

Евгений Николаевич Неверов<sup>1✉</sup>, Игорь Борисович Плотников<sup>2</sup>, Павел Сергеевич Коротких<sup>3</sup>,  
Любовь Васильевна Плотникова<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Кемеровский государственный университет, Кемерово, Россия

<sup>1</sup>neverov42@mail.ru

<sup>2</sup>plotnikov-ib@mail.ru

<sup>3</sup>korotkix42@gmail.com

<sup>4</sup>plotnikova.lyba@yandex.ru

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРИМЕНЕНИЯ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ПРИ ТАБЛЕТИРОВАНИИ ИНСТАНТИРОВАННЫХ ПРОДУКТОВ И СУХИХ СМЕСЕЙ РАСТИТЕЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Цель исследования – изучение процесса применения диоксида углерода при таблетировании инстантированных продуктов и сухих смесей растительных компонентов. С целью изучения процесса таблетирования была использована экспериментальная установка. Исследование проводилось на порошкообразных и сухих измельченных смесях пищевых продуктах, имеющих одинаковое значение дисперсности. Для исследования использовалось растительное сырье, заготовленное и обработанное в соответствии с требованиями фармакопейных статей. Наименования растений были выбраны из условия различия анатомо-формологического строения. Такими растениями явились: ромашка аптечная, зверобой продырявленный, левзея сафлоровидная. В качестве порошкообразного сырья использовался сухая смесь инстантированного киселя. Все образцы имели одинаковую начальную влажность 6 %, которую предварительно определяли на влагомере модели A&D ML-50, далее образцы помещались в эксикатор. Взвешивание компонентов производилось при помощи лабораторных весов M-ER-122 ACF-150-005. CO<sub>2</sub> в твердом агрегатном состоянии получали путем дросселирования сжатого газа из предварительно охлажденного до температуры минус 30 °С баллона. Испытание материалов при сжатии и процесс формования таблетированного изделия выполнялись на универсальной гидравлической испытательной машине марки ПМ-МГ4. Описаны методики экспериментальных исследований по сублимации таблетированного и кристаллического диоксида углерода, изложены результаты собственных экспериментов по таблетированию инстантированного напитка и сухих смесей левзеи сафлоровидной, зверобоя продырявленного, ромашки аптечной с применением твердого CO<sub>2</sub>, природа связи частиц в таблетках. Представлен новый способ таблетирования инстантированных продуктов и продуктов, получаемых путем таблетирования сухих смесей растительных продуктов с применением твердого CO<sub>2</sub>. Проведены исследования полученных таблетированных форм. Представлены результаты процесса распадаемости таблетированных форм и влияние способа таблетирования на экстрагирование целевых компонентов.

**Ключевые слова:** диоксид углерода, таблетирование, инстантированные продукты, растительное сырье

**Для цитирования:** Исследование процесса применения диоксида углерода при таблетировании инстантированных продуктов и сухих смесей растительных компонентов / Е.Н. Неверов [и др.] // Вестник КрасГАУ. 2024. № 7. С. 229–242. DOI: 10.36718/1819-4036-2024-7-229-242.

Evgeny Nikolaevich Neverov<sup>1✉</sup>, Igor Borisovich Plotnikov<sup>2</sup>, Pavel Sergeevich Korotkikh<sup>3</sup>, Lyubov Vasilievna Plotnikova<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

<sup>1</sup>neverov42@mail.ru

<sup>2</sup>plotnikov-ib@mail.ru

<sup>3</sup>korotkix42@gmail.com

<sup>4</sup>plotnikova.lyba@yandex.ru

## PROCESS RESEARCH ON USING CARBON DIOXIDE WHEN TABLETING INSTANT PRODUCTS AND DRY MIXTURES OF PLANT COMPONENTS

*The aim of the study is to investigate the process of using carbon dioxide in tableting instant products and dry mixtures of plant components. An experimental setup was used to study the tableting process. The study was conducted on powdered and dry ground mixtures of food products with the same dispersion value. For the studies, plant materials prepared and processed in accordance with the requirements of pharmacopoeial articles were used. The names of plants were selected based on the condition of differences in anatomical and morphological structure. Such plants were: chamomile, St. John's wort, and safflower leuzea. A dry mixture of instant jelly was used as a powdered raw material. All samples had the same initial moisture content of 6 %, which was preliminarily determined on an A&D ML–50 moisture meter, and then the samples were placed in a desiccator. The components were weighed using M-ER-122 ACF-150-005 laboratory scales. Solid CO<sub>2</sub> was obtained by throttling compressed gas from a cylinder pre-cooled to minus 30 °C. Compression testing of materials and the process of molding the tableted product were performed on a PM-MG4 universal hydraulic testing machine. The paper describes the methods of experimental studies on the sublimation of tableted and crystalline carbon dioxide, presents the results of our own experiments on tableting an instant drink and dry mixes of safflower leuzea, common St. John's wort, and chamomile using solid CO<sub>2</sub>. The nature of particle bonding in tablets. A new method for tableting instant products and products obtained by tableting dry mixes of plant products using solid CO<sub>2</sub> is presented. The obtained tablet forms were studied. The results of the disintegration process of tablet forms and the influence of the tableting method on the extraction of target components are presented.*

**Keywords:** carbon dioxide, tableting, instantized products, plant materials

**For citation:** Process research on using carbon dioxide when tableting instant products and dry mixtures of plant components / E.N. Neverov [et al.] // Bulliten KrasSAU. 2024;(7): 229–242 (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2024-7-229-242.

**Введение.** Широкое распространение инстантированных продуктов, а также особых питательных порошков – сойлентов (soylent), известных в среде поклонников здорового образа жизни и тех, кто следит за фигурой, ведет к расширению доли данных продуктов на рынке.

Форма выпуска данных продуктов в большинстве случаев – порошкообразная, реже гранулированная, что имеет свои недостатки. Так как применение данных продуктов подразумевает получение растворов путем разведения и растворения порошкообразного продукта в воде или молоке, это приводит к сложности дозирования требуемого количества продукта [1].

Порошкообразная форма продукта требует строгого соблюдения параметров хранения, особенно по влажности. Нарушение данного параметра хранения ввиду высокой гигроско-

пичности порошкообразного материала ведет к образованию плохо растворимых включений, что в итоге приводит к снижению качества продукции [2, 3].

Еще одним продуктом, выпускающимся в рассыпном виде, являются измельченные части растений, в т. ч. лекарственных, потребление которых подразумевает получение экстрактов. Экстрагирование производится обычно горячей водой. Использование данных продуктов, изготавливаемых из высушенных и измельченных частей растений, также имеет ряд неудобств для потребителя – сложность дозирования, распыливание продукта во время дозирования. Кроме того, данная форма выпуска продукта ведет к перетиранию частей материала в процессе транспортирования, что приводит к образованию мелкодисперсной пыли и снижению

качества продукта [4–6]. С целью снижения данных недостатков продукты данных категорий гранулируют или таблетуют.

Для продуктов первой описанной группы (порошкообразные) способ гранулирования достаточно эффективен. Он позволяет получать отдельные гранулы, что облегчает процесс дозировки необходимого количества продукта при его использовании. Однако гранулы в процессе транспортировки зачастую истираются, и образуется больше количество мелкодисперсной пыли.

Для второй группы продуктов (сухих смесей частей растений) способ гранулирования практически не применяется ввиду сложности связывания отдельных частей смеси в гранулы относительно небольших размеров.

Таблетирование данных продуктов позволяет получать отдельные строго дозированные порции. Кроме того, при необходимости внесения отдельного активного (действующего) вещества способ таблетирования наиболее эффективен. Так, при небольшом процентном отношении количества активного вещества относительно всей массы продукта его эффективнее вносить отдельно в каждую таблетку, чем стремиться распределить его равномерно по всему объему продукта в стадии смешивания [7–10].

При транспортировании таблетированных форм не происходит его переизмельчения, что повышает качество продукта.

По способу получения различают два класса таблеток:

1. Прессованные. При этом сырье с требуемыми дополнительными компонентами (связующие, разрыхлители и т. п.) подвергается прессованию. Способ, наиболее часто применяемый для получения таблетированных форм.

2. Формованные, или тритурационные таблетки. Сырье при данном способе таблетирования подвергают формованию. От общей массы выпускаемых таблетированных форм продукции данный способ занимает лишь 1–2 %.

Таблетирование растительного сырья возможно с использованием специализированного оборудования и добавления подходящих вспомогательных веществ, таких как наполнители, связующие вещества и разрыхлители [11].

Процесс таблетирования включает в себя смешивание растительного сырья с другими компонентами, формирование таблеток и их последующее сжатие или прессование. После

формирования таблеток происходит обычно процесс сушки для удаления лишней влаги и повышения их стабильности. Затем таблетки могут быть обработаны для придания им блеска, улучшения сохранности или добавления аромата при необходимости. В конечном итоге они готовы к упаковке и распространению на рынке [12].

При таблетировании могут возникать несколько сложностей:

1. Подходящая дозировка: необходимо подобрать оптимальное сочетание сырья с различными вспомогательными веществами, чтобы обеспечить необходимую консистенцию и стабильность таблеток.

2. Проблемы с компрессией: сырье может быть сложно сжимаемым веществом, что может затруднить процесс формирования таблеток и повысить риск деформации или распада.

3. Растворимость: сырье обладает высокой растворимостью в воде, что может создать сложности при попытке создания таблеток с желаемой структурой и стабильностью.

4. Сохранение активных свойств: во время процесса таблетирования важно обеспечить сохранение активных свойств сырья, чтобы обеспечить его эффективность как пищевой добавки или функционального ингредиента.

5. Контроль качества: с целью обеспечения безопасности и эффективности готовых таблетированных форм, а также их соответствия существующим стандартам, требуется постоянный контроль как на стадии производства, так и готовой продукции.

Исследования по таблетированию растительного сырья часто направлены на оптимизацию процесса таблетирования для обеспечения эффективности производства, стабильности продукта и его биодоступности. Это может включать в себя исследования по оптимизации формулы таблеток, выбору подходящих вспомогательных веществ и разработке оптимальных условий сжатия [13].

Одной из основных проблем при использовании таблетированных форм продуктов является низкая скорость распадаемости, что ведет к увеличению продолжительности приготовления готовых растворов или в случае получения экстрактов к снижению скорости экстрагирования и зачастую неполному извлечению целевых компонентов.

Следовательно, актуальной задачей является разработка инновационного способа таблетирования, который позволит получать стабильные формы с заданными показателями качества, при этом с высокой скоростью распадаемости при их использовании.

Использование  $\text{CO}_2$  в твердом агрегатном состоянии позволяет получать новые способы таблетирования. Однако способ прессования  $\text{CO}_2$  мало изучен и также требует исследования.

**Цель исследования** – изучение процесса применения диоксида углерода при таблетировании инстантированных продуктов и сухих смесей растительных компонентов.

**Объекты и методы.** Механическая теория прессования в таблетировании основывается на принципе преобразования сырьевого материала в компактную форму с помощью применения механической силы. Этот процесс включает в себя несколько этапов: наполнение матрицы (сырье и вспомогательные вещества, загружается в матрицу пресса); сжатие (механическая сила применяется к матрице, что приводит к сжатию материала, происходит уплотнение и формирование таблетки с заданными характеристиками); разрыв (после достижения заданной силы или давления таблетка отделяется от матрицы) [14, 15].

Механическая теория прессования учитывает различные параметры, такие как скорость нагрузки, давление прессования, время сжатия и свойства сырья, для оптимизации процесса таблетирования и обеспечения высокого качества готовых таблеток.

С целью изучения процесса таблетирования была использована экспериментальная установка.

Исследование проводилось на порошкообразных и сухих измельченных смесях пищевых продуктов, имеющих одинаковое значение дисперсности.

Для исследований использовалось растительное сырье, заготовленное и обработанное в соответствии с требованиями фармакопейных статей. Наименования растений были выбраны из условия различия анатомо-формологического строения. Такими растениями явились: ромашка аптечная, зверобой продырявленный, левзея сафлоровидная. В качестве порошкообразного сырья использовалась сухая смесь инстантированного киселя [16].

Все образцы имели одинаковую начальную влажность 6 %, которую предварительно определяли на влагомере модели A&D ML-50, далее образцы помещались в эксикатор. Взвешивание компонентов производилось при помощи лабораторных весов M-ER-122 ACF-150-005.

$\text{CO}_2$  в твердом агрегатном состоянии получали путем дросселирования сжатого газа из предварительно охлажденного до температуры минус 30 °С баллона.

Испытание материалов при сжатии и процесс формования таблетированного изделия выполнялись на универсальной гидравлической испытательной машине марки ПМ-МГ4 (рис. 1), максимальное развивающее усилие составляет 1 кН. Данная машина применяется для испытания образцов элементов конструкций и различных материалов. Допускаемая погрешность показаний при статических нагрузках составляет  $\pm 1$  % от измеряемой нагрузки, а частота динамической нагрузки может изменяться от 3 до 12 мм/мин.



Рис. 1. Экспериментальная установка на базе пресса ПМ-МГ4

Принцип работы установки заключается в следующем. Предварительно смешенное сырье со вспомогательными компонентами при получении таблетированных форм из порошкообразных или сухих смесей растительных компонентов дозируется в отверстия матрицы. При прессовании твердого  $\text{CO}_2$  он также дозируется в отверстия матрицы. После этого верхняя плита пресса опускается до соприкосновения с матрицей. Матрица и пуансоны предварительно подвергались охлаждению до температуры  $-75\text{ }^\circ\text{C}$  в морозильной камере марки SUFsg 7001 MediLine.

После образования таблеток верхняя плита поднимается в свое исходное положение, а нижняя плита поднимается вверх. Таким образом, пуансоны выталкивают готовую таблетку на поверхность матрицы. Оказавшись на поверхности таблетку сбивает в изотермический контейнер с диоксидом углерода, начинается движение к матрице для заполнения отверстий новой порцией.

На рисунке 2 изображен поэтапный принцип работы установки для получения таблеток  $\text{CO}_2$ .

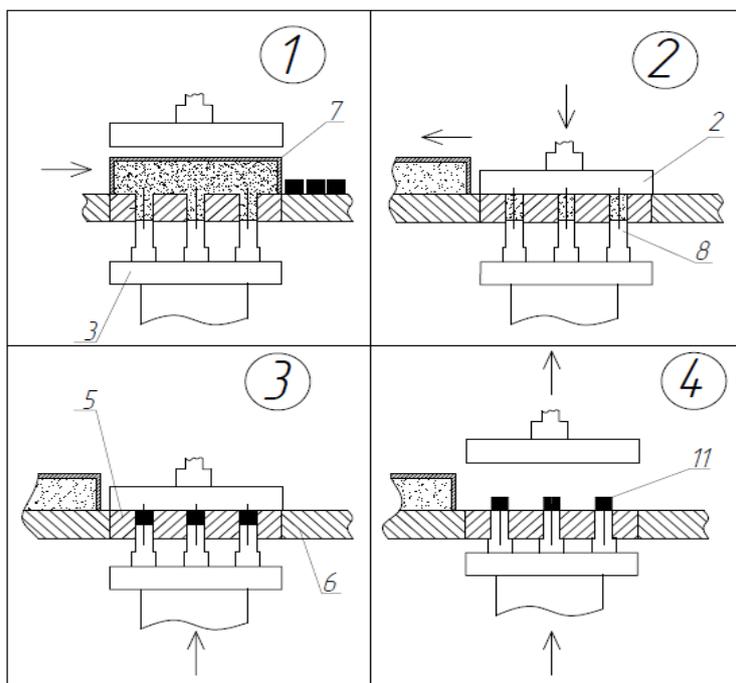


Рис. 2. Принцип работы установки

Применение отдельных цилиндров обусловлено меньшей металлоемкостью, тем самым более быстрым охлаждением контактируемых частей с прессуемым диоксидом углерода. Также отдельный цилиндр мобильнее, поэтому его проще охлаждать, заполнять снегообразным  $\text{CO}_2$  и производить уплотнение. В остальном же принцип работы отдельными пресс-формами не отличается от стационарной матрицы.

Важным параметром готовых таблетированных форм при получении их из сухих смесей растительного сырья является прочность. Для определения прочности использовался метод сжатия. Сжатие проводилось в диаметральной плоскости. Значение коэффициента прочнос-

ти готовых таблетированных форм должно составлять  $K_n = 0,6-1,0$  МПа.

Коэффициент прочности определялся по формуле

$$K_n = \frac{P_p}{D \cdot H}, \quad (1)$$

где  $P_p$  – разрушающая таблетку нагрузка, приложенная в диаметральной плоскости, Н;  $D$ ,  $H$  – диаметр и высота таблетки, м.

Для испытания таблетированных форм на прочность применялась установка на базе пресса МИП-100. Относительная погрешность измерений при этом не превышала 1 %.

Фракционный состав таблетированного сырья оказывает одно из основных влияний на процесс таблетирования и прочность готовых таблеток. Так, фракционный состав влияет на пикнометрическую плотность, которая, в свою очередь, и влияет на прочность готовых изделий. Следовательно, одним из параметров, требующих контроля, является пикнометрическая плотность, которая определялась, исходя из выражения

$$\rho = \frac{\rho_1 \cdot m_1}{m_2 - (m_3 - m_1)}, \quad (2)$$

где  $\rho_1$  – плотность петролейного эфира, кг/м<sup>3</sup>;  $m_1$  – масса навески порошка, кг;  $m_2$  – масса пикнометра с петролейным эфиром, кг;  $m_3$  – масса пикнометра с петролейным эфиром и порошком, кг.

Полученные таблетированные формы порошкообразных и сухих смесей подвергались исследованию на скорость распадаемости.

Для определения времени распадаемости применялась следующая методика. По пять образцов из каждой группы подвергались процессу распадаемости. В качестве растворителя выступала вода питьевая температурой  $(20 \pm 2)$  °С при исследовании таблетированных форм из порошкообразных инстантированных продуктов и  $(95 \pm 5)$  °С при исследовании таблетированных форм из сухих смесей растительного сырья.

Измерение времени распадаемости таблетированного продукта проводилось путем фиксации времени от момента соприкосновения с растворителем до момента полного разрушения таблетированного изделия при помощи механического секундомера СОПр-1в-3-000. Из полученных пяти образцов каждой группы были вычислены средние значения.

Для анализа полученных таблетированных форм из сухих смесей растительного сырья при получении экстрактов, кинетики процесса и степени извлечения целевых компонентов была проведена серия экспериментов. В качестве исследуемых таблетированных форм из сухих смесей растительного сырья были выбраны таблетки, полученные с применением CO<sub>2</sub> при таблетировании и без CO<sub>2</sub>, а также смесь без применения таблетирования. При получении

таблетированных форм с применением CO<sub>2</sub> давление прессования составляло  $P_{пр} = 140–160$  МПа, а при прессовании без CO<sub>2</sub> давление находилось в диапазоне  $P_{пр} = 100–140$  МПа. Таблетки имели следующие параметры: масса –  $14 \cdot 10^{-3}$  кг, высота –  $10–12 \cdot 10^{-3}$  м и диаметр –  $25 \cdot 10^{-3}$  м. Сырьем для таблетированных форм являлась сухая смесь левзеи сафлоровидной со средним диаметром частиц  $d_p \approx 1 \cdot 10^{-3}$  м, кроме того применялся связующий компонент – сахарный раствор 5 % [15, 17].

Экстрагирование проводили согласно следующим параметрам: гидромодуль 0,05, продолжительность процесса – 3 600 с, температура экстрагента (вода) –  $T = (95 \pm 5)$  °С. В процессе экстрагирования систему компонентов сырья – экстрагент подвергали перемешиванию с периодичностью раз в 600 с [11].

Определение содержания сухих водорастворимых веществ в экстракте проводили рефрактометрическим способом [18, 19], для чего с периодичностью 5 мин отбирались пробы в объеме 10 мл. Температура проб при определении содержания сухих веществ составляла 20 °С. При этом устанавливалась связь  $C_{ж} = f(t)$  изменения концентрации сухих веществ от продолжительности процесса.

**Результаты и их обсуждение.** Предлагаемый способ таблетирования состоит в использовании твердого CO<sub>2</sub>, который при последующей сублимации из готовой таблетированной формы позволит увеличить пористость таблетки и тем самым ускорить ее распадаемость.

Технологическая схема представлена на рисунке 3.

Способ включает в себя следующие этапы: а) получение смесей для таблетирования – смешивание сырья со связующими компонентами и CO<sub>2</sub> в твердом агрегатном состоянии; б) получение таблетированных форм путем прессования подготовленной смеси; в) термостатирование полученной таблетированной формы при температуре  $(20 \pm 2)$  °С, при этом происходило сублимирование CO<sub>2</sub> из внутренних слоев, полученная газообразная смесь выходила из внутренних слоев, образуя развитую пористую структуру [20].

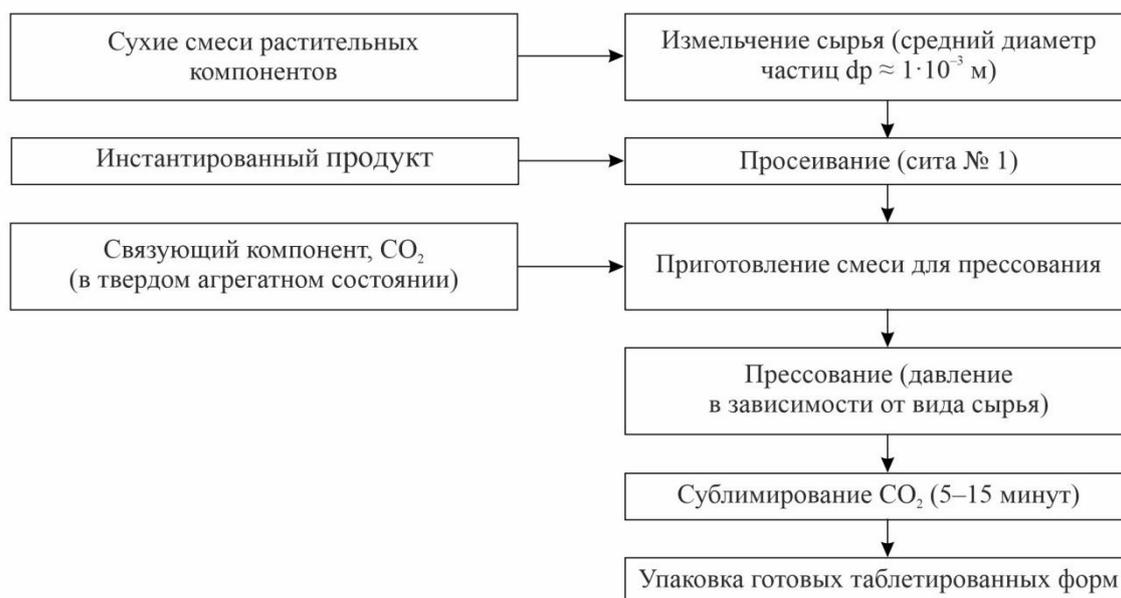


Рис. 3. Технологическая схема производства таблетированных продуктов из растительного сырья

В качестве связующего компонента при таблетировании порошкообразного инстантированного продукта применялся этиловый спирт. А при таблетировании сухих смесей растительного сы-

рья – сахарный раствор с концентрацией 5 %масс.

Результаты распадаемости таблеток без использования CO<sub>2</sub> и с его использованием представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Результаты продолжительности распадаемости таблетированных форм инстантированного продукта без применения CO<sub>2</sub> и с его применением**

Вариант	Продолжительность распадаемости таблетированных форм, с
Без применения CO <sub>2</sub>	90–120
С применением CO <sub>2</sub>	10–15

Полученные результаты подтверждают целесообразность использования CO<sub>2</sub> при таблетировании, так как это позволяет добиться развитой внутренней пористой структуры, что ускоряет процесс распадаемости и, как следствие, снижает продолжительность процесса получения готовых растворов.

Продолжительность процесса распадаемости таблетированных форм, полученных из сухих смесей растительного сырья, также сокращается в 10–15 раз при использовании CO<sub>2</sub>. Кроме того, наблюдалась полная распадаемость, без образования отдельных труднорастворимых частей.

Результаты измерений величины деформации таблетированных форм от давления представлены в виде графика на рисунке 4.

Анализируя полученные кривые, можно выделить две зоны процесса таблетирования. Для первой зоны характерен интенсивный рост величины деформации, что можно объяснить удалением части воздуха и частично сублимированного CO<sub>2</sub>, переориентацией и занятием более выгодных позиций частицами сырья. На второй стадии (зона 2) наблюдается образование адгезионных и когезионных связей, максимальное сближение частиц и формирование прочности готовой таблетированной формы.

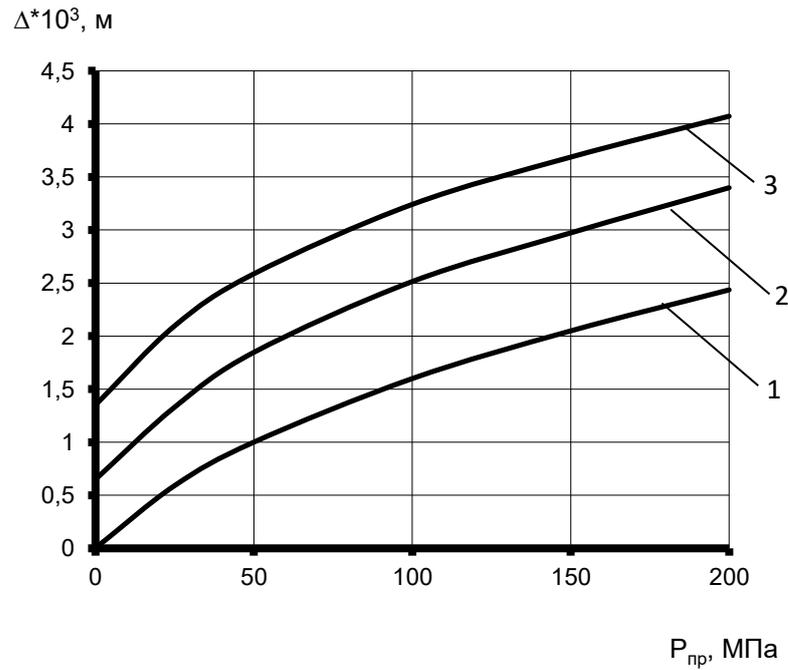


Рис. 4. Кривые таблетирования растительного сырья: 1 – левзея сафлоровидная; 2 – зверобой продырявленный; 3 – ромашка аптечная

Снижение энергозатрат на процесс таблетирования следует осуществлять на первой стадии путем сокращения первой зоны, что может быть достигнуто более высокой степенью измельчения сырья.

Результаты исследования прочностных характеристик готовых таблетированных форм, полученных из сухих смесей растительного сырья, представлены на рисунке 5.

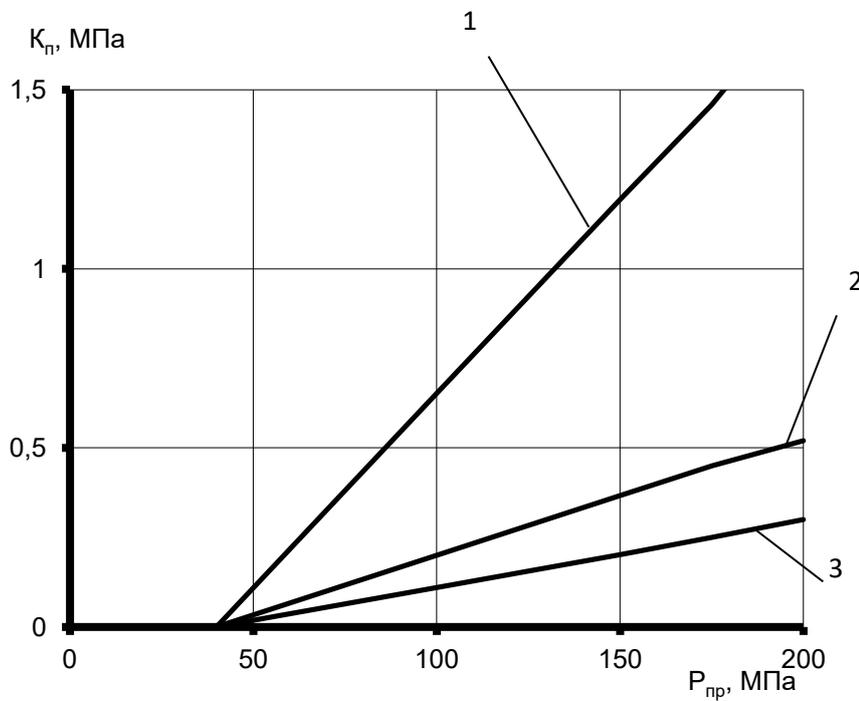


Рис. 5. Прочность таблеток из растительного сырья в зависимости от таблетирования: 1 – левзея сафлоровидная; 2 – зверобой продырявленный; 3 – ромашка аптечная

Из полученных результатов можно сделать вывод, что для различного сырья для получения требуемого коэффициента прочности необходима различная величина прессующего давления. При таблетировании левзеи сафлоровидной коэффициент прочности 0,6–1,0 МПа может быть получен при давлении прессования 100–140 МПа, а для труднотаблетированного сырья –

ромашки аптечной и зверобоя продырявленного необходимо давление выше – 250 МПа.

Зависимость плотности различного растительного сырья от его фракционного состава представлена на рисунке 6.

Анализ полученных данных позволяет утверждать, что пикнометрическая плотность сырья увеличивается при уменьшении размеров частиц.

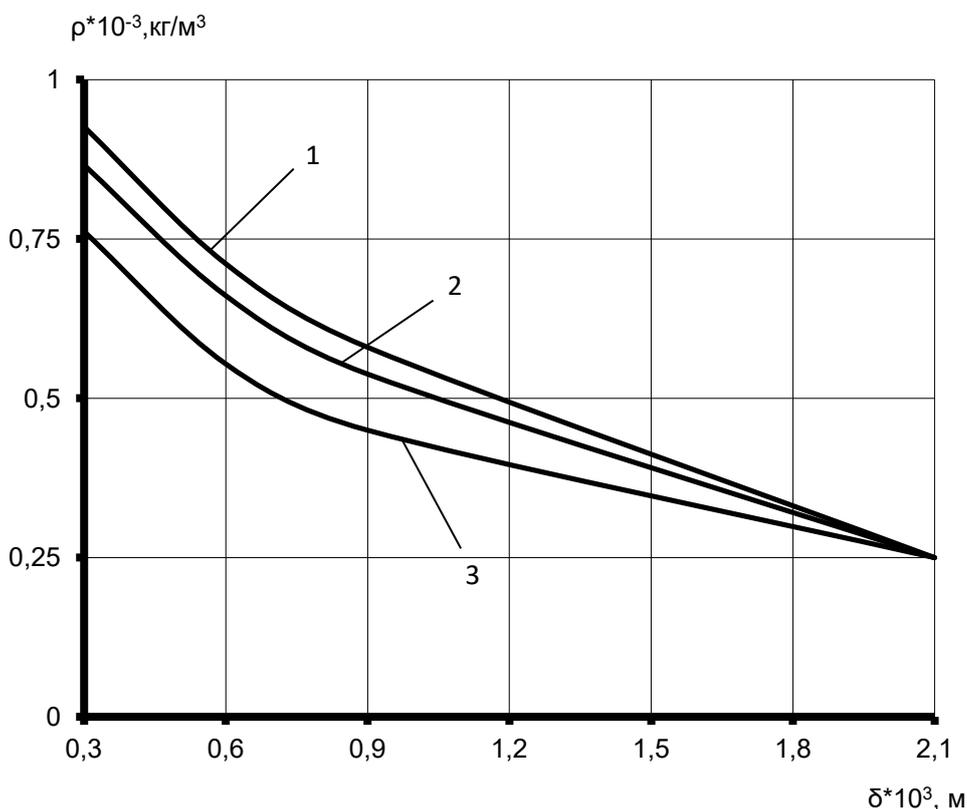


Рис. 6. Изменение пикнометрической плотности растительного сырья от величин фракции: 1 – левзея сафлоровидная; 2 – зверобой продырявленный; 3 – ромашка аптечная

Исследования показали, что прочность таблетированных форм из сухих смесей растительного сырья увеличивается на 12–18 % в соответствующем интервале размеров частиц от 0,3 до 2 м<sup>-3</sup>. Однако высокая степень измельчения ведет к более продолжительной фильтрации готового продукта и незначительно сказывается на степени экстрагирования. Следовательно, оптимальным размером части можно обозначить 1 м<sup>-3</sup>, что увеличивает прочность на 6–8 %. Результаты приведенных ис-

следований установили взаимосвязь между прочностью и плотностью таблетированной формы, а также влияние фракционного состава растительного сырья на прочность готовой таблетки, что позволит более точно проводить расчет технологического процесса таблетирования растительного сырья различных анатомо-морфологических групп.

Кинетические кривые для таблетированных форм левзеи сафлоровидной и традиционного резанного сырья представлены на рисунке 7.

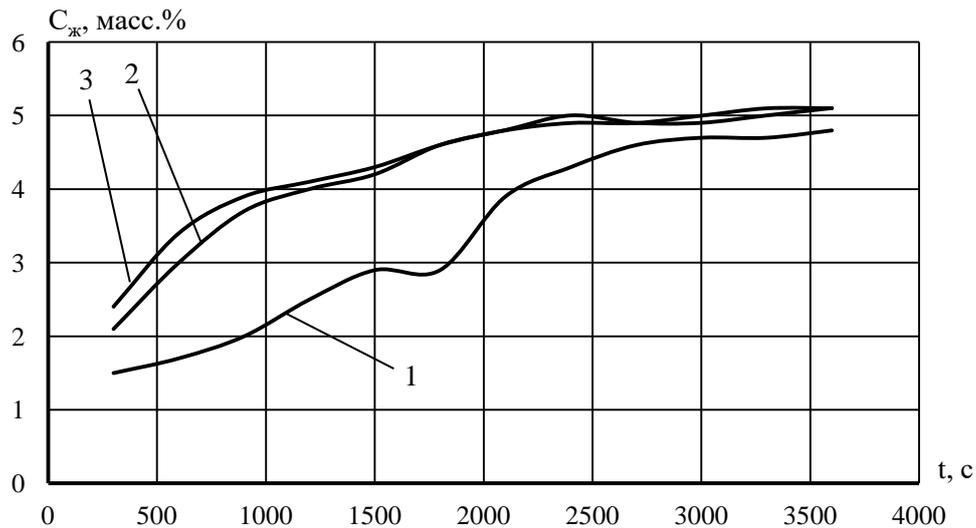


Рис. 7. Кинетические кривые извлечения водорастворимых веществ из левзеи сафлоровидной:  
1 – таблетированная форма без  $\text{CO}_2$ ; 2 – таблетированная форма с  $\text{CO}_2$ ;  
3 – традиционно резаный вид

В процессе приготовления экстрактов скорость распадаемости оказывает прямое влияние на продолжительность получения готовых экстрактов. Так, при высокой скорости распадаемости высвобождаются отдельные частички смеси, увеличивается площадь контакта фаз твердого сырья с экстрагентом, что ведет к сокращению продолжительности процесса экстрагирования и более полному извлечению целевых компонентов.

Кривые извлечения целевых компонентов от продолжительности процесса подтверждают, что применение  $\text{CO}_2$  при таблетировании ведет не только к увеличению скорости распадаемости таблетированных форм, но и сокращению продолжительности экстрагирования и более полному извлечению целевых компонентов.

Для определения зависимости скорости сублимации от давления прессования был проведен ряд экспериментов. Результаты данных ис-

следований позволят усовершенствовать рассмотренную технологию получения таблетированных форм из сухих смесей растительного сырья и инстантированных продуктов с применением  $\text{CO}_2$ .

Для эксперимента использовались таблетки цилиндрической формы, которые имели начальный диаметр 18 мм, высоту  $(20 \pm 1)$  мм и массу  $(7 \pm 0,5)$  г. Замороженная углекислота имела параметры, близкие к исследуемым образцам таблеток. Геометрические отличия связаны с условиями получения.

Образцы находились в морозильной камере с температурой  $-30^\circ\text{C}$ , влажностью 20 %, концентрация  $\text{CO}_2$  в камере не превышала 20 %. Таблетки цилиндрической формы имели начальный диаметр 18 мм, высоту  $(20 \pm 1)$  мм и массу  $(6 \pm 1)$  г.

На рисунке 8 показаны графики сублимации таблеток углекислоты при  $-30^\circ\text{C}$ .

Таблица 2

Начальные параметры таблеток  $\text{CO}_2$ 

Давление таблетки $\text{CO}_2$ , кПа	Вес, г
20	6,38
15	6,88
10	7,2
5	5,95
0	6,5
Замороженный $\text{CO}_2$	5,59

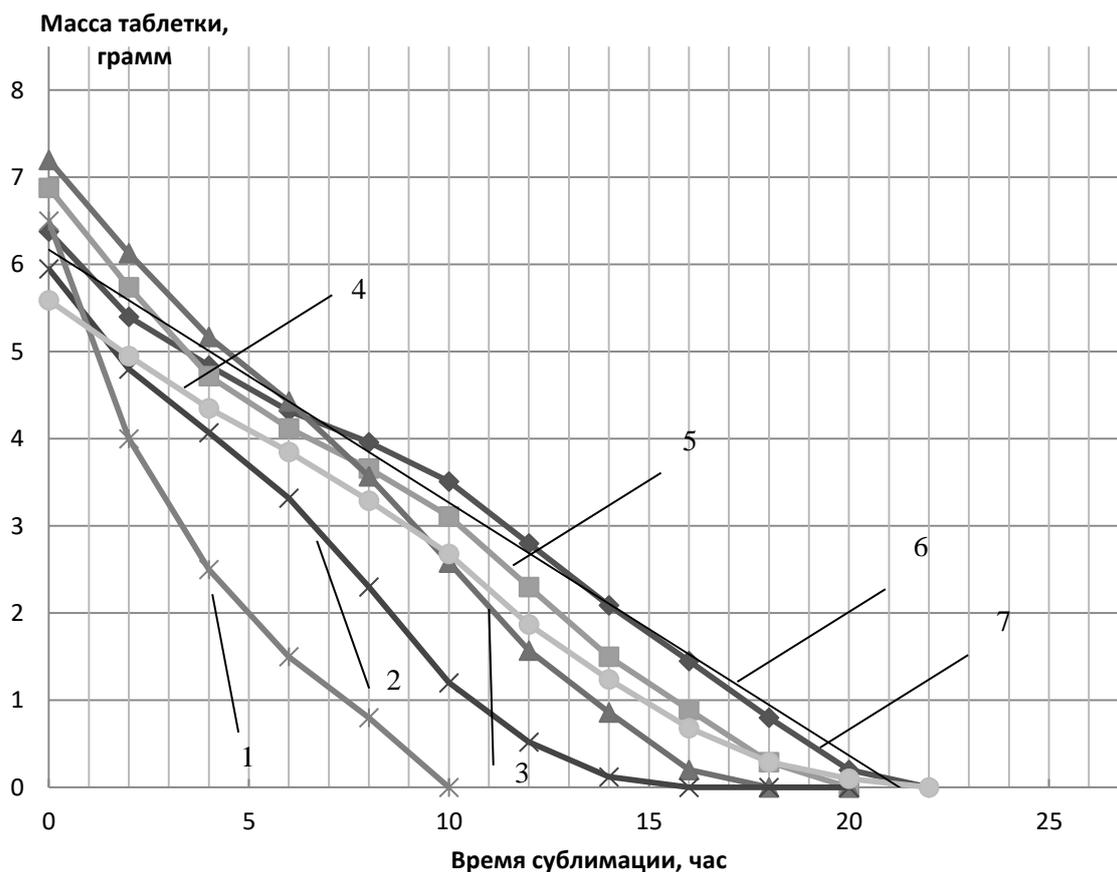


Рис. 8. График сублимации таблеток углекислоты при  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ :  
 1 – 0 кПа; 2 – 5 кПа; 3 – 10 кПа; 4 – 15 кПа; 5 – 20 кПа; 6 – водный лед;  
 7 – замороженный  $\text{CO}_2$

При  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  более явно наблюдается зависимость давления от потери массы таблеток.

Анализируя графики, можно сделать вывод, что продолжительность сублимации снегообразного  $\text{CO}_2$  при 20 кПа и замороженного  $\text{CO}_2$  составила 22 ч. У таблеток, прессованных при 15 и 10 кПа, продолжительность составила 20 и 18 ч соответственно. С большим отрывом образец, прессованный при 5 кПа, – 15 ч. При этом эксперимент подтверждает, что необходимость прессовать, хоть и небольшим давлением, все же существует, так как разница между прессованным образцом и непрессованным составляет более 5 ч, а разница в сублимировании образцов 5 кПа и ближайшего к нему образца 10 кПа составляет 3 ч.

На данных графиках хорошо видно, что у всех таблетированных образцов через несколько часов наблюдается замедление сублимации, это связано с выпадением инея на поверхности таблеток при конденсации влаги из-за под-

вода тепла от окружающей среды. Выпадение влаги должно было привести к увеличению теплообмена, но выпавшая влага при низкой температуре в камере вымерзала, образуя слой рыхлого инея, который выступает в качестве теплоизоляции, поэтому под ним процесс сублимации происходил медленнее. При этом данный эффект заметен независимо от температуры хранения, но чем ниже температура хранения, тем быстрее вымерзала влага и выпадал иней.

Также было замечено, что у замороженного монолитного  $\text{CO}_2$  выпадение инея наблюдалось в меньшей степени, тем самым графики имеют более линейный характер, чем прессованного снегообразного  $\text{CO}_2$ .

**Заключение.** Использование таблетированных форм позволяет сократить потери сырья при транспортировании, облегчить дозировку компонентов.

Способ таблетирования с применением CO<sub>2</sub> в твердом агрегатном состоянии позволяет создать при последующей сублимации развитую пористую структуру, что позволит сократить продолжительность распадаемости таблеток. Так, скорость распадаемости таблетированных форм, полученных из порошкового сырья, сокращается более чем в 9 раз, а таблетированные формы, полученные из сухих смесей растительного сырья, распадаются быстрее (более чем в 10 раз).

Использование CO<sub>2</sub> для таблетирования сухих смесей растительного сырья ведет к более полной распадаемости при приготовлении экстрактов, что позволяет получать качественный продукт.

### Список источников

1. Исследование процесса уноса мелкодисперсной фракции при производстве инстантированных продуктов / К.Б. Плотников [и др.] // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. «Процессы и аппараты пищевых производств». 2021. № 4 (50). С. 37–45.
2. Исследование удельных энергозатрат процессов структурообразования и сушки инстантированных продуктов / А.М. Попов [и др.] // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2021. № 3. С. 190–199.
3. Arshad M.S., Sedhain K., Hussain A. Quantification of carbon dioxide released from effervescent granules as a predictor of formulation quality using modified Chittick apparatus // Tropical Journal of Pharmaceutical Research. 2019. Vol. 18 (3). P. 449–458.
4. Sadi S.S., Kalimullin M.I., Poznyakovskiy V.M. An innovative technology for natural raw materials processing and phytocomplex production of a functional purpose // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. T. 395, №. 1. С. 012089.
5. Соболев И.В. Влияние технологической обработки на сохраняемость пектиновых веществ растительного сырья // Вестник КрасГАУ. 2019. № 1 (142). С. 167–172.
6. Мартыненко К.В., Баланов П.Е., Смотров И.В. Исследование потенциала экстрактов из вегетативных частей растений Алтая для использования в пищевой промышленности // Вестник КрасГАУ. 2022. № 10(187). С. 215–220.
7. Neverov E.N. Studying the sublimation of carbon dioxide / E.N. Neverov [et al.] // Periodico Tche Quimica. 2021. T. 18, № 37. С. 1–12.
8. Alenezi A., Kapat J.S. Thermodynamic analysis of CO<sub>2</sub> Allam cycle for concentrated solar power complemented with oxycombustion // In Proceedings of AIAA Propulsion and Energy Forum, Indianapolis. Indiana, USA, 2019.
9. Аппаратное оформление производства твердого диоксида углерода / Е.Н. Неверов [и др.] // Вестник Международной академии холода. 2020. № 1. С. 22–26.
10. Исследование параметров процесса теплообмена при сублимации диоксида углерода / Е.Н. Неверов [и др.] // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2020. № 6 (159). С. 215–222.
11. ГОСТ 28562-90. Продукты переработки плодов и овощей. Рефрактометрический метод определения растворимых сухих веществ. М.: Стандартинформ, 1990. 12 с.
12. Пат. RU 2748361 С1. Способ получения таблетированных инстантированных продуктов / Плотников И.Б. [и др.]. № 2020119275; заявл. 03.06.2020; опубл. 24.05.2021.
13. Перспективные направления декарбонизации промышленного производства с высокой составляющей углеродного следа в выпускаемой продукции / Е.Н. Неверов [и др.] // Ползуновский вестник. 2022. № 4. Т. 2. С. 54–65.
14. Thermodynamic properties for carbon dioxide / Wang Jun [et al.] // Acs Omega. 2019. Vol. 4. P. 19193–19198.
15. The antibacterial activity of the tablets with dry extract of round-leaved wintergreen leaves / L. Budniak [et al.] // Pharmacologyonline. 2021. T. 2. С. 672–679.
16. Water sustainability: A waterless life cycle for cosmetic products / J.B. Aguiar [et al.] // Sustainable Production and Consumption. 2022. T. 32. С. 35–51.
17. Development of a technology for the production of a functional food based on plant raw materials / T.A. Isrigova [et al.] // E3S Web of

- Conferences. EDP Sciences, 2020. T. 222. С. 03003.
18. Review of real-time release testing of pharmaceutical tablets: State-of-the art, challenges and future perspective / *D. Markl* [et al.] // International journal of pharmaceutics. 2020. T. 582. С. 119353.
  19. The comparison of two challenging low dose APIs in a continuous direct compression process / *T. Ervasti* [et al.] // Pharmaceutics. 2020. T. 12, № 3. С. 279.
  20. *Иодис В.А., Сарайкина И.П., Акжигитов А.А.* Проектирование схемы установки получения твердого диоксида углерода // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития. Петропавловск-Камчатский, 2022. С. 93–96.

### References

1. Issledovanie processa unosa melkodispersnoj frakcii pri proizvodstve instantirovannyh produktov / *K.B. Plotnikov* [i dr.] // Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Ser. «Processy i apparaty pischevyh proizvodstv». 2021. № 4 (50). С. 37–45.
2. Issledovanie udel'nyh `energozatrata processov strukturoobrazovaniya i sushki instantirovannyh produktov / *A.M. Popov* [i dr.] // Tehnologii pischevoj i pererabatyvayuschej promyshlennosti APK – produkty zdorovogo pitaniya. 2021. № 3. С. 190–199.
3. *Arshad M.S., Sedhain K., Hussain A.* Quantification of carbon dioxide released from effervescent granules as a predictor of formulation quality using modified Chittick apparatus // Tropical Journal of Pharmaceutical Research. 2019. Vol. 18 (3). P. 449–458.
4. *Sadi S.S., Kalimullin M.I., Poznyakovskiy V.M.* An innovative technology for natural raw materials processing and phytocomplex production of a functional purpose // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. T. 395, №. 1. С. 012089.
5. *Sobol' I.V.* Vliyaniye tehnologicheskoy obrabotki na sohranyaemost' pektinovyh veschestv rastitel'nogo syr'ya // Vestnik KrasGAU. 2019. № 1 (142). С. 167–172.
6. *Martynenko K.V., Balanov P.E., Smotraeva I.V.* Issledovanie potentsiala `ekstraktov iz vegetativnyh chastej rastenij Altaya dlya ispol'zovaniya v pischevoj promyshlennosti // Vestnik KrasGAU. 2022. № 10(187). С. 215–220.
7. *Neverov E.N.* Studying the sublimation of carbon dioxide / *E.N. Neverov* [et al.] // Periodico Tche Quimica. 2021. T. 18, № 37. С. 1–12.
8. *Alenezi A., Kapat J.S.* Thermodynamic analysis of CO<sub>2</sub> Allam cycle for concentrated solar power complemented with oxycombustion // In Proceedings of AIAA Propulsion and Energy Forum, Indianapolis, Indiana, USA, 2019.
9. Apparatnoe oformlenie proizvodstva tverdogo dioksida ugleroda / *E.N. Neverov* [i dr.] // Vestnik Mezhdunarodnoj akademii holoda. 2020. № 1. С. 22–26.
10. Issledovanie parametrov processa teploobmena pri sublimacii dioksida ugleroda / *E.N. Neverov* [i dr.] // Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2020. № 6 (159). С. 215–222.
11. GOST 28562-90. Produkty pererabotki plodov i ovoschej. Refraktometricheskij metod opredeleniya rastvorimyh suhikh veschestv. M.: Standartinform, 1990. 12 s.
12. Pat. RU 2748361 C1. Sposob polucheniya tabletirovannyh instantirovannyh produktov / *Plotnikov I.B.* [i dr.]. № 2020119275; zayavl. 03.06.2020; opubl. 24.05.2021.
13. Perspektivnye napravleniya dekarbonizacii promyshlennogo proizvodstva s vysokoj sostavlyayuschej uglerodnogo sleda v vypuskaemoj produkcii / *E.N. Neverov* [i dr.] // Polzovnikovskij vestnik. 2022. № 4. T. 2. С. 54–65.
14. Thermodynamic properties for carbon dioxide / *Wang Jun* [et al.] // Acs Omega. 2019. Vol. 4. P. 19193–19198.
15. The antibacterial activity of the tablets with dry extract of round-leaved wintergreen leaves / *L. Budniak* [et al.] // Pharmacologyonline. 2021. T. 2. С. 672–679.
16. Water sustainability: A waterless life cycle for cosmetic products / *J.B. Aguiar* [et al.] // Sustainable Production and Consumption. 2022. T. 32. С. 35–51.
17. Development of a technology for the production of a functional food based on plant raw materials / *T.A. Isrigova* [et al.] // E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2020. T. 222. С. 03003.

18. Review of real-time release testing of pharmaceutical tablets: State-of-the art, challenges and future perspective / *D. Markl* [et al.] // International journal of pharmaceutics. 2020. T. 582. S. 119353.
19. The comparison of two challenging low dose APIs in a continuous direct compression process / *T. Ervasti* [et al.] // Pharmaceutics. 2020. T. 12, № 3. S. 279.
20. *Iodis V.A., Sarajkina I.P., Akzhigitov A.A.* Proektirovanie shemy ustanovki polucheniya tverdogo dioksida ugleroda // Tehnicheskaya `ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya. Petropavlovsk-Kamchatsky, 2022. S. 93–96.

Статья принята к публикации 18.05.2024 / The article accepted for publication 18.05.2024.

Информация об авторах:

**Евгений Николаевич Неверов**<sup>1</sup>, заведующий кафедрой техносферной безопасности, доктор технических наук,

**Игорь Борисович Плотников**<sup>2</sup> доцент кафедры мехатроники и автоматизации технологических систем, кандидат технических наук

**Павел Сергеевич Коротких**<sup>3</sup>, старший преподаватель кафедры теплохладотехники, кандидат технических наук

**Любовь Васильевна Плотникова**<sup>4</sup>, старший преподаватель кафедры техносферная безопасность, кандидат технических наук

Information about the authors:

**Evgeny Nikolaevich Neverov**<sup>1</sup>, Head of the Department of Technosphere Safety, Doctor of Technical Sciences

**Igor Borisovich Plotnikov**<sup>2</sup> Associate Professor at the Department of Mechatronics and Automation of Technological Systems, Candidate of Technical Sciences

**Pavel Sergeevich Korotkikh**<sup>3</sup>, Senior Lecturer, Department of Thermal and Cooling Engineering, Candidate of Technical Sciences

**Lyubov Vasiliievna Plotnikova**<sup>4</sup>, Senior Lecturer, Department of Technosphere Safety, Candidate of Technical Sciences

