5	0,2	4,0–4,1	0,3–0,4	55–57	4,8	1,7–2,0	650–700	0,07	520340
II	0,50	39–40	15,5–16,0	18	3	0,4	4,0–4,1	0,2–0,3	55–56	4,9	2,7–3,0	750–800	0,08	870000	
	1,00	49–50	20,0–20,5	15	3	0,5	4,1–4,2	0,2–0,3	55–57	5,0	1,5–1,8	650–700	0,09	950000	

Примечание: I – докритическая экстракция; II – сверхкритическая экстракция
Note: I – subcritical extraction; II – supercritical extraction

Оптимальные интервалы регулирования управляемых технологических параметров при получении сухих CO₂-экстрактов из различного растительного сырья определены экспериментально (таблица 1).

Заключение

Предлагаемый алгоритм микропроцессорного управления технологией получения сухих CO₂-экстрактов из растительного сырья:

- стабилизирует параметры в области рациональных значений, обеспечивающих максимальный выход сухих CO₂-экстрактов из

растительного сырья за счет точности и надежности управления технологическими параметрами;

- сужает интервал отклонения параметров теплоносителей, подготовленных в каскадном трехступенчатом парокompрессионном тепловом насосе, от заданных интервалов значений, а следовательно, стабилизирует режимы работы основного и вспомогательного оборудования в оптимальной области их функционирования;

- позволяет снизить удельные энергозатраты на 7–10% за счет рационального использования энергоносителей в замкнутых термодинамических циклах.

Литература

- 1 Жакова К.И., Миронова Н.П. Современные тенденции развития технологий пищевых производств // *Пищевая промышленность: наука и технологии*. 2022. Т. 15. № 1. С. 6–12.
- 2 Троценко В.В., Федоров В.К., Забудский А.И., Комендантов В.В. Системы управления технологическими процессами и информационные технологии: учебное пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2020. 136 с.
- 3 Курочкин А.А., Шабурова Г.В., Гордеев А.С., Завражнов А.И. Оборудование и автоматизация перерабатывающих производств: учебник для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2020. 586 с.
- 4 Гуров В.В. Микропроцессорные системы: учебник. М.: ИНФРА-М, 2016. 336 с.
- 5 Haleem A., Javaid M., Singh R.P. et al. Hyperautomation for the enhancement of automation in industries // *Sensors International*. 2021. V. 2. P. 100124. doi: 10.1016/j.sintl.2021.100124
- 6 Jamilov S., Ergashev O., Abduvaxobov M. et al. Improving the temperature resistance of traction electric motors using a microprocessor control system for modern locomotives // *E3S Web of Conferences*. 2023. V. 401. P. 03030. doi: 10.1051/e3sconf/202340103030
- 7 Polyuschenkov I.S. Model-based design of microprocessor control system for direct current servo electric drive // *Russian Electrical Engineering*. 2023. V. 94. № 2. P. 84–90. doi: 10.3103/S1068371223020083
- 8 Кудряшов В.С., Иванов А.В., Алексеев М.В., Рязанцев С.В. Основы программирования микропроцессорных контроллеров в цифровых системах управления технологическими процессами: учебное пособие. Воронеж: ВГУИТ, 2014. 144 с.
- 9 Пат. 2810005 С1 Российская Федерация, МПК С11В 9/00, С11В 1/10. Способ получения сухих CO₂-экстрактов из растительного сырья и установка для его осуществления / Домбровская Я.П., Дранников А.В., Шевцов А.А.; заявитель и патентообладатель ВГУИТ. № 2023105935; заявл. 14.03.2023; опублик. 21.12.2023. Бюл. № 36.
- 10 Пат. 2830883 С1 Российская Федерация, МПК С11В 1/10. Способ управления технологией получения сухих CO₂-экстрактов из растительного сырья / Дранников А.В., Шевцов А.А., Домбровская Я.П.; заявитель и патентообладатель ВГУИТ. № 2024109219; заявл. 05.04.2024; опублик. 26.11.2024. Бюл. № 33.
- 11 Касьянов Г.И. Техника и технология использования диоксида углерода в суб- и сверхкритическом состоянии // *Вестник ВГУИТ*. 2014. № 1. С. 130–135.
- 12 Касьянов Г.И. Эффективность использования диоксида углерода в качестве экстрагента // *Повышение качества и безопасности пищевых продуктов: мат. X Всерос. науч.-практ. конф.* 2020. С. 102–105.
- 13 Andriychuk V., Kostyk L., Filiuk Y. et al. Microprocessor Control of the Electric Drive of Variable Radiation Installation and Ensuring of Operation Reliability // *Science and Innovation*. 2024. V. 20. № 5. P. 62–70. doi: 10.15407/scine20.05.062
- 14 Ahmed Z., Hassan W.H., Alizadeh A.A. et al. Machine learning-based exergy and environmental optimization of a photovoltaic–thermal-assisted CO₂ ejector heat pump // *The European Physical Journal Plus*. 2025. V. 140. № 12. P. 1217. doi: 10.1140/epjp/s13360-024-05883-3
- 15 Peng C., Zeng Z., Dang C. et al. Energy and environmental performance analysis of solar-assisted heat pump drying system using natural working fluid carbon dioxide // *Drying Technology*. 2025. V. 43. № 4. P. 771–783. doi: 10.1080/07373937.2024.2445624
- 16 Guo Y., Wang Y., Liu Y. et al. Optimizing discharge pressure control in carbon dioxide heat pumps using particle swarm optimization // *Applied Thermal Engineering*. 2025. V. 260. P. 125008. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.125008
- 17 Akram H., Zafar H., Abbasi B.H. The chicory root (*Cichorium intybus* var. *sativum*) frontier: pioneering biotechnological advancements // *Phytochemistry Reviews*. 2025. P. 1–25. doi: 10.1007/s11101-025-10123-8
- 18 Kostrzewa D., Mazurek B., Kostrzewa M., Józwick E. Carotenoids and Fatty Acids Obtained from Paprika *Capsicum annum* by Supercritical Carbon Dioxide and Ethanol as Co-Extractant // *Molecules*. 2023. V. 28. № 14. P. 5438. doi: 10.3390/molecules28145438
- 19 Duda Ł., Kłosiński K.K., Budryn G. et al. Medicinal use of chicory (*Cichorium intybus* L.) // *Scientia Pharmaceutica*. 2024. V. 92. № 2. P. 31. doi: 10.3390/scipharm92020031
- 20 Pattiram P.D., Abas F., Suleiman N. et al. Edible oils as a co-extractant for the supercritical carbon dioxide extraction of flavonoids from propolis // *PLoS ONE*. 2022. V. 17. № 4. P. e0266673. doi: 10.1371/journal.pone.0266673


References

- 1 Zhakova K.I., Mironova N.P. Modern trends in the development of food production technologies. *Food Industry: Science and Technology*. 2022. vol. 15. no. 1. pp. 6–12. (in Russian).
- 2 Trotsenko V.V., Fedorov V.K., Zabudsky A.I., Komendantov V.V. Control systems of technological processes and information technologies: a textbook for universities. 2nd ed., revised and expanded. Moscow: Yurayt, 2020. 136 p. (in Russian).
- 3 Kurochkin A.A., Shaburova G.V., Gordeev A.S., Zavrazhnov A.I. Equipment and automation of processing industries: a textbook for universities. 2nd ed., revised and expanded. Moscow: Yurayt, 2020. 586 p. (in Russian).


- 4 Gurov V.V. Microprocessor systems: a textbook. Moscow: INFRA-M, 2016. 336 p. (in Russian).
- 5 Haleem A., Javid M., Singh R.P. et al. Hyperautomation for the enhancement of automation in industries. *Sensors International*. 2021. vol. 2. article 100124. doi: 10.1016/j.sintl.2021.100124.
- 6 Jamilov S., Ergashev O., Abduvaxobov M. et al. Improving the temperature resistance of traction electric motors using a microprocessor control system for modern locomotives. *E3S Web of Conferences*. 2023. vol. 401. article 03030. doi: 10.1051/e3sconf/202340103030.
- 7 Polyuschenkov I.S. Model-based design of microprocessor control system for direct current servo electric drive. *Russian Electrical Engineering*. 2023. vol. 94. no. 2. pp. 84–90. doi: 10.3103/S1068371223020083.
- 8 Kudryashov V.S., Ivanov A.V., Alekseev M.V., Ryazantsev S.V. Fundamentals of programming of microprocessor controllers in digital process control systems: a textbook. Voronezh: VSUET, 2014. 144 p. (in Russian).
- 9 Patent no. 2810005 C1, Russian Federation, IPC C11B 9/00, C11B 1/10. Method for obtaining dry CO₂ extracts from plant raw materials and installation for its implementation. Dombrovskaya Ya.P., Drannikov A.V., Shevtsov A.A.; applicant and patent holder VSUET. no. 2023105935; filed 14.03.2023; publ. 21.12.2023. Bull. no. 36. (in Russian).
- 10 Patent no. 2830883 C1, Russian Federation, IPC C11B 1/10. Method for controlling the technology of obtaining dry CO₂ extracts from plant raw materials. Drannikov A.V., Shevtsov A.A., Dombrovskaya Ya.P.; applicant and patent holder VSUET. no. 2024109219; filed 05.04.2024; publ. 26.11.2024. Bull. no. 33. (in Russian).
- 11 Kasyanov G.I. Technique and technology of using carbon dioxide in sub- and supercritical state. *Bulletin of VSUET*. 2014. no. 1. pp. 130–135. (in Russian).
- 12 Kasyanov G.I. Efficiency of using carbon dioxide as an extractant. In: Improving the quality and safety of food products: Proceedings of the X All-Russian Scientific and Practical Conference. 2020. pp. 102–105. (in Russian).
- 13 Andriychuk V., Kostyk L., Filiuk Y. et al. Microprocessor Control of the Electric Drive of Variable Radiation Installation and Ensuring of Operation Reliability. *Science and Innovation*. 2024. vol. 20. no. 5. pp. 62–70. doi: 10.15407/scine20.05.062.
- 14 Ahmed Z., Hassan W.H., Alizadeh A.A. et al. Machine learning-based exergy and environmental optimization of a photovoltaic–thermal-assisted CO₂ ejector heat pump. *The European Physical Journal Plus*. 2025. vol. 140. no. 12. article 1217. doi: 10.1140/epjp/s13360-024-05883-3.
- 15 Peng C., Zeng Z., Dang C. et al. Energy and environmental performance analysis of solar-assisted heat pump drying system using natural working fluid carbon dioxide. *Drying Technology*. 2025. vol. 43. no. 4. pp. 771–783. doi: 10.1080/07373937.2024.2445624.
- 16 Guo Y., Wang Y., Liu Y. et al. Optimizing discharge pressure control in carbon dioxide heat pumps using particle swarm optimization. *Applied Thermal Engineering*. 2025. vol. 260. article 125008. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.125008.
- 17 Akram H., Zafar H., Abbasi B.H. The chicory root (*Cichorium intybus* var. *sativum*) frontier: pioneering biotechnological advancements. *Phytochemistry Reviews*. 2025. pp. 1–25. [Online first]. doi: 10.1007/s11101-025-10123-8.
- 18 Kostrzewa D., Mazurek B., Kostrzewa M., Józwick E. Carotenoids and Fatty Acids Obtained from Paprika Capsicum annum by Supercritical Carbon Dioxide and Ethanol as Co-Extractant. *Molecules*. 2023. vol. 28. no. 14. article 5438. doi: 10.3390/molecules28145438.
- 19 Duda Ł., Kłosiński K.K., Budryn G. et al. Medicinal use of chicory (*Cichorium intybus* L.). *Scientia Pharmaceutica*. 2024. vol. 92. no. 2. article 31. doi: 10.3390/scipharm92020031.
- 20 Pattiram P.D., Abas F., Suleiman N. et al. Edible oils as a co-extractant for the supercritical carbon dioxide extraction of flavonoids from propolis. *PLoS ONE*. 2022. vol. 17. no. 4. article e0266673. doi: 10.1371/journal.pone.0266673.

Сведения об авторах


Александр А. Шевцов д.т.н., профессор, Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина, г. Воронеж, Россия, shevalol@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2599-5692>

Яна П. Домбровская к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, yana_dombrovskaya@inbox.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2363-7648>

Алексей В. Дранников д.т.н., профессор, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, drannikov@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3060-8688>

Вклад авторов


Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов


Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors


Alexander A. Shevtsov Dr. Sci. (Engin.), professor, Air Force Academy named after Prof. N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin, Voronezh, Russia, shevalol@rambler.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2599-5692>

Iana P. Dombrovskaja Cand. Sci. (Engin.), assistant professor, machines and apparatus of food technologies department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, yana_dombrovskaya@inbox.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-2363-7648>

Alexey V. Drannikov Dr. Sci. (Engin.), professor, machines and apparatus of food technologies department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, drannikov@list.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-3060-8688>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 15/12/2025	После редакции 13/01/2026	Принята в печать 23/02/2026
Received 15/12/2025	Accepted in revised 13/01/2026	Accepted 23/02/2026