

УДК 664.3:662.767

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЖИДКОГО ДИМЕТИЛОВОГО ЭФИРА КАК ЭКСТРАГЕНТА



PROSPECTS FOR USE OF LIQUID DIMETHYL ETHER AS EXTRAGENT

Касьянов Геннадий Иванович

Кубанский государственный технологический университет
g_kasjanov@mail.ru

Кисурин Иван Владимирович

ООО «Аэрозолекс»,
г. Дзержинск, Нижегородская область

Евсеева Ирина Львовна

ООО «Аэрозолекс»,
г. Дзержинск, Нижегородская область

Аннотация. Теория и практика использования сжиженных и сжатых газов в качестве экстрагентов активно развиваются в последние годы. Самым популярным растворителем эфирных и жирных масел считается жидкий и сверхкритический диоксид углерода. Однако узкая селективность CO_2 по отношению к липидной части растительного сырья ограничивала его применение. Высокой экстракционной способностью обладают углеводородные жидкие газы бутан и пропан, однако широкое использование их в роли экстрагентов ограничено из-за пожаровзрывоопасности и наличия примесей. Из большого числа экстракционных сжиженных газов наибольшее внимание привлекает прозрачный жидкий диметиловый эфир, не имеющий вкуса, с низкой диэлектрической проницаемостью, низкой температурой кипения, низким рабочим давлением 0,5 МПа и разрешенный для обработки пищевого сырья. Сотрудники отечественных фирм «Щекиназот» и «Аэрозолекс» получили жидкий диметилэфир (ДМЭ) высокой чистоты. Целью исследований является оценка перспектив использования жидкого ДМЭ для извлечения ценных компонентов из растительного и животного сырья. Разработана экстракционная установка для работы с диметилэфиром в качестве экстрагента, установлены температурные режимы экстракции, оценен качественный состав полученного ДМЭ-экстракта облепихи. Полученные результаты подтвердили целесообразность использования жидкого диметилового эфира как экстрагента. Для снижения порога пожаровзрывоопасности, авторы предложили использовать бинарный экстрагент ДМЭ/ CO_2 .

Ключевые слова: сжиженные газы, диметилэфир, экстрагент, ДМЭ-экстракт, облепиха.

Kasyanov Gennady Ivanovich

Kuban State Technological University
g_kasjanov@mail.ru

Kisurin Ivan Vladimirovich

Aerosolex LLC,
Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod Region

Evseeva Irina Lvovna

Aerosolex LLC,
Dzerzhinsk, Nizhny Novgorod Region

Annotation. The theory and practice of using liquefied and compressed gases as extractants have been actively developed in recent years. The most popular solvent for essential and fatty oils is liquid and supercritical carbon dioxide. However, the narrow selectivity of CO_2 with respect to the lipid part of the plant material limited its use. Hydrocarbon liquid gases butane and propane have a high extraction ability, however, their wide use as extractants is limited due to the fire and explosion hazard and the presence of impurities. Of the large number of extraction liquefied gases, the most attention is drawn to transparent liquid dimethyl ether, which has no taste, low dielectric constant, low boiling point, low operating pressure of 0.5 MPa and is approved for processing food raw materials. Employees of domestic firms «Shchekinazot» and «Aerosolex» received liquid dimethyl ether (DME) of high purity. The purpose of the research is to evaluate the prospects for using liquid DME to extract valuable components from plant and animal raw materials. An extraction unit for working with dimethyl ether as an extractant has been developed, the temperature regimes of extraction have been established, and the qualitative composition of the resulting sea buckthorn DME extract has been evaluated. The results obtained confirmed the expediency of using liquid dimethyl ether as an extractant. To reduce the fire and explosion threshold, the authors proposed the use of a binary extractant DME/ CO_2 .

Keywords: liquefied gases, dimethyl ether, extractant, DME extract, sea buckthorn.

Т рудами российских и зарубежных ученых и специалистов научно обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность и высокая эффективность совершенствования технологий получения поликомпонентных пряно-ароматических пищевых добавок со сбалансированным химическим составом путем поэтапной экстракции газами в суб- и сверхкритическом состоянии. При экстракции различных веществ из сложных биополимерных матриц, к которым относится природное растительное сырье, используемое в пищевой и фармацевтической промышлен-

ности – цветы, травы, ягоды, корнеплоды и др. – происходит не только выделение необходимого отдельного химически чистого вещества, но и одновременная экстракция нескольких веществ, близких по сродству к применяемому типу растворителя. При этом каждое из экстрагируемых веществ несомненно влияет на эффективность процесса экстракции всех остальных. Процесс совместного выделения нескольких веществ из сложного химического соединения с помощью определенного растворителя называют соэкстракцией. Очевидно, для дальнейшего совершенствования процессов экстракции важно уметь учитывать эффекты соэкстракции, что позволяет глубже понять механизм экстракции и дает возможность управлять этим процессом в заданном направлении.

Идеология использования сжиженных инертных и углеводородных газов, перегретых относительно показателей окружающей среды, для извлечения липофильных соединений из растительного сырья, оказалась плодотворной и получила промышленное внедрение. Этому признанию предшествовало почти 50 лет интенсивных теоретических, лабораторных и опытно-промышленных исследований. Наши отечественные и зарубежные оппоненты всячески противились применению сжиженных газов в качестве экстрагентов, приводя доводы, что не нужно усложнять оборудование и просто использовать в качестве растворителей жирных масел экстракционный бензин или гексан. И только теперь пришло понимание уникальных преимуществ сжиженных газов.

Ученые действующей при КубГТУ научно-педагогической школы «Теория и практика обработки сельскохозяйственного сырья сжиженными и сжатыми газами», выполнили значительный цикл исследований по получению и применению экстрактов, извлекаемых из животного и растительного сырья с помощью жидкого диоксида углерода [1]. Получены натуральные пищевые добавки из двух видов базилика [2]. Анализ современных технологий экстракции и основных факторов, влияющих на процесс экстракции представлен в работах [3–5]. Уделено внимание конструкции экстракционного модуля [6]. Разработана технология извлечения антиоксидантов из растительного сырья методом газожидкостной CO_2 -экстракции [7]. Проанализирована эффективность процесса CO_2 -экстракции с позиций системного и экономического анализа [8]. Жидкий и сверхкритический диоксид углерода считается эффективным растворителем эфирных и жирных масел [9].

Совместно с узбекскими специалистами проанализировано функционирование цифровой системы управления процессом газожидкостной экстракции [10]. Организован выпуск пищевых добавок в форме CO_2 -экстрактов кориандра, лаврового листа и тмина [11]. Способом субкритической CO_2 -экстракции получены добавки из актинидии, облепихи, унаби и шиповника [12]. Выявлен синергизм пищевой и химической технологии в производстве экстрактов на автоматизированной CO_2 -установке [13]. Разработаны способы оптимизации работы CO_2 -экстракционной установки [14]. Опубликованы режимы получения ДМЭ-экстрактов из ромашки обыкновенной при 70 °С в течение 6 ч [15]. Усовершенствована система управления производством на экстракционном заводе ООО «Компания Караван» по производству CO_2 -экстрактов [16]. Разработаны автоматизированные системы управления процессом CO_2 -экстракции [17].

Изучение химического состава каротиноидов из плодов облепихи проводилось методом тонкослойной хроматографии [18]. Выполнен обзор использования диметилового эфира в качестве органического растворителя для экстракции биомассы на биоперерабатывающих заводах будущего [19]. Представлен механизм отделения и удаления воды из обезвоженного осадка с использованием L-DME для растворения гидрофильного органического вещества [20]. Результаты исследований подтверждают, что метод Subfdme является многообещающим инструментом для извлечения γ -оризанола и фитостерола, а также простым и эффективным методом повышения чистоты поликозанола [21]. Описан принцип прогнозирования работы экстракционной установки, в состав которой включены экстрактор, конденсатор, испаритель и пульсатор. Особенностью установки является использование мисцеллы в качестве экстрагента [22]. Отработан процесс оптимизации извлечения масла из печени тунца с высокой влажностью подкритическим диметиловым эфиром [23]. Показана эффективность про-

цесса экстракции тимолсодержащего масла семян черного тмина (*Nigella sativa* L.), с использованием сжиженного диметилового эфира [24]. Приведены примеры использования сжиженного диметилового эфира (ДМЭ), как зеленого растворителя в химических реакциях: синтез О-алкилтрихлорацетимидатов [25]. Выполненный обзор литературы показал перспективы использования сжиженных газов в качестве растворителей. Показаны преимущества применения диметилового эфира для экстрагирования компонентов из маслосодержащего сырья.

Цель исследований – оценка перспектив использования жидкого диметилового эфира для извлечения ценных компонентов из растительного и животного сырья. Для достижения поставленной цели исследований решались задачи изучения физико-химических и экстракционных свойств ДМЭ, разработки схемы экстракционной установки для работы с диметилэфиром в качестве экстрагента, установки температурных режимов экстракции, оценке качественного состава полученного ДМЭ-экстракта.

Объекты и методы исследования.

Диметиловый эфир по ТУ 20.14.63-001-02128744-2017, выпускается нижегородской компанией «Аэрозолекс» с торговой маркой Propelan. Паспорт безопасности продукта РПБ № 0228744.20.58808, действителен до 01.10.2024 г. Благодаря современной технологии на заводе Аэрозолекс, в промышленном масштабе, выпускается ДМЭ высокой степени чистоты 99,99 % и выше. Это низкотемпературный растворитель эфирных и жирных масел, который из-за низкой температуры кипения быстро удаляется из мисцеллы и остается чистый экстракт.

Сырьевым объектом исследования являются плоды облепихи крушиновидной позднего срока созревания, сорта Янтарное ожерелье, районированный Южно-Уральским НИИ плодовоовощеводства, со светло-оранжевыми овальными плодами массой 1,1 г, содержанием масла до 6 %, витамина С 145 мг % и сахаров более 5 %.

Методы анализа. При выполнении исследований использованы приборы Центра коллективного пользования Института пищевой и перерабатывающей промышленности КубГТУ. Хроматографический профиль экстракта определяли методом тонкослойной хроматографии, который включал следующие основные этапы: подготовку пластины, подготовку пробы, подготовку хроматографической камеры, нанесение образцов, хроматографирование, испарение элюента с пластины, проявку пластины, закрепление её, идентификация и количественную оценку. При выполнении анализов использовали пластинки Sorbfil, камеру насыщали порами растворителей, микрошприцом наносили исследуемый образец на линию старта.

Определение антиоксидантной активности образцов проводилось в пересчете на витамин С, $\times 10^{-5}$ г/мл извлечения.

Облепиха крушиновидная (*Hippophae rhamnoides* L.)

Используемые органы: выжимка плодов, после удаления сока.

В плодах облепихи крушиновидной определено содержание воды и жирорастворимых витаминов, органических кислот, сахаров, дубильных веществ, макро- и микроэлементов. Важнейшими компонентами облепихи являются каротиноиды и флавоноиды.

При выполнении поисковых исследований определили наиболее перспективные сорта облепихи, для извлечения ДМЭ-экстрактов (табл. 1).

Таблица 1 – Содержание суммы целевых компонентов в плодах облепихи в пересчёте на абсолютно сухое сырьё

Сорт	Выход, %	АОА, мг/г	Флавоноиды, мг %	Каротиноиды, мг %	Сахара, %	Жирное масло, %
Рябиновая	26,9	5,1	0,7	153,5	12,6	20,1
Студенческая	39,3	6,2	0,4	24,9	14,5	17,4
Янтарное ожерелье	30,4	7,8	0,4	51,4	19,2	18,7

В дальнейшей работе использовали образцы плодов облепихи сорта «Янтарное ожерелье», имеющих более высокую антиоксидантную активность и содержание сахаров.

Исследование свойств ДМЭ как экстрагента

Новый экстрагент должен отвечать требованиям нетоксичности, легкой регенерации, низкой вязкости, сравнительной дешевизной, хорошей растворяющей способностью, химической неагрессивностью.

Структурная схема исследований по использованию жидкого диметилового эфира в роли экстрагента и растворителя ценных компонентов растительного, животного и микробиологического сырья, состоит из следующих этапов (рис. 1).



Рисунок 1 – Структурная схема исследований по использованию жидкого диметилового эфира в роли растворителя

Информационно-аналитическая модель тестирования растворителя для использования в качестве экстрагента биологически активных веществ (БАВ), заключается в анализе его химических и термодинамических свойств.

Диметилвый эфир (ДМЭ), простейший эфир с формулой $\text{CH}_3\text{--O--CH}_3$, представляет собой низкотемпературный растворитель и экстрагент, поддающийся специальным лабораторным процедурам экстракции. При нормальных атмосферных условиях ДМЭ находится в газообразном состоянии, он бесцветный, обладает химической инертностью, температурой плавления минус $138,5\text{ }^\circ\text{C}$, температурой кипения минус $24,9\text{ }^\circ\text{C}$, критическим давлением $5,3\text{ МПа}$ и растворимостью в воде при $16\text{ }^\circ\text{C}$ $3700\text{ мл}/100\text{ мл}$.

Газ легко сжижается уже при давлении $0,53\text{ МПа}$. Sp -гибридизованный атом кислорода в молекуле диметилового эфира имеет две одноэлектронные $\sigma\text{-AO}$ и образует две σ -связи с двумя атомами углерода. Две другие $\sigma\text{-AO}$ содержат неподеленные электронные пары и являются несвязывающими.

В таблице 1 приведены данные по свойствам паров ДМЭ.

Как видно из данных таблицы 2, применение диметилового эфира как экстрагента возможно в широком температурном диапазоне.

В таблице 3 приведены физико-химические и термодинамические характеристики ДМЭ и CO_2 .

Таблица 2 – Экспериментальное давление паров диметилового эфира

Температура, °С	Давление, P _{exp} , кПа	Температура, °С	Давление, P _{exp} , кПа
-35	68.49	15	443.57
-30	85.57	20	515.53
-25	105.59	25	596.21
-20	129.42	30	687.37
-15	157.53	31,6	726.26
-10	190.44	35	787.07
-5	228.48	40	897.59
0	272.17	43	968.55
5	321.87	45	1018.91
10	378.66	50	1152.35

Таблица 3 – Термодинамические характеристики ДМЭ и CO₂

Показатели	ДМЭ	CO ₂
Молярная масса C _n H _{1,8n}	46	44
Массовое содержание химических элементов, %:		
– углерод	52,2	27,3
– водород	13	–
– кислород	34,8	72,7
Коэффициент сжимаемости истинный при 20 °С и 0,1 МПа, 1/Па	157 × 10 ⁻¹¹	
Плотность жидкой фазы при 20 °С, кг/м ³	668	0,77
Кинематическая вязкость (жидкость, 20 °С), мм ² /с	3	1,61
Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м	0,0012	
Растворимость в воде при 20 °С, кг/м ³	70	0,88
Давление насыщенных паров при 20 °С, МПа	0,53	5,4
Температура кипения (ожижения) при 0,1 МПа, 20 °С	-24,8	-56,6
Критическое давление/температура, МПа/К	5,37/400	7,2/304,1
Теплота парообразования при 20 °С, кДж/кг	410	235,1
Низшая теплотворная способность, МДж/кг	28,84	
Теплоемкость при 20 °С, ккал/кг*град		0,68
Температура самовоспламенения на воздухе, °С	305	–

Как видно из данных таблицы 3, термодинамические характеристики ДМЭ показывают предпочтение выбора диметилового эфира в качестве экстрагента, по сравнению с жидким диоксидом углерода.

Исследование экстракционных свойств ДМЭ методами математического анализа

Для оптимизации параметров ДМЭ, как нового экстрагента, использовали информационно-аналитическую модель, учитывающую граничные условия эксперимента. Для интенсификации процесса массопереноса экстрактивных веществ из частиц сырья диметилэфиром, предложено организовать процесс обработки в пульсирующем режиме. Концентрацию экстрактивных веществ в растительном образце определяем по уравнению Фурье-Кирхгофа:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \omega \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{D}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (1)$$

где t – время; r, z – радиальная и продольная координаты; D – коэффициент радиальной (поперечной) диффузии; ω – скорость движения экстрагента в экстракторе.

При условии пульсирующего течения экстрагента через слой сырья, его скорость определяется следующим образом:

$$\omega = \omega_0 (1 + A \cos wt). \quad (2)$$

В (2) принята косинусоидальная форма импульса движения растворителя, влияющая на интенсивность процесса экстракции. Получим преобразование перехода к безразмерным координатам в формуле (1):

При переходе в (1) к безразмерным координатам применяются преобразования

$$\tau = F_0 = \frac{t_v}{R^2 \text{Pr}_D} = \frac{Dt}{R^2}; \quad X = \frac{1}{\text{Pe}_D} \frac{z}{R};$$

$$\rho = \frac{r}{R}; \quad \text{Pe}_D = \frac{2R\omega_0}{D}; \quad \text{Sh} = \frac{wA}{\omega_0}, \quad (3)$$

где τ – температура, $F_0 = \frac{a_0 \tau}{v^2}$ – число Фурье, v – плотность несущей среды.

Для решения специфичных задач использования ДМЭ как растворителя использовали граничные условия 1–3-рода, включая непроницаемость стенок экстрактора:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=R} = 0, \quad (4)$$

а также условие симметрии полей концентрации по оси аппарата:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial r} \right|_{r=0} = 0, \quad (5)$$

Можно также указать начальное условие:

$$C(r, z, 0) = C_0 \quad (6)$$

и условие первого рода в начальном сечении на входе $C(r, 0, \tau) = C_n$ или выходе $C(r, l, \tau) = C_b$ (здесь l – длина экстрактора). В общем случае последнее условие будет представлено как:

$$C(r, 0, \tau) = \varphi(\tau), \quad (7)$$

т.е. концентрация извлекаемых из сырья компонентов в мисцелле является временной функцией. При использовании в схеме пульсатора, обнаруживается следующая связь между классическими критериями:

$$\text{NuD} = f(\text{PeD}, \text{ReD}, \text{Re}_0, \text{Sh}, \text{Fo}, \text{PrD}), \quad (8)$$

Символы NuD , PeD , Sh , Fo и PrD обозначают известные критерии Нуссельта, Пекле, Струхалю, Фурье и Прандтля.

Разработка схемы экстракционной установки

При разработке схемы экстракционной установки для экстракции агропищевых сырьев диметилэфиром, использовали опыт конструирования установок для CO_2 -экстракции. В состав установки входят 1 – испаритель, 2, 3 – экстракторы, 4 – баллон с растворителем ДМЭ, 5 – конденсатор, 6 – сборник жидкого растворителя, 7 – пульсатор, 8 – сборник экстракта.

Показанная на рисунке 2 структурная схема использования ДМЭ как растворителя работает следующим образом. Предварительно подготовленное сухое измельченное сырье в сетчатых кассетах загружается в экстракторы 2,3. Из сборника 6 подается жидкий ДМЭ и пропитывает сырье в течение 15–20 мин. Затем организуется процесс проточной экстракции, и образовавшаяся мисцелла поступает в нагретый испаритель 1, где разделяется на газовую и жидкую фазу. Газовая фаза ДМЭ поступает в конденсатор 5, а жидкий экстракт собирается в приемнике 8. С целью интенсификации процесса извлечения экстрактивных веществ предусмотрен пульсационный режим обработки сырья. ДМЭ-мисцелла из нижней части экстракторов 2,3 подается в пульсатор 7, откуда вновь поступает в экстракторы с определенной цикличностью за счет температурного перепада. Такой технологический прием позволяет сократить процесс экстракции компонентов из сырья в 1,5–2,0 раза.

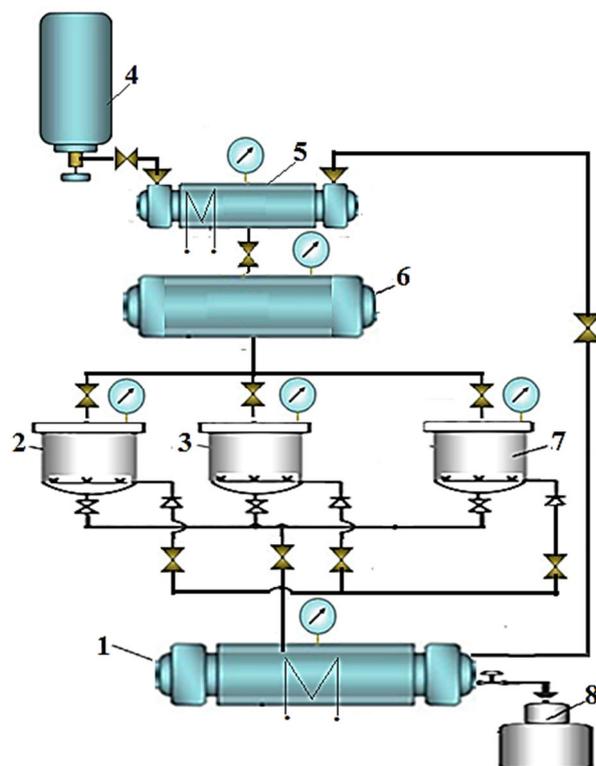


Рисунок 2 – Структурная схема использования ДМЭ как растворителя

Апробация способа ДМЭ-экстракции выжимки облепихи

На экспериментальной установке КубГТУ получены образцы экстракта из сухих плодов облепихи сорта «Янтарное ожерелье», Режим процесса экстракции: I серия опытов при температуре 20 °С и давлении 515.53 кПа и II серия – при температуре 25 °С и давлении 596.21 кПа.

Оценка качественного состава ДМЭ-экстракта облепихи методом ТСХ



На рисунке 3 показан хроматографический профиль экстракта облепихи

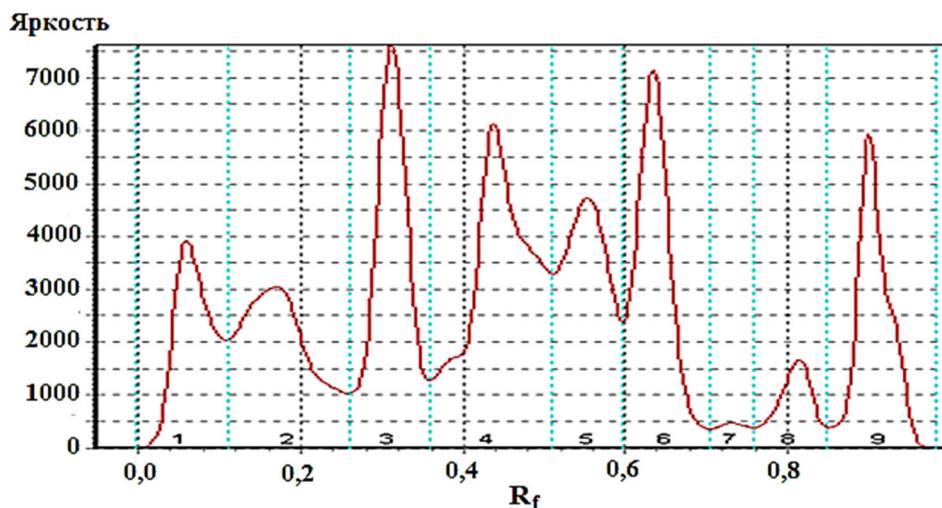


Рисунок 3 – Хроматографический профиль экстракта облепихи

В таблице 4 приведены данные о составе ДМЭ-экстракта облепихи.

Таблица 4 – Идентификация состава экстракта облепихи

№ пика	Rf	S	% S	H	% H	Компоненты
1	0,06	92592	8,9	3917	9,4	Фосфолипиды
2	0,15	133154	12,7	3038	7,4	Холестерин
3	0,25	154703	14,8	7617	18,5	Хлорофиллы
4	0,36	216956	20,8	6124	15,0	Изорамнетин
5	0,42	140786	13,7	4734	11,6	Кверцетин
6	0,65	147506	14,0	7144	16,7	Триацилглицериды
7	0,73	9778	10,0	485	1,3	Токоферолы
8	0,81	35879	3,6	1667	4,2	Каротиноиды
9	0,88	107594	10,2	5923	14,2	Воски
Сумма		1038948		40649		

Анализируя данные таблицы 3, следует обратить внимание на безразмерный параметр Rf, характеризующий физические показатели подвижной фазы и сорбента. Он представляет собой аналог времени удерживания и определяется отношением пути прохождения исследуемого вещества к расстоянию фронта растворителя.

Выполнены две серии опытов по извлечению ценных компонентов из выжимки плодов облепихи I – при температуре +20 °С и II – при +25 °С.

Таблица 4 – Средние значения величин показателей качества экстрактов

Выход, %	Сумма каротиноидов, мг %	К.Ч.	Число омыления, мг КОН/г	Йодное число, I ₂ /100 г	Перекисное число, ½ O/кг	Летучие вещества, %
Норма	не < 300	не >13	170–200	66–85	не > 15	не > 0,25
I 23,25	406,19	9,1	176,59	71,62	1,29	0,16
II 26,30	460,30	8,9	204,30	76,00	3,6	0,09

Содержание влаги в ДМЭ-экстракте облепихи не более 0,13 %.

Перспективы продолжения исследований в области газожидкостных технологий

Выполненные исследования показали возможность использования диметилового эфира для извлечения ценных компонентов из растительного сырья. Однако широкое использование этого экстрагента сдерживается условиями техники безопасности из-за его сравнительно высокой горючести. С учетом огнеопасности ДМЭ целесообразным решением считаем его использование в смеси с инертным соразтворителем. С целью снижения пожаро-взрывоопасности ДМЭ, рекомендуется сочетать его с CO₂.

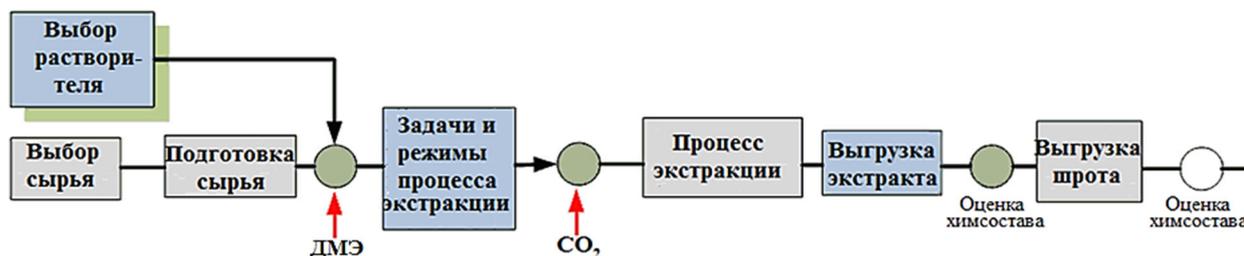


Рисунок 4 – Принципиальная схема докритической ДМЭ: CO₂-экстракции

Заключение

Выполнены исследования по использованию жидкого ДМЭ для извлечения ценных компонентов из растительного сырья. Разработана схема экстракционной установки для работы с диметилэфиром в качестве экстрагента, установлены температурные режимы экстракции, оценен качественный состав полученного ДМЭ-экстракта облепихи. Полученные результаты подтвердили целесообразность использования жидкого

диметилового эфира как экстрагента биологически активных веществ из возобновляемого агропищевого сырья и вторичных ресурсов консервного производства.

С целью снижения пожаро-взрывоопасности ДМЭ, рекомендуется создать бинарный экстрагент с CO_2 .

Литература

1. Получение и применение CO_2 -экстрактов из животного и растительного сырья / Ю.С. Алешкевич, Г.И. Касьянов, Н.Б. Савицких, Е.В. Шейкина // В сборнике: Совершенствование технологии консервирования сырья растительного и животного происхождения. Материалы международной научно-практической конференции. – Краснодар, 2021. – С. 179–184.
2. Пищевые добавки из базилика обыкновенного и базилика эвгенольного / М.П. Бахмет, Г.И. Касьянов, М.П. Бахмет, Г.И. Касьянов // В сборнике: Здоровьесберегающие технологии, качество и безопасность пищевой продукции. Сборник статей по материалам Всероссийской конференции с международным участием. – Краснодар, 2021. – С. 3–7.
3. Васильев А.С. Направления развития технологий и оборудования для экстракции пищевых ингредиентов при обогащении продуктов питания и создании функциональных продуктов / А.С. Васильев, И.Р. Шегельман, В.В. Вапиров; Редк. О.Н. Широков [и др.] // Инновационные технологии в образовании и науке: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. – 2017. – С. 173–174.
4. Васильев А.С. Краткий анализ современных технологий экстракции и основных факторов, влияющих на процесс экстракции / А.С. Васильев, Ю.В. Суханов // В сборнике материалов IX Международной научно-практической конференции «Экономическая наука сегодня: теория и практика». – Петрозаводск, 2018. – С. 28–31.
5. Васильев А.С. Об использовании сверхкритических флюидов в пищевой отрасли / А.С. Васильев, А.В. Суханов // В сборнике материалов IX Международной научно-практической конференции «Экономическая наука сегодня: теория и практика». – 2018. – С. 31–34.
6. Занин Д.Е. Особенности конструкции автоматизированного CO_2 -экстракционного модуля / Д.Е. Занин, Д.Г. Касьянов // В сборнике: Совершенствование технологии консервирования сырья растительного и животного происхождения. Материалы международной научно-практической конференции. – Краснодар, 2021. – С. 21–25.
7. Занин Д.Е. Разработка технологии извлечения антиоксидантов из растительного сырья методом газожидкостной CO_2 -экстракции / Д.Е. Занин, Д.Г. Касьянов // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2022. – № 2–3 (386–387). – С. 39–45.
8. Эффективность процесса CO_2 -экстракции с позиций системного и экономического анализа / Е.В. Иночкина, Г.И. Касьянов, Н.Л. Малашенко, С.М. Силюнская // В сборнике: Биотехнологические, экологические и экономические аспекты создания безопасных продуктов питания специализированного назначения. Материалы международной научно-практической конференции. – Краснодар, 2020. – С. 94–99.
9. Касьянов Г.И. Эффективность использования диоксида углерода в качестве экстрагента / Г.И. Касьянов // В сборнике: Повышение качества и безопасности пищевых продуктов. Материалы X Всероссийской научно-практической конференции. – 2020. – С. 102–105.
10. Анализ функционирования цифровой системы управления процессом газожидкостной экстракции / Г.И. Касьянов, К.Х. Гафуров, И.Х. Сиддиков, Ш.И. Файзиев, В.Н. Савин // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2021. – № 3. – С. 36–45.
11. Пищевые добавки в форме CO_2 -экстрактов кориандра, лаврового листа и тмина / Г.И. Касьянов, Н.Б. Савицких, А.М. Магомедов, Е.А. Мазуренко // В сборнике: Развитие науки и практики в глобально меняющемся мире в условиях рисков. Сборник материалов XII международной научно-практической конференции (шифр – МКРНП). – М., 2022. – С. 183–188.
12. Касьянов Г.И. Эффективность субкритической CO_2 -экстракции актинидии, облепихи, унаби и шиповника / Г.И. Касьянов, М.А. Яренков, З.А. Яралиева // В сборнике: Векторы развития технологии переработки животного и растительного сырья. Сборник материалов международной научно-практической конференции. – Краснодар, 2022. – С. 102–105.
13. Касьянов Д.Г. Синергизм пищевой и химической технологии в производстве экстрактов на автоматизированной CO_2 -установке / Д.Г. Касьянов, Д.Е. Занин // В сборнике: Совершенствование технологии консервирования сырья растительного и животного происхождения. Материалы международной научно-практической конференции. – Краснодар, 2021. – С. 145–149.
14. Медведев А.М. Оптимизация работы CO_2 -экстракционной установки / А.М. Медведев, В.Н. Савин // В сборнике: Инновации в индустрии питания и сервисе. Электронный сборник материалов IV Международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 531–535.

15. Патент РФ на изобретение № 2717529 Способ переработки биологического сырья / Котелкин И.М. Заявка № 2019125458, заявлено 2019.08.12, опубликовано 2020.03.23.
16. Силинская С.М. Системный анализ управления процессом совершенствования технологии и замены оборудования на заводе по производству CO₂-экстрактов / С.М. Силинская, Н.Ю. Нарыжная, Г.И. Касьянов // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 3-2. – С. 244–249.
17. Автоматизированные системы CO₂-технологий / И.Е. Сязин, Г.И. Касьянов, А.В. Гукасян, С.В. Фомин. – Краснодар : КубГТУ, 2021. – 110 с.
18. Тринеева О.В. Исследование каротиноидного состава плодов облепихи крушиновидной различных сортов методом тонкослойной хроматографии / О.В. Тринеева, М.А. Рудая, А.И. Сливкин // Химия растительного сырья. – 2020. – № 1. – С. 223–228.
19. Bauer M. The use of dimethyl ether as an organic extraction solvent for biomass applications in future biorefineries: A user-oriented review / M. Bauer, A. Kruse // Chemistry Fuel. – 2019.
20. Mechanism of separation and removal of water from dewatered sludge using LDME to dissolve hydrophilic organic matter, Chemosphere / L. Chen, W. Zhu, N.-X. Lin, B. Mu, X.-H. Fan, C.-Y. Wang, H.-M. Chen, J. Zhong. – 2020.
21. Donporn Wongwaiwech, Monthana Weerawatanakorn, P. Boonnoun. Subcritical dimethyl ether extraction as a simple method to extract nutraceuticals from byproducts from rice bran oil manufacture // Chemistry, Medicine Scientific reports. – 2020.
22. Medvedev A.M. The mathematical justification of the extraction plant elements operation / A.M. Medvedev, V.N. Savin, V.I. Shipulin // Modern Science and Innovations. – 2022. – № 1(37). – С. 91–99.
23. Peng Li. Liquefied Dimethyl Ether: An Energy-Saving, Green Extraction Solvent. Alternative Solvents for Natural Products Extraction / Li Peng, Hisao Makino. – 2014.
24. Subratti A. Efficient extraction of black cumin (*Nigella sativa* L.) seed oil containing thymol, using liquefied dimethyl ether (DME) / A. Subratti, J. Loreale, N. Jalsa Lalgee // Journal of Food Processing and Preservation. – 2019.
25. Subratti A. Liquefied dimethyl ether (DME) as a green solvent in chemical reactions: Synthesis of O-alkyl trichloroacetimidates / A. Subratti, J. Loreale, N. Jalsa Lalgee // Chemistry Sustainable Chemistry and Pharmacy. – 2018.

References

1. Obtaining and application of CO₂-extracts from animal and vegetable raw materials / Yu.S. Aleshkevich, G.I. Kasyanov, N.B. Savitskikh, E.V. Sheikina // In the collection: Improving the technology of preserving raw materials of plant and animal origin. Materials of the international scientific-practical conference. – Krasnodar, 2021. – P. 179–184.
2. Food supplements from common basil and eugenol basil / M.P. Bakhmet, G.I. Kasyanov, M.P. Bakhmet, G.I. Kasyanov // In the collection: Health-saving technologies, quality and safety of food products. Collection of articles based on materials of the All-Russian conference with international participation. – Krasnodar, 2021. – P. 3–7.
3. Vasiliev A.S. Directions for the development of technologies and equipment for the extraction of food ingredients in the enrichment of food products and the creation of functional products / A.S. Vasiliev, I.R. Shegelman, V.V. Vapirov; Ed. board: O.N. Shirokov [et al.] // Innovative technologies in education and science: Collection of materials of the III International Scientific and Practical Conference. – 2017. – P. 173–174.
4. Vasiliev A.S. A brief analysis of modern extraction technologies and the main factors influencing the extraction process / A.S. Vasiliev, Yu.V. Sukhanov // In the collection of materials of the IX International Scientific and Practical Conference «Economic Science Today: Theory and Practice». – Petrozavodsk, 2018. – S. 28–31.
5. Vasiliev A.S. On the use of supercritical fluids in the food industry / A.S. Vasiliev, A.V. Sukhanov // In the collection of materials of the IX International Scientific and Practical Conference «Economic Science Today: Theory and Practice». – 2018. – P. 31–34.
6. Zanin D.E. Features of the design of an automated CO₂-extraction module / D.E. Zanin, D.G. Kasyanov // In the collection: Improving the technology of preserving raw materials of plant and animal origin. Materials of the international scientific-practical conference. – Krasnodar, 2021. – P. 21–25.
7. Zanin D.E. Development of technology for extracting antioxidants from vegetable raw materials by gas-liquid CO₂-extraction / D.E. Zanin, D.G. Kasyanov // News of higher educational institutions. Food technology. – 2022. – № 2–3 (386–387). – P. 39–45.

8. Efficiency of the CO₂-extraction process from the standpoint of systemic and economic analysis / E.V. Inochkina, G.I. Kasyanov, N.L. Malashenko, S.M. Silinskaya // In the collection: Biotechnological, environmental and economic aspects of creating safe food products for specialized purposes. Materials of the international scientific-practical conference. – Krasnodar, 2020. – P. 94–99.
9. Kasyanov G.I. Efficiency of using carbon dioxide as an extractant / G.I. Kasyanov // In the collection: Improving the quality and safety of food products. Materials of the X All-Russian Scientific and Practical Conference. – 2020. – P. 102–105.
10. Analysis of the functioning of the digital control system for the process of gas-liquid extraction / G.I. Kasyanov, K.Kh. Gafurov, I.Kh. Siddikov, Sh.I. Faiziev, V.N. Savin // Science. Technique. Technologies (polytechnic bulletin). – 2021. – № 3. – P. 36–45.
11. Food additives in the form of CO₂-extracts of coriander, bay leaf and cumin / G.I. Kasyanov, N.B. Savitskikh, A.M. Magomedov, E.A. Mazurenko // In the collection: The development of science and practice in a globally changing world in terms of risks. Collection of materials of the XII International Scientific and Practical Conference (code – MKRNP). – M., 2022. – P. 183–188.
12. Kasyanov G.I. Efficiency of subcritical CO₂-extraction of actinidia, sea buckthorn, unabi and wild rose / G.I. Kasyanov, M.A. Yarenkov, Z.A. Yarialieva // In the collection: Vectors of development of technology for processing animal and vegetable raw materials. Collection of materials of the international scientific-practical conference. – Krasnodar, 2022. – P. 102–105.
13. Kasyanov D.G. Synergism of food and chemical technology in the production of extracts on an automated CO₂-installation / D.G. Kasyanov, D.E. Zanin // In the collection: Improving the technology of preserving raw materials of plant and animal origin. Materials of the international scientific-practical conference. – Krasnodar, 2021. – P. 145–149.
14. Medvedev A.M. Optimization of CO₂-extraction plant / A.M. Medvedev, V.N. Savin // In the collection: Innovations in the food industry and service. Electronic collection of materials of the IV International Scientific and Practical Conference. – 2020. – P. 531–535.
15. RF patent for the invention № 2717529 Method for processing biological raw materials / Kotelkin I.M. Application № 2019125458, filed 2019.08.12, published 2020.03.23.
16. Silinskaya S.M. System analysis of managing the process of improving technology and replacing equipment at a plant for the production of CO₂-extracts / S.M. Silinskaya, N.Yu. Naryzhnaya, G.I. Kasyanov // Modern science-intensive technologies. – 2019. – № 3-2. – P. 244–249.
17. Automated systems of CO₂-technologies / I.E. Syazin, G.I. Kasyanov, A.V. Ghukasyan, S.V. Fomin. – Krasnodar : KubGTU, 2021. – 110 p.
18. Trineeva O.V. The study of the carotenoid composition of fruits of sea buckthorn buckthorn of various varieties by thin layer chromatography / O.V. Trineeva, M.A. Rudaya, A.I. Slivkin // Chemistry of plant raw materials. – 2020. – № 1. – P. 223–228.
19. Bauer M. The use of dimethyl ether as an organic extraction solvent for biomass applications in future biorefineries: A user-oriented review / M. Bauer, A. Kruse // Chemistry Fuel. – 2019.
20. Mechanism of separation and removal of water from dewatered sludge using LDME to dissolve hydrophilic organic matter, Chemosphere / L. Chen, W. Zhu, N.-X. Lin, B. Mu, X.-H. Fan, C.-Y. Wang, H.-M. Chen, J. Zhong. – 2020.
21. Donporn Wongwaiwech, Monthana Weerawatanakorn, P. Boonnoun. Subcritical dimethyl ether extraction as a simple method to extract nutraceuticals from byproducts from rice bran oil manufacture // Chemistry, Medicine Scientific reports. – 2020.
22. Medvedev A.M. The mathematical justification of the extraction plant elements operation / A.M. Medvedev, V.N. Savin, V.I. Shipulin // Modern Science and Innovations. – 2022. – № 1(37). – C. 91–99.
23. Peng Li. Liquefied Dimethyl Ether: An Energy-Saving, Green Extraction Solvent. Alternative Solvents for Natural Products Extraction / Li Peng, Hisao Makino. – 2014.
24. Subratti A. Efficient extraction of black cumin (*Nigella sativa* L.) seed oil containing thymol, using liquefied dimethyl ether (DME) / A. Subratti, J. Lorele, N. Jalsa Lalgee // Journal of Food Processing and Preservation. – 2019.
25. Subratti A. Liquefied dimethyl ether (DME) as a green solvent in chemical reactions: Synthesis of O -alkyl trichloroacetimidates / A. Subratti, J. Lorele, N. Jalsa Lalgee // Chemistry Sustainable Chemistry and Pharmacy. – 2018.