Статья поступила в редакцию: 01.10.2026
Статья принята к публикации: 08.10.2026
Статья опубликована: 28.10.2026

УДК 66.061+664.8

DOI: 10.32743/UniTech.2026.151.10.23548

Исследование и интенсификация процесса водной экстракции из вторичного сырья, образующегося после отжима сока из плодов граната (*Punica Granatum* L.)

Мамажонов Азаматилло Бахтиёр ўғли
магистрант
Ташкентский фармацевтический институт
Республика Узбекистан, г. Ташкент
E-mail: azamatillomamajonov@gmail.com
Ахмедов Анвар Джабаралиевич
базовый докторант (PhD)
Институт химии растительных веществ АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Мамадалиева Нилуфар Зокиржоновна
д-р техн. наук, проф.
Институт химии растительных веществ АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Хажибаев Темурбек Атаханович
PhD по техническим наукам
Институт химии растительных веществ АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Абдурахманов Бахтияр Алимович
PhD по техн. наукам
Институт химии растительных веществ АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Маматханов Ахматхон Умарханович
д-р техн. наук, проф.
Институт химии растительных веществ АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент
Халилов Равшанжон Муратджанович
д-р техн. наук, проф.
Институт химии растительных веществ АН РУз
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Библиографическое описание: Исследование и интенсификация процесса водной экстракции из вторичного сырья, образующегося после отжима сока из плодов граната (Punica Granatum L.) // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Мамажонов А.Б.Ў. [и др.]. 2026. 10(151). URL: https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23548

Investigation and intensification of the aqueous extraction process from secondary raw materials generated after juice pressing of pomegranate fruits (*Punica Granatum* L.)

Mamajonov Azamatullo
Master's student, Tashkent Pharmaceutical Institute
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Akhmedov Anvar
PhD candidate
Institute of the Chemistry of Plant Substances
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Mamadalieva Nilufar
doctor of Sciences, Professor
Institute of Chemistry of Plant Substances
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Khajibaev Temurbek
PhD
in Technical Sciences Institute of Chemistry of Plant Substances
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Abdurakhmanov Bakhtiyar
PhD
in Technical Sciences Institute of Chemistry of Plant Substances
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Mamatkhanov Akhmatkhon
doctor of Technical Sciences, Professor
Institute of Chemistry of Plant Substances
Republic of Uzbekistan, Tashkent
Khalilov Ravshanjon
doctor of Technical Sciences, Professor
Institute of Chemistry of Plant Substances
Republic of Uzbekistan, Tashkent

Аннотация

Целью исследования являлось установление рациональных условий и интенсификация процесса водной экстракции из вторичного сырья плодов граната (*Punica granatum* L.), образующегося после отжима сока, для последующего получения сухого экстракта. В качестве исходного сырья использовали вторичное сырье граната, предварительно высушенное до остаточной влажности 7–8 % и разделенное на семена и кожуру. Проведено сравнительное изучение трех способов водной экстракции: ремацерации, принудительной циркуляции экстрагента и перемешивания. Установлено, что выход экстрактивных веществ составил 19,09; 25,41 и 25,80 % соответственно. Метод принудительной циркуляции обеспечивал близкий к максимальному выход экстрактивных веществ при общем гидромодуле 1:14, тогда как при перемешивании общий гидромодуль составлял 1:26. Для установления рациональных условий экстракции методом принудительной циркуляции использовали план латинских квадратов 3×3 с изучением влияния соотношения сырья и экстрагента, скорости циркуляции и степени измельченности сырья. Дополнительно изучена динамика процесса при последовательной экстракции. Установлено, что рациональная продолжительность первой экстракции составляет 300 мин, второй и третьей — по 180 мин. Суммарный выход экстрактивных веществ при трехкратной экстракции составил 25,6 %.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности интенсификации процесса водной экстракции путем применения принудительной циркуляции экстрагента и могут быть использованы при дальнейшей разработке технологии получения сухого экстракта из вторичного сырья плодов граната.

Abstract

The aim of the study was to establish rational conditions and intensify the aqueous extraction process from secondary raw materials of pomegranate fruits (*Punica granatum* L.) generated after juice pressing for the subsequent production of a dry extract. The secondary pomegranate raw material was preliminarily dried to a residual moisture content of 7–8 % and separated into seeds and peel. A comparative study of three aqueous extraction methods was carried out: remaceration, forced circulation of the extracting agent, and stirring. The yields of extractive substances were found to be 19.09, 25.41, and 25.80 %, respectively. Forced circulation provided a yield of extractive substances close to the maximum at a total hydromodule of 1:14, whereas the total hydromodule for stirring was 1:26. A 3×3 Latin square experimental design was used to establish rational extraction conditions by forced circulation, with the effects of the raw material-to-extractant ratio, circulation rate, and degree of raw material comminution studied. The extraction dynamics during sequential extraction were additionally investigated. The rational extraction time was established as 300 min for the first extraction and 180 min for each of the second and third extractions. The total yield of extractive substances after three successive extractions was 25.6 %. The results demonstrate the possibility of intensifying the aqueous extraction process by applying forced circulation of the extracting agent and can be used for further development of the technology for producing a dry extract from secondary raw materials of pomegranate fruits.

Ключевые слова: Punica granatum L, вторичное сырье, плоды граната, экстракция, оптимизация процесса.

Keywords: Punica granatum L, secondary raw materials, pomegranate fruits, aqueous extraction, process intensification, forced circulation, dry extract.

Введение

Современная перерабатывающая промышленность ориентирована не только на повышение эффективности использования растительного сырья, но и на рациональное вовлечение в технологический процесс вторичных ресурсов, образующихся при производстве пищевой продукции. Особый интерес представляют растительные побочные продукты, содержащие биологически активные соединения и потенциально пригодные для получения экстрактов и других продуктов с добавленной стоимостью [6, 9, 10].

Гранат (*Punica granatum* L.) является ценным плодовым растением, широко используемым для производства соков и других продуктов переработки. При промышленном отжиме сока образуется значительное количество вторичного сырья, представленного преимущественно кожурой и семенами плодов. Данные части плода содержат полифенольные соединения, дубильные вещества, флавоноиды, органические кислоты и другие биологически активные компоненты, что обусловливает перспективность их

дальнейшего технологического использования [6, 9, 10]. Вовлечение данного сырья в переработку позволяет повысить степень использования растительных ресурсов и расширить сырьевую базу для получения растительных экстрактов.

Кожура граната рассматривается как богатый источник фенольных соединений, включая эллаготанины, флавоноиды и другие компоненты полифенольного комплекса [10,8]. Исследования также показывают перспективность использования гранатовых побочных продуктов в качестве источников ценных соединений для пищевой и других отраслей промышленности [6,9]. В связи с этим вторичное сырье, образующееся после отжима сока из плодов граната, представляет интерес как объект для разработки технологии получения экстрактивных веществ с последующим получением сухого экстракта.

Одним из основных этапов разработки технологии получения растительных экстрактов является выбор рационального способа извлечения целевых компонентов. Эффективность экстракции зависит от природы экстрагента, соотношения сырья и экстрагента, температуры, продолжительности процесса, степени измельчения сырья и интенсивности массообмена [6,8]. В литературе описан широкий спектр традиционных и интенсифицированных методов экстракции биологически активных соединений из побочных продуктов граната, включая мацерацию, экстракцию при перемешивании, ультразвуковую и другие методы [6,8].

При разработке технологического процесса получения растительных экстрактов особое значение имеют методы, отличающиеся простотой аппаратурного оформления, возможностью масштабирования и использованием безопасных экстрагентов. В этом отношении представляет интерес водная экстракция, позволяющая получать экстракты без применения органических растворителей. Вместе с тем эффективность водного извлечения определяется условиями контакта растительного сырья с экстрагентом и интенсивностью массообменных процессов. Поэтому повышение интенсивности перемещения экстрагента в экстракционной системе может рассматриваться как один из путей интенсификации процесса [8].

Применение принудительной циркуляции экстрагента обеспечивает постоянное перемещение жидкой фазы через слой растительного сырья и способствует интенсификации массообмена между сырьем и экстрагентом. При этом рациональный выбор соотношения сырья и экстрагента, скорости циркуляции и степени измельчения сырья позволяет регулировать эффективность извлечения и продолжительность технологического процесса. Установление взаимосвязи между указанными параметрами представляет практический интерес при разработке технологии переработки вторичного сырья плодов граната.

Для получения удобной для хранения, транспортирования и дальнейшего технологического использования формы жидкий экстракт может быть переведен в сухое состояние. Распылительная сушка является распространенным способом получения сухих растительных экстрактов, позволяющим быстро удалять влагу из диспергированного раствора и получать порошкообразный продукт. Эффективность данного процесса зависит от характеристик исходного экстракта и параметров сушки. Поэтому разработка технологии получения сухого экстракта должна рассматриваться как последовательность взаимосвязанных технологических стадий, начиная с подготовки вторичного сырья и выбора рациональных условий экстракции.

Для установления рациональных условий технологических процессов применение методов математического планирования эксперимента позволяет одновременно оценивать влияние нескольких факторов и получать необходимую информацию при ограниченном числе опытов. Такой подход представляет интерес и при исследовании процессов экстракции растительного сырья, где выход экстрактивных веществ зависит от совокупного действия нескольких технологических параметров [8].

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных химическому составу и потенциальному использованию кожуры и других побочных продуктов граната, вопросы разработки технологически обоснованного процесса водной экстракции вторичного сырья, образующегося непосредственно после отжима сока и содержащего смесь кожуры и семян, требуют дальнейшего изучения [6, 8–10]. В частности, представляет интерес сравнительное исследование различных способов экстракции, установление рациональных параметров принудительной циркуляции экстрагента и изучение динамики последовательного извлечения экстрактивных веществ.

Целью исследования: Установление рациональных условий и интенсификация процесса водной экстракции вторичного сырья, образующегося после отжима сока из плодов граната (*Punica granatum* L.), путем сравнительного изучения способов экстракции, математического планирования эксперимента и исследования динамики последовательного извлечения экстрактивных веществ.

Экспериментальная часть

В качестве исходного сырья для проведения исследований использовали вторичное сырье, образующееся после отжима сока из плодов граната (*Punica granatum* L.), относящегося к семейству Lythraceae. Сырье было получено непосредственно от производителей гранатового сока в Узбекистане.

Товароведческий анализ исходного сырья проводили с целью определения его основных качественных и количественных характеристик, а также выхода отдельных морфологических частей, используемых в последующих экспериментальных исследованиях.

Полученное вторичное сырье предварительно измельчали с помощью ножа или топора до размеров около 5,0 см в длину и 1,0 см в ширину. Затем измельченное сырье сушили в установке с принудительной циркуляцией горячего воздуха при температуре 60 ± 5 °C до достижения влажности 7–8 %.

После сушки сырье вручную разделяли на семена и кожуру. При этом особое внимание уделяли максимально полному удалению остатков кожуры с поверхности семян. Выделенные фракции взвешивали отдельно и определяли их массу и выход по отношению к исходной массе сырья.

Выход отдельных фракций рассчитывали по формуле:

$$X = \frac{m_1}{m_0} \bullet 100 ; \quad (1)$$

где X — выход фракции, %; m_1 — масса выделенной фракции, кг; m_0 — масса исходного сырья, кг.

Из 5,0 кг свежего вторичного сырья, полученного после отжима сока из плодов граната, было выделено 1,94 кг семян и 3,06 кг кожуры.

Выход семян составил:

X = (1,94 / 5,0) × 100 = 38,8 %.

Выход кожуры составил:

X = (3,06 / 5,0) × 100 = 61,2 %.

Таким образом, для проведения дальнейших экспериментальных исследований использовали подготовленное вторичное сырье плодов граната, высушенное до остаточной влажности 7–8 % и разделенное на две основные фракции — семена и кожуру. В исходном сырье содержание семян составило 38,8 %, кожуры — 61,2 %. Полученные фракции использовали в дальнейших исследованиях в качестве исследуемого растительного сырья.

Выход экстрактивных веществ определяли следующим образом: точную навеску (100 мл) водного экстракта помещали в предварительно высушенный и взвешенный бюкс. Бюкс с экстрактом помещали в сушильный шкаф и сушили при температуре 60 °С. При высушивании открытый бюкс вместе с крышкой помещали в эксикатор для охлаждения на 50 мин, затем закрывали и взвешивали. Первое взвешивание проводили после сушки в течение 2 ч. Последующие взвешивали после каждого часа дальнейшего высушивания. Процесс сушки проводили до постоянной массы. Массовую долю сухого остатка (в %) вычисляли по формуле 2:

$$W = \frac{m_2 - m_1}{m} \cdot 100 ; \quad (2)$$

где: т – навеска, г; $т_1$– масса чашки, г; $т_2$– масса чашки с остатком после высушивания, г.

С целью выбора оптимального способа извлечения экстрактивных веществ из вторичного сырья плодов граната, образующегося после отжима сока, исходное сырье экстрагировали водой различными способами.

Способ 1 - ремацерация. 10,0 кг вторичного сырья плодов граната загружали в экстрактор и заливали 60,0 л очищенной воды. Экстракцию проводили в течение 8 часов при температуре 60 °С. После завершения экстракции полученный экстракт сливали в количестве 40,0 л, после чего в экстрактор заливали 40,0 л новой порции очищенной воды и проводили вторую экстракцию в аналогичных условиях. Таким же образом проводили третью экстракцию. Общий расход экстрагента при трехкратной экстракции составил 140,0 л, а соотношение растительного сырья и экстрагента (общий гидромодуль) — 1:14.

Способ 2 - экстракция с принудительной циркуляцией экстрагента. В экстрактор с установленным насосом для циркуляции экстрагента загружали 10,0 кг вторичного сырья плодов граната и заливали 60,0 л очищенной воды. Экстракцию проводили при температуре 60 °С с циркуляцией экстрагента со скоростью 100 л/ч для экстрактора с рабочим объёмом 1 м³. Экстрагент отбирали из нижней части экстрактора и подавали в верхнюю часть в виде душа. Первую экстракцию проводили в течение 8 часов, после чего экстракт сливали в количестве 40,0 л. В экстрактор заливали новую порцию очищенной воды в количестве

40,0 л и проводили вторую экстракцию в аналогичных условиях. Таким же образом проводили третью экстракцию. Общий расход экстрагента составил 140,0 л, а общий гидромодуль при трехкратной экстракции — 1:14.

Способ 3. Экстракция методом перемешивания. В экстрактор, оборудованный мешалкой, загружали 10,0 кг вторичного сырья плодов граната и заливали 100,0 л очищенной воды. Затем включали мешалку, вращавшуюся со скоростью 50 об/мин для экстрактора с рабочим объёмом 1 м³, и проводили экстракцию при температуре 60 °С в течение 8 часов. После завершения экстракции мешалку отключали, а экстракт сливали в количестве 80,0 л. В экстрактор заливали новую порцию очищенной воды в количестве 80,0 л и проводили вторую экстракцию в аналогичных условиях. Таким же образом проводили третью экстракцию. Общий расход экстрагента составил 260,0 л, а общий гидромодуль при трехкратной экстракции — 1:26.

Полученные экстракты объединяли и определяли содержание экстрактивных веществ в соответствии с описанной выше методикой.

Для оптимизации процесса экстракции экстрактивных веществ из вторичного сырья плодов граната методом принудительной циркуляции экстрагента эксперименты проводили по плану латинских квадратов 3×3.

Для установления оптимальных условий экстракции экстрактивных веществ из вторичного сырья плодов граната методом принудительной циркуляции экстрагента процесс экстракции проводили аналогично способу 2. В процессе экстракции через определённые интервалы времени отбирали пробы экстракта и определяли содержание экстрактивных веществ в соответствии с описанной выше методикой. Экстракцию прекращали при достижении фазового равновесия. После этого проводили вторую, третью и четвертую экстракции аналогично первой.

Результаты и их обсуждение

Для выбора рационального способа получения сухого экстракта из вторичного сырья плодов граната проведено сравнительное исследование различных способов водной экстракции. Оценивали выход экстрактивных веществ, общий гидромодуль и основные технологические параметры процесса. Полученные результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1. Влияние способа экстракции на выход сухого экстракта и технологические показатели процесса получения сухого экстракта из вторичного сырья плодов граната

Способ экстракции	Выход сухого экстракта, %	Общий гидромодуль
Ремацерация	19,09	1:14
Принудительная циркуляция	25,41	1:14
Перемешивание	25,80	1:26

Как видно из данных табл. 1, способ экстракции оказывает существенное влияние на выход экстрактивных веществ из вторичного сырья плодов граната. При ремацерации выход сухого экстракта составил 19,09 %, тогда как при использовании принудительной циркуляции и перемешивания данный показатель достигал 25,41 и 25,80 % соответственно.

Наибольший выход сухого экстракта получен при экстракции методом перемешивания — 25,80 %. Однако данный способ характеризовался более высоким общим расходом экстрагента, соответствующим гидромодулю 1:26. При использовании метода принудительной циркуляции выход сухого экстракта составил 25,41 %, что лишь на 0,39 процентного пункта ниже значения, полученного при перемешивании, при этом общий гидромодуль составлял 1:14.

Таким образом, применение принудительной циркуляции экстрагента обеспечивало получение близкого к максимальному выхода сухого экстракта при значительно меньшем расходе экстрагента по сравнению с методом перемешивания. В связи с этим метод принудительной циркуляции был выбран для дальнейшего изучения и оптимизации условий экстракции вторичного сырья плодов граната.

Исследование технологических процессов представляет собой трудоёмкий и длительный экспериментальный процесс, поэтому получение максимального объёма информации при минимальном числе опытов является важной задачей при разработке технологии. Применение методов математического планирования эксперимента позволяет повысить эффективность исследований и определить оптимальные условия проведения технологического процесса. В настоящее время для оптимизации и прогнозирования химико-технологических процессов широко применяются различные методы математического планирования эксперимента, в том числе методы Бокса–Уилсона, Бокса–Бенкена и планы латинских квадратов (3×3, 4×4 и др.) [1, 3–5, 7].

Для установления оптимальных условий экстракции экстрактивных веществ из вторичного сырья плодов граната методом принудительной циркуляции экстрагента нами использован план латинских квадратов 3×3.

В качестве факторов изучали следующие:

A – соотношение сырья и растворителя: A_1=1:3; A_2= 1:4; A_3=1:5.

B – скорость циркуляции экстрагента (на рабочий объёмом 1 м³): B_1 =80 л/ч; B_2=90 л/ч; B_3=100 л/ч.

C – степень измельченности сырья: C_1=4 мм; C_2= 8 мм; C_3=12 мм.

Опыты проводили по плану, приведенному в табл. 2.

Во всех опытах количество сырья и метод выделения были идентичными. В опытах использовали по 1,0 кг воздушно-сухого сырья. Параметром оптимизации служил выход экстрактивных веществ к массе сырья при первом контакте фаз. Результаты опытов представлены в табл. 2.

Таблица 2. План эксперимента и результаты эксперимента (среднее из двух значений)

План экспериментов				**Результаты экспериментов**			**Число опытов**	**Повторность опытов**
Факторы	**A_1**	**A_2**	**A_3**	**Выход экстрактивных веществ к массе сырья**				
B_1	C_1	C_2	C_2	9,2	8,8	14,1	N = 9	f = 2
B_2	C_2	C_3	C_1	5,3	9,3	12,4		
B_3	C_3	C_1	C_3	4,9	5,4	6,7		

Для установления значимости факторов провели дисперсионный анализ результатов эксперимента. Для этого в начале найдены суммы показателей каждого фактора по формуле 3:

$$T = \Sigma T_{ij} \quad (3)$$

Для этого в начале рассчитали суммы показателей каждого фактора (T_{ij}) и их средние значения (табл. 3).

Таблица 3. Сумма каждого фактора и их средние значения

Искомые значения	Фактор А			Фактор В			Фактор С		
	A_1	A_2	A_3	B_1	B_2	B_3	C_1	C_2	C_3
Сумма T_{ij}	19,4	23,5	33,2	32,1	27,0	17,0	27,0	28,2	20,9
Среднее	6,5	7,8	11,1	10,7	9,0	5,7	9,0	9,4	6,9

Данные, представленные в табл. 3, были использованы в формуле 3 для расчёта суммарных показателей влияния каждого фактора:

Результат: T = 76,1.

Дисперсию квадратов показателей всех наблюдений анализировали по формуле 4:

$$S^2=\Sigma Y_{ij}^{\ 2}\ ; \quad (4)$$

Результат: S^2=727,29.

Суммы квадратов каждого фактора вычисляли по формуле 5:

$$S_a^2 = \frac{1}{n}\sum T_{ij}^2\ ,\quad S_b^2 = \frac{1}{n}\sum T_{ij}^2\ ,\quad S_c^2 = \frac{1}{n}\sum T_{ij}^2 \quad (5)$$

Результат: $S_a^{\ 2}$ = 676,95;

$S_b^{\ 2}$ = 682,80;

$S_c^{\ 2}$ = 653,68.

На следующем этапе определены средние значения суммы квадратов T/N, затем общие значения суммы квадратов рассчитали по формуле 6:

$$SS_{общ} = S^2 - \frac{T^2}{N} \quad (6)$$

Результат: T/N =643,47.

$SS_{общ}$=83,82.

Суммы квадратов группы факторов вычисляли по формуле 7:

$$SS_a = S_a^2 - \frac{T^2}{N}\ ,\quad SS_b = S_b^2 - \frac{T^2}{N}\ ,\quad SS_c = S_c^2 - \frac{T^2}{N} \quad (7)$$

Результат: SS_a = 33,48;

SS_b = 39,34;

SS_c = 10,22.

Затем остаточную дисперсию рассчитали по формуле 8:

$$SS_{ост} = SS_{общ} - SS_a - SS_в - SS_c \quad (8)$$

Результат: $SS_{ост} = 0,79$.

Средний квадрат каждого фактора вычисляли по формуле 9:

$$S_a = \frac{SS_a}{f}; \quad S_b = \frac{SS_b}{f}; \quad S_c = \frac{SS_c}{f}; \quad (9)$$

где: $f = n - 1$

Результат: $S_a = 16,74$;

$S_b = 19,67$;

$S_c = 5,11$.

Остаточную дисперсию среднего квадрата каждого фактора вычисляли по формуле 10:

$$S_{ост} = \frac{SS_{ост}}{f}; \quad (10)$$

где: $f = (n - 1)(n - 2)$

Результат: $S_{ост} = 0,39$

Дисперсионные отношения вычисляли по формуле 11:

$$F_a = \frac{S_a}{S_{ост}}; F_b = \frac{S_b}{S_{ост}}; F_c = \frac{S_c}{S_{ост}}; \quad (11)$$

Результат: $F_a = 42,44$;

$F_b = 49,86$;

$F_c = 12,95$.

Табличное значение критерия Фишера Fтабл. (2,9) = 4,3 [2].

Коэффициент считается значимым, если его дисперсионное отношение превышает значение критерия Фишера. На основании результатов анализа все выбранные факторы признаны значимыми.

Наибольший выход экстрактивных веществ составил 14,1 % и был получен при сочетании факторов $A_3B_1C_2$. В качестве оптимальных значений факторов выбраны: соотношение сырья и растворителя — 1:5; скорость циркуляции экстрагента для экстрактора с рабочим объёмом 1 м³ — 80 л/ч; степень измельчения сырья — 8 мм.

Дальнейшие исследования были направлены на определение оптимальных условий экстракции экстрактивных веществ из вторичного сырья плодов граната методом экстракции с принудительной циркуляцией экстрагента. Результаты проведённых исследований представлены в виде диаграммы на рис. 1.

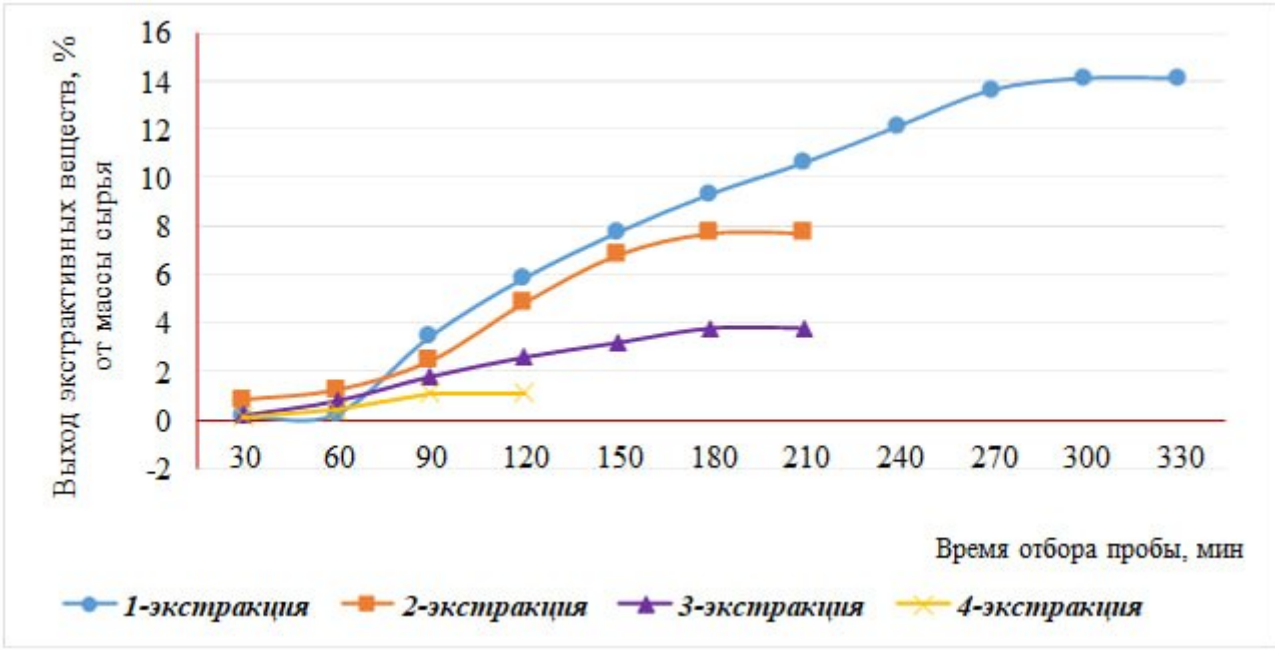


Рисунок 1. Динамика экстракции экстрактивных веществ из вторичного сырья плодов граната методом принудительной циркуляции экстрагента

Как видно из рис. 1, в процессе первой экстракции выход экстрактивных веществ постепенно увеличивался с увеличением продолжительности процесса. В течение первого часа выход экстрактивных веществ был низким, что связано с процессом набухания растительного сырья и постепенным проникновением экстрагента в структуру сырья. После набухания сырья интенсивность извлечения экстрактивных веществ возрастала. Наиболее интенсивное извлечение наблюдалось в интервале от 90 до 240 мин, после чего скорость накопления экстрактивных веществ в экстракте постепенно снижалась. К 300 мин выход достигал 14,1 %, а при дальнейшем увеличении продолжительности экстракции до 330 мин практически не изменялся, что свидетельствовало о приближении процесса к равновесному состоянию.

При второй экстракции основная часть экстрактивных веществ извлекалась в течение первых 180 мин. К этому времени выход достигал 7,7 % и при дальнейшем увеличении продолжительности экстракции до 210 мин практически не изменялся. При третьей экстракции выход экстрактивных веществ к 180 мин достигал 3,8 % и при дальнейшем увеличении времени также оставался практически неизменным.

При проведении четвёртой экстракции количество дополнительно извлекаемых веществ было значительно ниже по сравнению с предыдущими экстракциями. Уже через 120 мин выход составлял около 1,1 %, что указывает на незначительный вклад четвёртой экстракции в общий выход экстрактивных веществ.

Таким образом, результаты изучения динамики экстракции показали, что рациональная продолжительность первой экстракции составляет 300 мин (5 ч), второй и третьей — по 180 мин (3 ч). Суммарный выход экстрактивных веществ при трёхкратной экстракции составил 25,6 %. Проведение четвёртой экстракции нецелесообразно вследствие низкого дополнительного выхода экстрактивных веществ. На основании полученных данных для

дальнейших исследований был выбран трёхкратный способ экстракции с принудительной циркуляцией экстрагента. При этом первая экстракция должна проводиться не менее 5 ч, вторая и третья — по 3 ч.

Вывод

Проведено сравнительное исследование способов извлечения экстрактивных веществ из вторичного сырья плодов граната (*Punica granatum* L.), образующегося после отжима сока. Установлено, что при ремацерации выход экстрактивных веществ составил 19,09 %, при принудительной циркуляции — 25,41 %, а при перемешивании — 25,80 %. Несмотря на несколько более высокий выход при перемешивании, данный способ характеризовался значительным расходом экстрагента (общий гидромодуль 1:26). Метод принудительной циркуляции обеспечивал близкий к максимальному выход при гидромодуле 1:14, в связи с чем был выбран для дальнейшей оптимизации.

По результатам изучения динамики экстракции установлено, что рациональная продолжительность первой экстракции составляет 300 мин (5 ч), второй и третьей — по 180 мин (3 ч). Суммарный выход экстрактивных веществ при трехкратной экстракции составил 25,6 %. Четвертая экстракция обеспечивала лишь около 1,1 % дополнительного выхода за 120 мин и поэтому не была включена в рациональную схему процесса. На основании полученных результатов для дальнейшей разработки технологии выбран трехкратный способ экстракции с принудительной циркуляцией экстрагента: первая экстракция — не менее 5 ч, вторая и третья — по 3 ч.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансировании проекта AL-8724052925 Агентством инновационного развития при Министерстве высшего образования, науки и инноваций по теме: Исследование ключевых технологий для разработки высококачественного здорового питания на основе биоактивных веществ граната.

Список литературы

1. Анисимов П.Н. Об использовании методики планирования эксперимента в соответствие с трехуровневыми планами Бокса-Бенкена // Вестник магистратуры. – 2017. – № 2–2 (65). – С. 32–36.
2. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии. Москва. 1978. 319 с.
3. Бабин А.В., Ракипов Д.Ф. Организация и математическое планирование эксперимента. Екатеринбург. 2014. С. 85–94.
4. Кариева Ё.С., Садикова Р.К., Каримов О.У., Нуридуллаева К.Н. Изучение процесса экстракции изосалипурпозида из цветков бессмертника самаркандского // Химия растительного сырья. – 2024. – № 1. – С. 354–361.

5. Маматханов А.У., Хажибаев Т.А., Халилов Р.М. Технология получения суммы иридоидов из отходов переработки надземной части Ajuga turkestanica // Химия растительного сырья. – 2023. – № 3. – С. 293–302.
6. Cano-Lamadrid M., Martínez-Zamora L., Castillejo N., Artés-Hernández F. From Pomegranate Byproducts Waste to Worth: A Review of Extraction Techniques and Potential Applications for Their Revalorization // Foods. – 2022. – Т. 11, № 17. – Art. 2596. – DOI: 10.3390/foods11172596.
7. Hajibaev T.A., Khalilov R.M. The Process Optimization of Furostanol Saponins Extraction from the Aerial Part of Tribulus Terrestris // International Journal of Scientific Research in Chemical Sciences. – 2023. – Т. 10.
8. Huang Z., Foo S.C., Choo W.S. A review on the extraction of polyphenols from pomegranate peel for punicalagin purification: techniques, applications, and future prospects // Sustainable Food Technology. – 2025. – Т. 3. – P. 396–413. – DOI: 10.1039/D4FB00304G.
9. Saewan S.A. et al. Nutritional importance and industrial uses of pomegranate peel: A critical review // Food Science & Nutrition. – 2023. – Т. 11, № 6. – P. 2589–2598. – DOI: 10.1002/fsn3.3320.
10. Siddiqui S.A., Singh S., Nayik G.A. Bioactive compounds from pomegranate peels – Biological properties, structure–function relationships, health benefits and food applications – A comprehensive review // Journal of Functional Foods. – 2024. – Т. 116. – DOI: 10.1016/j.jff.2024.106132.

References

1. Anisimov P.N. [On the use of the experimental design methodology in accordance with three-level Box-Behnken designs] // Vestnik magistratury. – 2017. – No. 2–2 (65). (In Russ.).
2. Akhnazarova S.L., Kafarov V.V. [Optimization of Experiment in Chemistry and Chemical Technology. Moscow. 1978. 319 P.] (In Russ.).
3. Babin A.V., Rakipov D.F. [Organization and Mathematical Planning of Experiment. Yekaterinburg. 2014. Pp. 85–94] (In Russ.).
4. Karieva Yo.S., Sadikova R.K., Karimov O.U., Nuridullaeva K.N. [Study of the extraction process of isosalipurposide from flowers of Helichrysum samarkandicum] // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. – 2024. – No. 1. (In Russ.).
5. Mamatkhanov A.U., Khazhibaev T.A., Khalilov R.M. [Technology for obtaining the sum of iridoids from processing waste of the aerial part of Ajuga turkestanica] // Khimiya rastitel'nogo syr'ya. – 2023. – No. 3. (In Russ.).
6. Cano-Lamadrid M., Martínez-Zamora L., Castillejo N., Artés-Hernández F. From Pomegranate Byproducts Waste to Worth: A Review of Extraction Techniques and Potential Applications for Their Revalorization // Foods. – 2022. – Vol. 11, No. 17. – Art. 2596. – DOI: 10.3390/foods11172596.

7. Hajibaev T.A., Khalilov R.M. The Process Optimization of Furostanol Saponins Extraction from the Aerial Part of Tribulus Terrestris // International Journal of Scientific Research in Chemical Sciences. – 2023. – Vol. 10.
8. Huang Z., Foo S.C., Choo W.S. A review on the extraction of polyphenols from pomegranate peel for punicalagin purification: techniques, applications, and future prospects // Sustainable Food Technology. – 2025. – Vol. 3. – P. 396–413. – DOI: 10.1039/D4FB00304G.
9. Saewan S.A. et al. Nutritional importance and industrial uses of pomegranate peel: A critical review // Food Science & Nutrition. – 2023. – Vol. 11, No. 6. – P. 2589–2598. – DOI: 10.1002/fsn3.3320.
10. Siddiqui S.A., Singh S., Nayik G.A. Bioactive compounds from pomegranate peels – Biological properties, structure–function relationships, health benefits and food applications – A comprehensive review // Journal of Functional Foods. – 2024. – Vol. 116. – DOI: 10.1016/j.jff.2024.106132.