



Научная статья/Research article

УДК 664+663.814

DOI: 10.36718/1819-4036-2026-2-199-214

Игорь Юрьевич Алексанян<sup>1</sup>, Альберт-Хамед-Харисович Нугманов<sup>2</sup>,Ольга Ивановна Коннова<sup>3</sup>✉, Екатерина Владимировна Соколова<sup>4</sup><sup>1,2,3,4</sup>Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия<sup>1</sup>16081960igor@gmail.com<sup>2</sup>albert909@yandex.ru<sup>3</sup>okonnova88@gmail.com<sup>4</sup>k\_sokolova93@mail.ru

### ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТАТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССА ЖИДКОСТНО-ТВЕРДОФАЗНОЙ ЭКСТРАКЦИИ ТЕРМОЛАБИЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

*Цель исследования – проведение термодинамического анализа статических закономерностей процесса жидкостно-твердофазной экстракции термолабильных компонентов на примере получения экстрактов из топинамбура и солодкового корня. Задачи: экспериментально выявить статические закономерности процесса жидкостно-твердофазной экстракции объектов исследования; провести термодинамический анализ статических закономерностей процесса жидкостно-твердофазной экстракции; определить параметры статики экстракции, такие как энергетические составляющие свободной энергии Гиббса; оценить тепловой эффект процесса жидкостно-твердофазной экстракции объектов исследования. Объекты исследования – топинамбур, корень солодки голой, водные экстракты инулина и глицирризиновой кислоты. В данном исследовании данный анализ проведен, опираясь на уравнения термодинамики. Приведены результаты расчета констант распределения целевых компонентов между экстрагентом и твердой фазой и определены параметры статики экстракции, такие как энергетические составляющие свободной энергии Гиббса. Учитывая общую теплоту, затрачиваемую при переносе компонента из фазы в фазу, в уравнении теплового баланса, как пример, определено изменение температуры при экстракции с учетом теплоемкости экстракта. Следует отметить, что при изменении гидромодуля и концентрации экстракта, а также вида экстрагента, природы сырья и переносимого компонента тепловой эффект может усиливаться. Полученные результаты позволяют учесть экзотермический эффект или эндотермический для каждого вида сырья и переносимого компонента при проведении процесса экстракции в аспекте соблюдения температурных ограничений, а также могут использоваться для определения энергоемкости процесса экстрагирования и моделировании обозначенной операции. Энергия при экстракции расходуется не только на сам процесс растворения извлекаемого компонента, но и на преодоление его структурной (энтропийной) или адсорбционной связи с сырьем или рафинатом, что можно обеспечить посредством физических эффектов, в частности дополнительной энергией при нагреве гидромодуля или экстрагента или при ультразвуковой кавитации.*

**Ключевые слова:** растительное сырье, экстракция, ультразвук, энергоемкость процесса, термодинамический анализ, свободная энергия, энтальпия, энтропия

**Для цитирования:** Алексанян И.Ю., Нугманов А.-Х.-Х., Коннова О.И., и др. Термодинамический анализ статических закономерностей процесса жидкостно-твердофазной экстракции термолабильных компонентов из растительного сырья // Вестник КрасГАУ. 2026. № 2. С. 199–214. DOI: 10.36718/1819-4036-2026-2-199-214.

Igor Yuryevich Aleksanyan<sup>1</sup>, Albert-Khamed-Kharisovich Nugmanov<sup>2</sup>, Olga Ivanovna Konnova<sup>3</sup>, Ekaterina Vladimirovna Sokolova<sup>4</sup>

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

<sup>1</sup>16081960igor@gmail.com

<sup>2</sup>albert909@yandex.ru

<sup>3</sup>okonnova88@gmail.com

<sup>4</sup>k\_sokolova93@mail.ru

## THERMODYNAMIC ANALYSIS OF STATIC REGULARITIES OF LIQUID-SOLID-PHASE EXTRACTION OF THERMOLABILE COMPONENTS FROM PLANT RAW MATERIALS

*The aim of the study is to conduct a thermodynamic analysis of the static patterns of the liquid-solid-phase extraction of heat-labile components using the example of obtaining extracts from Jerusalem artichoke and licorice root. Objectives: to experimentally identify the static patterns of the liquid-solid-phase extraction process of the study objects; to conduct a thermodynamic analysis of the static patterns of the liquid-solid-phase extraction process; to determine the extraction static parameters, such as the energy components of the Gibbs free energy; to evaluate the thermal effect of the liquid-solid-phase extraction process of the study objects. The objects of the study are Jerusalem artichoke, licorice root, and aqueous extracts of inulin and glycyrrhizic acid. In this study, this analysis is carried out based on the equations of thermodynamics. The results of calculating the distribution constants of the target components between the extractant and the solid phase are presented, and the extraction static parameters, such as the energy components of the Gibbs free energy, are determined. Taking into account the total heat expended during component transfer from phase to phase, the heat balance equation, for example, determines the temperature change during extraction, taking into account the heat capacity of the extract. It should be noted that the thermal effect can increase with changes in the extract's hydromodulus and concentration, as well as the type of extractant, the nature of the raw material, and the component being transferred. The obtained results allow us to take into account the exothermic or endothermic effect for each type of raw material and transferred component during the extraction process, while maintaining temperature constraints. They can also be used to determine the energy intensity of the extraction process and model the operation. Energy during extraction is spent not only on the dissolution of the extracted component itself but also on overcoming its structural (entropic) or adsorption bond with the raw material or raffinate. This can be achieved through physical effects, in particular, additional energy from heating the hydromodule or extractant or through ultrasonic cavitation.*

**Keywords:** plant material, extraction, ultrasound, process energy intensity, thermodynamic analysis, free energy, enthalpy, entropy

**For citation:** Aleksanyan IYu, Nugmanov A-H-Kh, Konnova OI, et al. Thermodynamic analysis of static regularities of liquid-solid-phase extraction of thermolabile components from plant raw materials. *Bulletin of KSAU*. 2026;(2):199-214. (In Russ.). DOI: 10.36718/1819-4036-2026-2-199-214.

**Введение.** Общеизвестно, что перспективы выработки пищевых материалов, особенно функциональной ориентации, обусловлены стремлением к уменьшению их себестоимости и операций при их получении. На настоящий момент производство пребиотиков особенно популярно

в аспекте функциональных пищевых премиксов, таких как инулин, который в композициях на водной основе имеет способность имитационно заменять липидную фракцию и глюкозу, обеспечивать энергетическую потребность клеток и, кроме того, стабилизировать

эмульсии при росте вязкости жидкой фазы. Одним из источников инулина служат клубни топинамбура, при этом для более полного использования предварительно измельченного растительного сырья селективное извлечение инулина из клубней топинамбура проводят методом жидкостно-твердофазной экстракции (ЖТФЭ) полярными растворителями, в частности водным экстрагентом [1–4].

Для селективного извлечения основных классов компонентов, в т. ч. и биологически активных веществ, экстрагентами варьируемой полярности из диспергированного корня солодки также используют те или иные методы ЖТФЭ. При этом можно извлекать группы соединений с учетом происхождения экстрагента, в частности петролейный эфир и гексан применяют для экстракции жиров, этилацетат – для флавоноидов, полифенолов и агликонов, этанол – для сахаров, гликозидов и флавоноидов [5, 6]. Целевым извлекаемым компонентом из корня солодки является глицирризиновая кислота (ГК), извлечение которой проводят водными растворами оснований, в частности ацетатом или карбонатом натрия, но чаще всего просто водной средой. Общеизвестно, что ГК применяется как пищевой подсластитель и в составе препаратов солодки как лекарственное средство [7, 8].

Разработка оригинальных и совершенствование известных аппаратов для экстракции и, как следствие, методов проведения данной операции актуальны и невозможны без информации о параметрах и свойствах объектов производства и, кроме того, характере протекания массо- и теплопереноса [9–11]. Как известно, ЖТФЭ – это основная операция в технологии избирательного извлечения глицирризиновой кислоты и инулина, к тому же ультразвуковое воздействие при ее проведении способствует повышению эффективности массопереноса. Применение ультразвукового воздействия интенсифицирует ЖТФЭ, обуславливая увеличение удельного выхода извлекаемых компонентов, который обусловлен скоростью и временем акустического влияния, температурой растворителя и величиной гидромодуля как соотношения масс экстрагента и сырьевого материала [12–14]. В современных условиях ультразвуковое воздействие ЖТФЭ широко применяется для избирательного извлечения биоло-

гически активных веществ из растительных или животных сырьевых материалов.

Отметим специфические особенности ультразвукового воздействия при использовании ЖТФЭ.

В общем случае на эффективность и продолжительность ЖТФЭ влияет дисперсный состав исходного материала, и по этой причине предварительно его подвергают диспергированию, кроме того, особое значение имеет полное и равномерное контактирование между экстрагентом и поверхностью каждой частицы, чего добиваются, к примеру, перемешиванием. Также следует отметить, что при ЖТФЭ целесообразно снижать величину гидромодуля [7, 9, 11, 12, 14]. Повышение температуры экстрагента при использовании ультразвука также способствует ускорению ЖТФЭ, однако необходимо строго соблюдать температурные ограничения, поскольку при превышении определенного порога высока вероятность деструкции целевых термолабильных компонентов в экстрагируемом сырье, а в экстракте активизируется формирование газовых агломераций, что, как следствие, обуславливает нивелирование подводимой дополнительной акустической энергии [12, 13, 15]. Завершение проводимой ЖТФЭ производится, как известно, при достижении равновесного состояния между взаимодействующими фазами, при этом устойчивое равновесие достигается при условии минимальных значений внутренней энергии ( $U$ ), энтальпии ( $H$ ) и свободной энергии Гиббса ( $G$ ) в рассматриваемой двухфазной системе [16–18].

Обычно термодинамический анализ проводят для тепловых или тепло-массообменных процессов, в частности сушки, что широко освещено в различных научных публикациях [19–21], а процесс экстракции относят, как правило, к чисто массообменным и публикации по этой теме практически отсутствуют, кроме отдельных [16, 17], но при применении повышенных температур или физических воздействий, к примеру ультразвуковой кавитации, которая сама по себе способствует тепловому эффекту. Такой анализ становится целесообразным для определения изменения температуры при соблюдении температурных ограничений и выявления общей энергии, расходуемой не только на сам процесс растворения извлекаемого компонента, но и на преодоление его структурной (энтропийной) или адсорбционной связи с сырьем

или рафинатом, что и послужило целью данного исследования. В данной работе термодинамический анализ экстракции в системе «твердое тело – экстрагент» проведен на примере получения востребованных на мировом рынке экстрактов из растительного сырья (топинамбур и солодковый корень), опираясь на классические понятия и уравнения термодинамики [2, 5, 8].

Отметим, что в отличие от сушки, где между фазами распределяется влага и показателем этой процедуры служит зависимость активности воды или относительной влажности внешней паровоздушной среды от равновесной влажности твердой фазы, при экстракции между фазами распределяется определенный компонент, показателем чего является коэффициент его распределения между фазами как аналог активности воды, или его зависимость от равновесной концентрации переносимого компонента в твердой фазе по физической аналогии с сушкой [11, 13, 17, 22]. Кроме того, результаты данного анализа позволят корректно составить уравнения теплового баланса и осуществить моделирование данной операции, к тому же приведенный подход дает возможность комплексно исследовать другие процессы, причисляемые к чисто массообменным.

**Цель исследования** – проведение термодинамического анализа статических закономерностей процесса жидкостно-твердофазной экстракции термолабильных компонентов на примере получения экстрактов из топинамбура и солодкового корня.

**Задачи:** экспериментально выявить статические закономерности процесса жидкостно-твердофазной экстракции объектов исследования; провести термодинамический анализ статических закономерностей процесса жидкостно-твердофазной экстракции; определить параметры статики экстракции, такие как энергетические составляющие свободной энергии Гиббса; оценить тепловой эффект процесса жидкостно-твердофазной экстракции объектов исследования.

**Объекты и методы.** Объектами исследования послужили топинамбур, корень солодки голой, водные экстракты инулина и глицирризиновой кислоты.

Для проведения исследований использовались клубни топинамбура сорта Интерес, выращенные в Камызякском районе Астраханской области. При выборе обращалось внимание на

внешний вид клубней, которые должны быть твердыми, без признаков гнили, плесени или механических повреждений, и размер, выбирались клубни среднего размера, примерно одинаковые по весу, для обеспечения однородности выборки. Для хранения топинамбура клубни помещали в полиэтиленовые пакеты с отверстиями для вентиляции и размещали в овощном отсеке холодильника при температуре 175–177 К. Для исследований использовался корень солодки голой, выращенной в Красноярском районе Астраханской области. При выборе обращалось внимание на целостность корней, отсутствие плесени и посторонних запахов. Сушеный корень был помещен в герметичные стеклянные банки и хранился в сухом, темном и прохладном месте при комнатной температуре (не выше 198 К).

С целью осуществления термодинамического анализа ЖТФЭ инулина и глицирризиновой кислоты определены коэффициенты их распределения  $\varphi$  между экстрагентом и твердой средой. Коэффициент распределения  $\varphi$ , обуславливающий экстракционную способность экстрагента по отношению к распределяемому компоненту  $A$ , определен равновесным условием

$$A_{\text{ТВ}} \rightleftharpoons A_{\text{Ж}}. \quad (1)$$

Коэффициент распределения  $\varphi$  находим как

$$\varphi = \frac{C_{\text{Ж}}}{C_{\text{ТВ}}}, \quad (2)$$

где  $C_{\text{Ж}}$  и  $C_{\text{ТВ}}$  – равновесная доля компонента  $A$  в твердой и жидкой фазах.

При описании и обработке полученных данных использованы следующие обозначения параметров:

- $M_{\text{см}}$ , кг – масса экстракционной смеси (сырье и экстрагент), подвергаемая обработке с использованием ультразвукового воздействия частотой 22 кГц и интенсивностью 50 Вт/см<sup>2</sup>;
- $M_{\text{экс}}$ , кг – масса экстракта (после фильтрации);
- $M_{\text{А в сырье}}$ , кг – масса инулина или глицирризиновой кислоты (ГК) в сырье в составе экстракционной смеси;
- $M_{\text{А в экс}}$ , кг – масса инулина или ГК в составе экстракта;
- $M_{\text{раф}}$ , кг – масса рафината;
- $M_{\text{А в раф}}$ , кг – масса инулина или ГК в составе рафината;

- $y$ , кг/кг – содержание инулина или ГК в рафинате;
- $x$ , кг/кг – содержание инулина или ГК в экстракте (опытные данные);
- $y_c$ , кг/кг – содержание инулина или ГК в исходном сырье.

При описании и обработке полученных данных использованы следующие соотношения:

$$M_{\text{раф}} = M_{\text{см}} - M_{\text{экс}}; \quad (3)$$

$$M_{\text{А в раф}} = M_{\text{А в сырье}} - M_{\text{А в экс}}; \quad (4)$$

$$y = \frac{M_{\text{А в раф}}}{M_{\text{раф}}} = \frac{M_{\text{А в сырье}} - M_{\text{А в экс}}}{M_{\text{см}} - M_{\text{экс}}}; \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{x}{y}; \quad \varphi_c = \frac{x}{y_c}. \quad (6)$$

При описании и обработке полученных данных использован следующий алгоритм.

Извлечение инулина способом ЖТФЭ из диспергированных клубней топинамбура с гидромодулем «сырье : вода», равным 1 : 4, 1 : 6 и 1 : 8, осуществляется в течении 20–60 мин с применением ультразвука частотой 22 кГц и интенсивностью его воздействия 50 Вт/см<sup>2</sup> с перемешиванием суспензии при 15–30 об/мин мешалки и ее циркуляции с кратностью 20–30 объемов/ч при температурах 313–353 К. Термодинамический анализ осуществлялся при рациональном гидромодуле 1 : 4 [3, 4].

Извлечение ГК способом ЖТФЭ и перколяцией из диспергированного корня солодки, высушенного до влажности 8–12 %, осуществляется следующим образом. Водную среду пропускают сквозь слой сырья при отношении его массы к массе водной среды в диапазоне от 1 : 8 до 1 : 12 при температурах 323–333 К в течение 4–6 ч и микроволновом воздействии частотой 2450 МГц, а также мощностью в интервале 600–1000 Вт. Фильтрование экстракта проводят механически через фильтрующую перегородку, далее осуществляют концентрирование путем вакуум-выпаривания экстракта при температуре 328–333 К и остаточном давлении ≤ 4 кПа до содержания сухих веществ в экстракте 62–68 %. Термодинамический анализ осуществлялся при рациональном гидромодуле 1 : 8 [7].

Опираясь на полученные опытные данные, проводят термодинамический анализ изучаемых систем.

Изменение свободной энергии Гиббса  $\Delta F$  находим в бесконечно малой области варьиро-

вания равновесных концентраций контактирующих фаз в процессе экстракции при определенной температуре по соотношению

$$\Delta F = -RT \ln \varphi = -19,15T \lg \varphi, \quad (7)$$

где 19,15 – переводной коэффициент, равный произведению универсальной газовой постоянной  $R = 8,314$  (Дж/(моль К)) и коэффициента перевода 2,3 между  $\ln \varphi$  и  $\lg \varphi$ .

Путем математической обработки изотерм экстракции определяем изменение термодинамических показателей, составляющих соотношение Гиббса-Гельмгольца для варьирования свободной энергии Гиббса  $\Delta F$  (Дж/моль) при  $P, T = const$ :

$$\Delta F = \Delta E - T\Delta S, \quad (8)$$

где  $\Delta E, \Delta S$  – варьирование внутренней энергии (энтальпии) и энтропии.

Взяв производную (8) по  $y$  при  $P, T = const$  имеем

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial y}\right)_{T,P} - T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial y}\right)_{T,P}, \quad (9)$$

где энтропийное слагаемое  $T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial y}\right)_{T,P}$  для носителя целевого компонента с существенной долей структурной (или энтропийно связанной) влаги и других компонентов имеет заметную величину.

В результате можно выявить закономерность варьирования  $\Delta F$  и ее составляющих от температуры системы и  $y$ . Взяв производную по  $T$ , получаем

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right)_{T,P} = - \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial y}\right)_{T,P}, \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial y}\right)_{T,P} = \frac{-\partial(RT \lg \varphi)}{\partial T} - R \frac{\partial(T \lg \varphi)}{\partial T}. \quad (11)$$

Как известно, в дифференциальное уравнение переноса тепла входит общая тепловая энергия на перенос компонента из фазы в фазу ( $r$ ), равная сумме теплот  $r_{\text{см}}$  и  $r_{\text{энт}}$ , участвующих в процессе теплопереноса, которые можно выразить через соотношение (9):

$$r_{\text{см}} = - \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right)_{T,P} = -RT \ln \varphi; \quad (12)$$

$$r_{\text{энт}} = T \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial y}\right)_{T,P}. \quad (13)$$

Учитывая все то же соотношение (9), а также (12) и (13), общая тепловая энергия  $r$  определяется дифференциальным изменением свободной энергии изотермического переноса, численно равной работе переноса одного моля компонента из сырья и далее из рафината при постоянной температуре и энтропийной составляющей ( $r_{энт}$ )

$$r = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial y}\right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right)_{T,P} + T \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial y}\right)_{T,P}. \quad (14)$$

В итоге можно принять, что величина  $r$  равна дифференциальному изменению внутренней энергии, обуславливающей изменение  $T$  при экстракции. Причем  $r$  – это удельная энергия или ее дифференциальное изменение, а энергия, затрачиваемая на проведение экстракции, равна определенному интегралу от  $r$  в пределах от  $y_c$  (начало экстракции) до  $y$  (экстракция

завершена), т. е. общая энергия на проведение экстракции

$$r_{общ} = \int_{y_c}^y r(y) dy. \quad (15)$$

Учитывая общую теплоту  $r_{общ}$ , затрачиваемую при переносе компонента из фазы в фазу, в уравнении теплового баланса можно определить не только изменение тепловой энергии на растворение экстрактивных веществ в экстрагенте, зная теплоемкость экстракта, но и энергию, идущую на нарушение связи извлекаемого компонента с сырьем и далее с рафинатом.

**Результаты и их обсуждение.** Результаты экспериментального исследования процесса экстрагирования из объектов исследования при вышеуказанных условиях, представлены в таблицах 1–4.

Таблица 1

**Параметры процесса экстракции инулина**  
**Parameters of the inulin extraction process**

Номер эксп.	$T$ , К	$M_{см}$ , кг	$M_{экс}$ , кг	$M_{А в сырье}$ , кг	$M_{раф}$ , кг	
1	313	2,5	1,82	0,077	0,68	
2	333		1,74		0,76	
3	353		1,62		0,88	
Номер эксп.	$y_c$ , кг/кг	$M_{А в раф}$ , кг	$x$ , кг/кг	$y$ , кг/кг	$\varphi$	$\varphi_c$
1	0,154	0,0073	0,0383	0,0108	3,557	0,248
2		0,0055	0,0411	0,0072	5,669	0,266
3		0,0044	0,0448	0,0050	8,990	0,323

Таблица 2

**Параметры процесса экстракции ГК**  
**Parameters of the GA extraction process**

Номер эксп.	$T$ , К	$M_{см}$ , кг	$M_{экс}$ , кг	$M_{А в сырье}$ , кг	$M_{раф}$ , кг	
1	323	45	35,0	0,72	9,80	
2	328		33,8		11,2	
3	333		32,9		12,1	
Номер эксп.	$y_c$ , кг/кг	$M_{А в раф}$ , кг	$x$ , кг/кг	$y$ , кг/кг	$\varphi$	$\varphi_c$
1	0,144	0,14	0,011	0,01428	0,77	0,076
2		0,16	0,012	0,01426	0,84	0,083
3		0,17	0,013	0,01405	0,93	0,090

Таблица 3

**Параметры статики процесса экстракции инулина**  
**Static parameters of the inulin extraction process**

Номер эксп.	$10^3/T$ , 1/К	$\varphi$	$\lg \varphi$	$\varphi_c$	$\lg \varphi_c$
1	3,19	3,56	0,55	0,25	-0,60
2	3,00	5,67	0,75	0,27	-0,57
3	2,83	8,99	0,95	0,32	-0,50

Параметры статистики процесса экстракции ГК  
Parameters of the statics of the GA extraction process

Номер эксп.	$10^3/T, 1/K$	$\varphi$	$\lg \varphi$	$\varphi_c$	$\lg \varphi_c$
1	3,096	0,77	-0,114	0,076	-1,119
2	3,049	0,84	-0,076	0,083	-1,081
3	3,003	0,93	-0,032	0,090	-1,000

В среде Graph построены равновесные изотермы экстракции, представленные на рисунках 1 и 2, т. е. графики зависимости

$$\lg \varphi = f(y_m), \quad (16)$$

где  $y_m$  – текущая концентрация рафината при варьировании  $x$  в исходном экстрагенте и в насыщенном экстракте при равновесии от 0 до  $x$  в диапазоне от  $y$  до  $y_c$  при различных фиксированных  $T$  или  $10^3/T$ .

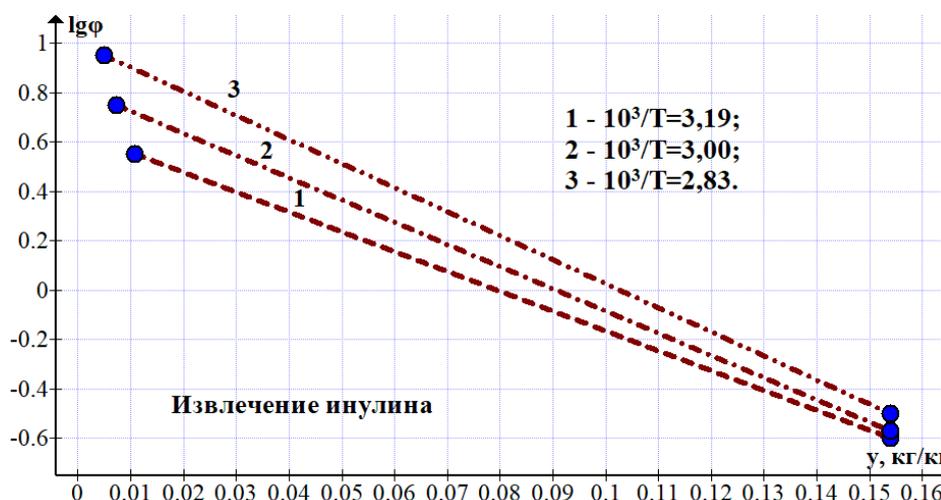


Рис. 1. Изотермы экстракции инулина в выбранных диапазонах исследования температуры и равновесных концентраций целевого компонента в рафинате  
Isotherms of inulin extraction in the selected ranges of temperature and equilibrium concentrations of the target component in the raffinate

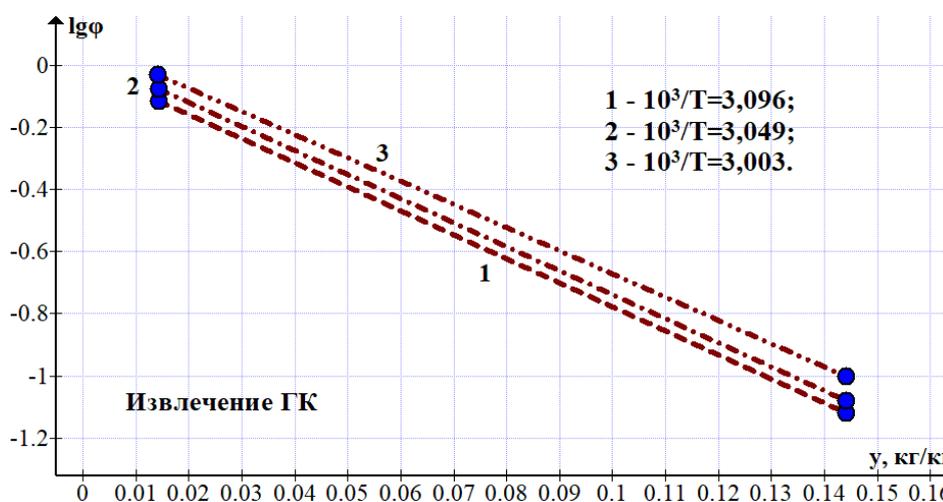


Рис. 2. Изотермы экстракции ГК в выбранных диапазонах исследования температуры и равновесных концентраций целевого компонента в рафинате  
Extraction isotherms of GA in the selected temperature ranges and equilibrium concentrations of the target component in the raffinate

Вследствие того, что  $y_m$  определяется из уравнения материального баланса, уравнение (16) является линейной функцией и представляется как

$$\lg \varphi = a_i y_m + b_i.$$

Для экстракции инулина:

$$10^3/T = 3,19: \lg \varphi = -8,028y_m + 0,636; \quad (17)$$

$$10^3/T = 3,00: \lg \varphi = -8,994y_m + 0,815; \quad (18)$$

$$10^3/T = 2,83: \lg \varphi = -9,730y_m + 0,998. \quad (19)$$

Для экстракции ГК:

$$10^3/T = 3,096: \lg \varphi = -7,747y_m - 0,0034; \quad (20)$$

$$10^3/T = 3,049: \lg \varphi = -7,746y_m + 0,0345; \quad (21)$$

$$10^3/T = 3,003: \lg \varphi = -7,449y_m + 0,0727. \quad (22)$$

Отметим, что изотерма экстракции может быть и нелинейной, если переносимый компонент частично адсорбционно или структурно связан с сухим скелетом рафината, как, например, при сушке влага (свободная и связанная), тогда 2 крайних точек для построения изотермы недостаточно и надо проводить ЖТФЭ, используя не только чистый экстрагент, но еще и экстракт с разной концентрацией переносимого компонента.

Если описать зависимость коэффициентов  $a_i$  и  $b_i$  от  $10^3/T$ , то получим следующее обобщенное уравнение функции:

$$\lg \varphi = f(y_m, 10^3/T). \quad (23)$$

Линейные зависимости  $a_i$  и  $b_i$  от  $10^3/T$  для экстракции инулина и ГК показаны соответственно на рисунках 3 и 4.

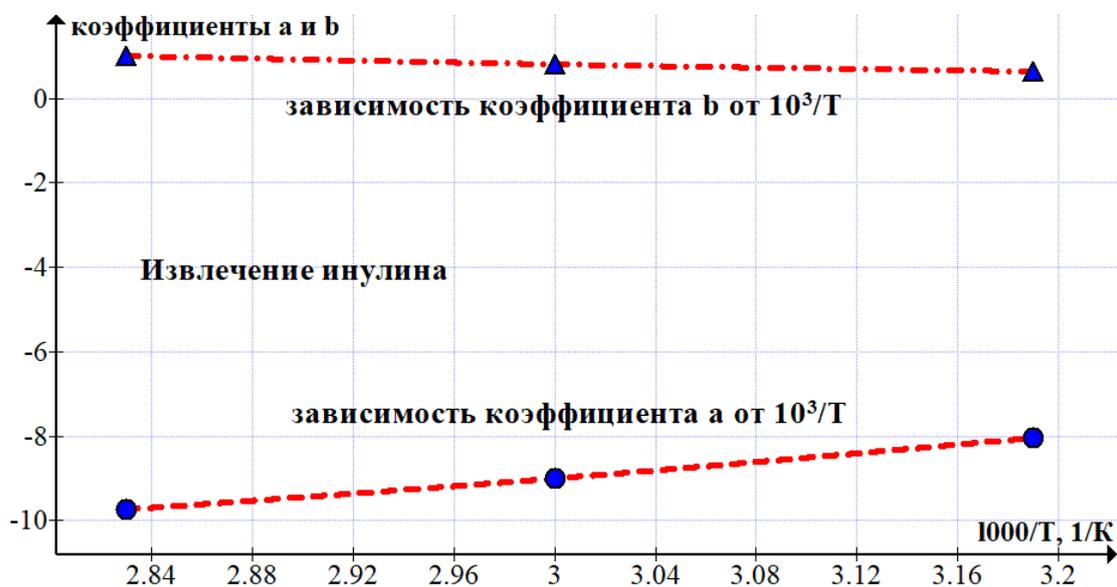


Рис. 3. Графическая зависимость коэффициентов  $a_i$  и  $b_i$  от  $10^3/T$  при экстракции инулина  
Graphical dependence of the coefficients  $a_i$  and  $b_i$  on  $10^3/T$  during inulin extraction

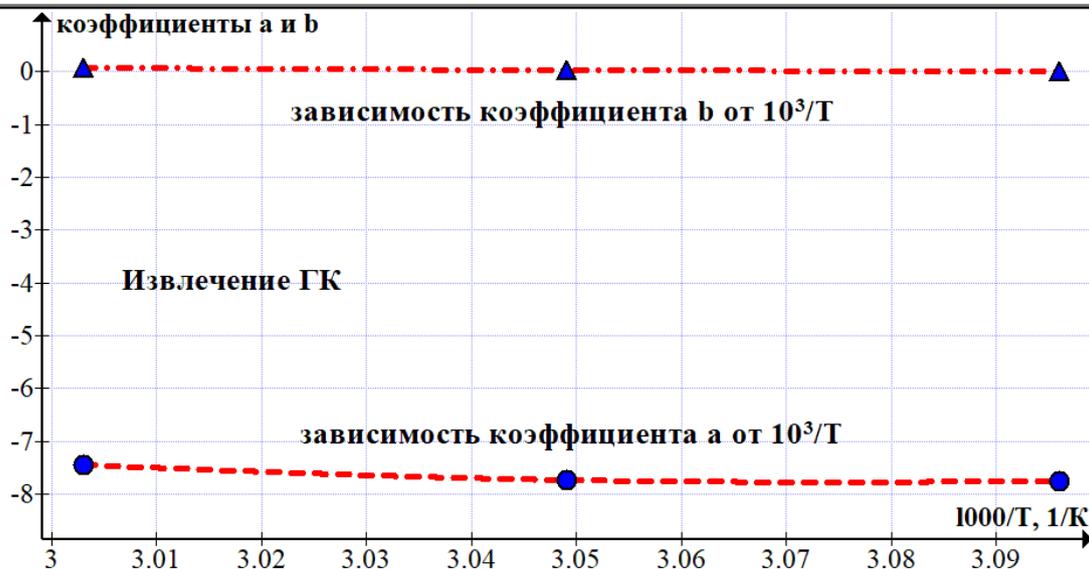


Рис. 4. Графическая зависимость коэффициентов  $a_i$  и  $b_i$  от  $10^3/T$  при экстракции ГК  
 Graphical dependence of the coefficients  $a_i$  and  $b_i$  on  $10^3/T$  during GA extraction

Из графиков, представленных на рисунках 3 и 4, следует, что полученные зависимости можно описать как линейные.

Тогда для инулина:

$$a = 4,728 \cdot 10^3/T - 23,11; \quad (24)$$

$$b = -1,006 \cdot 10^3/T + 3,844. \quad (25)$$

И для ГК:

$$a = -3,204 \cdot 10^3/T + 2,174; \quad (26)$$

$$b = -0,821 \cdot 10^3/T + 2,539. \quad (27)$$

При этом уравнение функции (23) представим для инулина и ГК соответственно как

$$\lg \varphi = (4,728 \cdot 10^3/T - 23,11)y_m - 1,006 \cdot 10^3/T + 3,844 \quad (28)$$

и

$$\lg \varphi = (-3,204 \cdot 10^3/T + 2,174)y_m - 0,821 \cdot 10^3/T + 2,539. \quad (29)$$

Трехмерные графики полученных функций (28) и (29) для инулина и ГК соответственно показаны на рисунках 5 и 6.

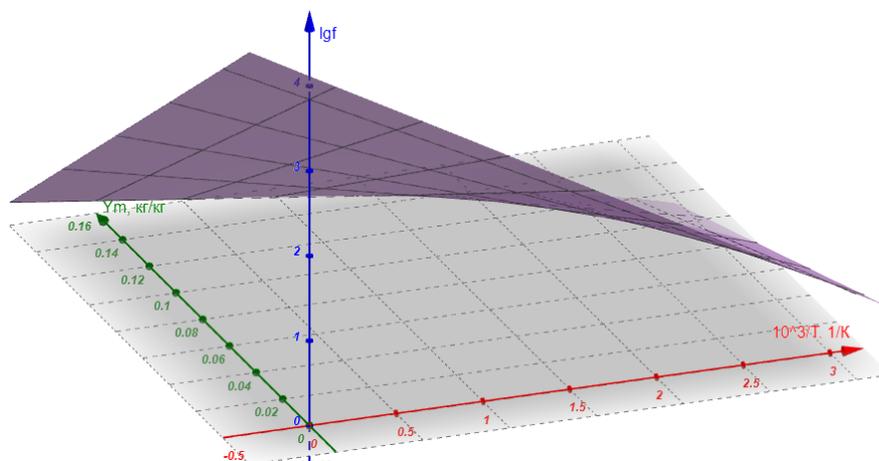


Рис. 5. Графическая зависимость  $\lg \varphi = f(y_m, 10^3/T)$  при  $y_m$  от 0 до 0,154 кг/кг и  $10^3/T$  от 0 до 3,0 1/K для экстракции инулина  
 Graphic dependence  $\lg \varphi = f(y_m, 10^3/T)$  for  $y_m$  from 0 to 0.154 kg/kg and  $10^3/T$  from 0 to 3.0 1/K for inulin extraction

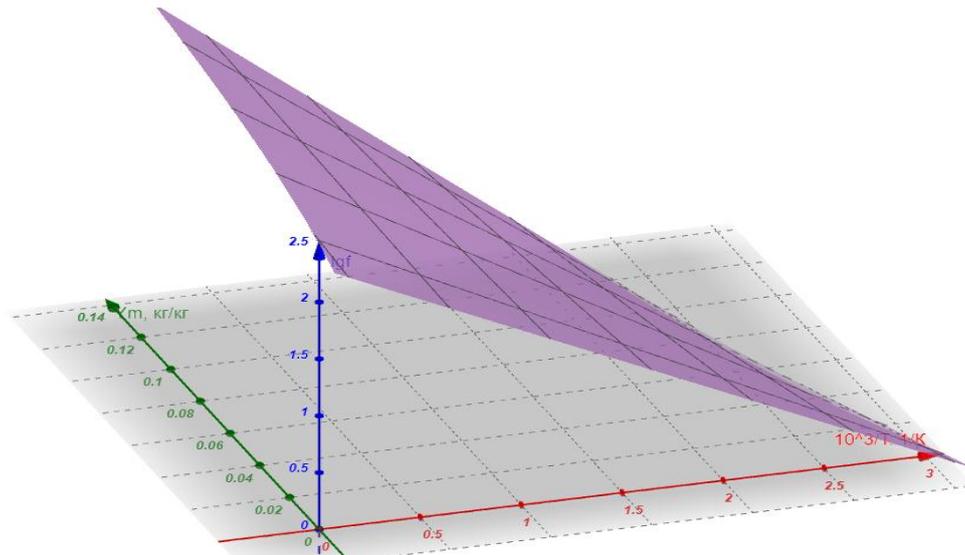


Рис. 6. Графическая зависимость  $\lg \varphi = f(y_m, 10^3/T)$  при  $y_m$  от 0 до 0,144 кг/кг и  $10^3/T$  от 0 до 3,0 1/К для экстракции ГК  
 Graphic dependence  $\lg \varphi = f(y_m, 10^3/T)$  for  $y_m$  from 0 to 0.144 kg/kg and  $10^3/T$  from 0 to 3.0 1/K for the extraction of GA

Тогда, согласно соотношениям (7)–(14), для экстракции инулина и ГК соответственно имеем:

$$\Delta F = -19,15T((4,728 \cdot 10^3/T - 23,11)y_m - 1,006 \cdot 10^3/T + 3,844);$$

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right) = -19,15T(4,728 \cdot 10^3/T - 23,11) = 442,56T - 90,54 \cdot 10^3;$$

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right)_{T,P} = -\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial y}\right)_{T,P} = 442,56;$$

$$\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial y}\right)_{T,P} = -442,56;$$

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right)_{T,P} + T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial y}\right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial y}\right)_{T,P} = -90,54 \cdot 10^3.$$

$$\Delta F = -19,15T((-3,204 \cdot 10^3/T + 2,174)y_m - 0,821 \cdot 10^3/T + 2,539);$$

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right) = -19,15T\left(-3,204 \cdot \frac{10^3}{T} + 2,174\right) = -41,632T + 61,357 \cdot 10^3;$$

$$\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right)_{T,P} = -\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial y}\right)_{T,P} = -41,632;$$

$$\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial y}\right)_{T,P} = 41,632;$$

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right)_{T,P} + T \cdot \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial y}\right)_{T,P} = \left(\frac{\partial \Delta E}{\partial y}\right)_{T,P} = 61,357 \cdot 10^3.$$

Учитывая, что молярная масса инулина равна 6000 г/моль, или 6 кг/моль, а для ГК – 822,9 г/моль, или 0,8229 кг/моль, соответственно имеем:

$$- \text{Дж/кг} = (\text{Дж/моль})/(\text{кг/моль}) = (\text{Дж/моль})/6 = 0,167(\text{Дж/моль});$$

$$- \text{Дж/кг} = (\text{Дж/моль})/0,8229 = 1,215 (\text{Дж/моль}).$$

Тогда для экстракции инулина:

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right)_{T,P} = 73,91T - 1,512 \cdot 10^4 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right);$$

$$\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial y}\right)_{T,P} = -73,91 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right);$$

$$\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial y}\right)_{T,P} = -1,512 \cdot 10^4 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right).$$

И для экстракции ГК:

$$\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right)_{T,P} = -50,583T + 74,549 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right);$$

$$\left(\frac{\partial \Delta S}{\partial y}\right)_{T,P} = 50,583 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}\right);$$

$$\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial y}\right)_{T,P} = 74,549 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}\right).$$

На рисунках 7 и 8 показана функция  $\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right)_{T,P} = f(T)$  в Дж/кг в интервале температур от 313 до 353 К для экстракции инулина и ГК соответственно.

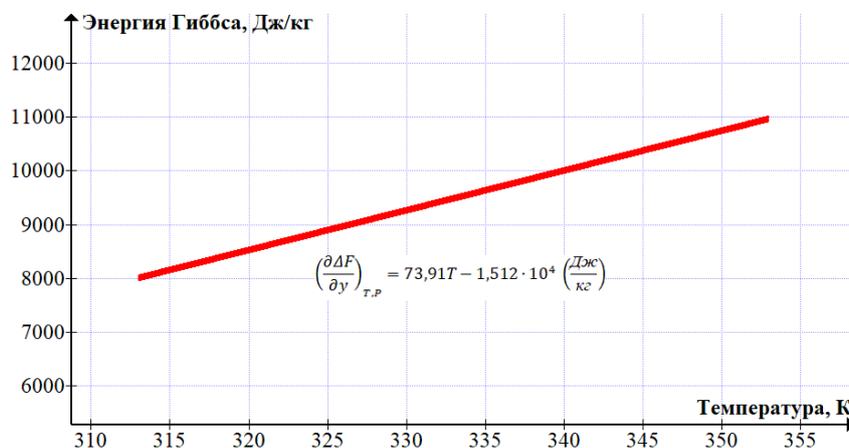


Рис. 7. Графическая зависимость  $\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right)_{T,P} = f(T)$  при экстракции инулина  
Graphic dependence  $\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right)_{T,P} = f(T)$  during inulin extraction

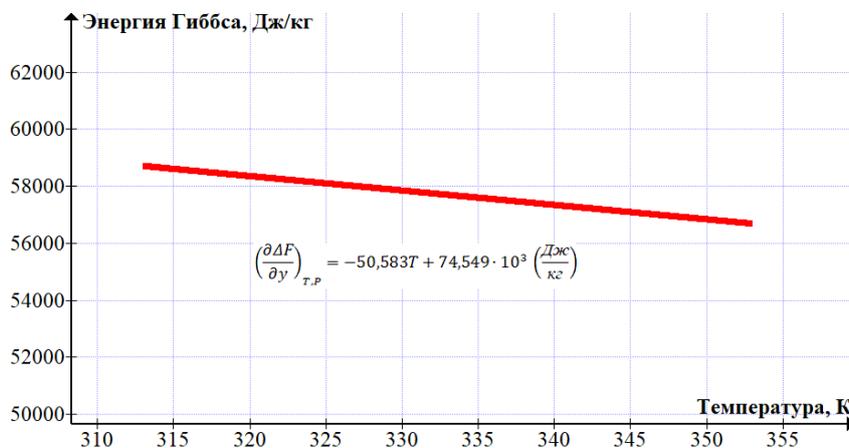


Рис. 8. Графическая зависимость  $\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right)_{T,P} = f(T)$  при экстракции ГК  
Graphic dependence  $\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}\right)_{T,P} = f(T)$  during GA extraction

Согласно соотношениям (12)–(15), запишем для экстракции инулина и ГК соответственно:

$$r_{\text{ин}} = -1,512 \cdot 10^4 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right);$$

$$r_{\text{общ}} = \int_{y_c}^y -15120 \partial y = -15120(y - y_c);$$

$$r_{\text{ГК}} = 74549 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right);$$

$$r_{\text{общ}} = \int_{y_c}^y 74549 \partial y = 74549(y - y_c).$$

В работе [23] приведены опытные данные по удельной массовой теплоемкости инулина и его экстракта  $c_{\text{ин}}^m$  (Дж/(кг К)) при разных концентрациях  $x$  (кг/кг), причем соотношение  $c_{\text{ин}}^m = f(x)$  для экстракта инулина выглядит как

$$c_{\text{ин}}^m = 1176x + 4190(1 - x). \quad (30)$$

При реальной  $x = 0,045$  кг/кг для экстракта  $c_{\text{ин}}^m = 4054$  Дж/(кг К).

$$c_{\text{ГК}}^m = [0,1021(T - 273)^3 - 13,433(T - 273)^2 + 605,431(T - 273) - 174689,570]x + 4186(1 - x). \quad (33)$$

При реальной концентрации  $x = 0,013$  кг/кг и  $T = 333$  К для ГК экстракта, согласно (33), ее теплоемкость будет равна:  $c_{\text{ГК}}^m = 4139$  Дж/(кг К).

К примеру, для ГК при температуре, равной 313 К:

$$r_{\text{общ}} = 74549(0,01405 - 0,144) = -9688.$$

То есть

$$\Delta T = -\frac{9688}{4139} = -2,34 \approx -2,5\text{К}.$$

Следует отметить, что даже небольшое превышение пороговой температуры для термобластных компонентов может привести к их деградации и, как следствие, снижению качества и биологической активности экстрактов. Кроме того, следует отметить, что при изменении гидромодуля и концентрации экстракта, а также вида экстрагента, природы сырья и переносимого компонента, тепловой эффект может

Тогда из соотношения

$$r_{\text{общ}} = c_{\text{ин}}^m \cdot \Delta T \quad (31)$$

определим  $\Delta T$  как изменение температуры при экстракции, которое следует учесть для соблюдения температурных ограничений, в частности при выборе и ограничении температуры экстрагента, при повышении которой, в свою очередь, существенно растет и  $\varphi$ , соответственно удельный выход экстрактивных веществ

$$\Delta T = \frac{r_{\text{общ}}}{c_{\text{ин}}^m}. \quad (32)$$

К примеру, для инулина при температуре, равной 313 К

$$r_{\text{общ}} = -15120(0,01076 - 0,154) = 2166,$$

То есть

$$\Delta T = \frac{2166}{4054} = 0,6 \approx 1\text{К}.$$

В работе [24] приведены опытные данные по удельной массовой теплоемкости ГК и ее экстракта  $c_{\text{ГК}}^m$  (Дж/(кг К)) при разных концентрациях  $x$  (кг/кг), причем соотношение  $c_{\text{ГК}}^m = f(x)$  для экстракта ГК выглядит как

варьироваться, в частности усиливаться. Как следует из полученных данных, процессы водной экстракции инулина из топинамбура являются экзотермическими (с выделением тепла  $\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial y}\right)_{T,P} < 0$ ), а ГК из корня солодки эндотермическими (с поглощением тепла  $\left(\frac{\partial \Delta E}{\partial y}\right)_{T,P} > 0$ ),

что связано с образованием или разрушением межмолекулярных водородных связей при выделении или поглощении тепловой энергии и величиной энергии сольватации (в водных растворах гидратации) молекул инулина и ГК экстрагентом при электростатическом взаимодействии между ними и растворителем, что сопровождается изменением энтропии системы. К тому же по результатам проведенного исследования выявлено, что энтропийный фактор  $T \left(\frac{\partial \Delta S}{\partial y}\right)_{T,P}$  сравним с другими энергетическими составляющими, что обусловлено структурной

или энтропийной связью инулина и ГК с рафинатом.

Исследованиями установлено, что повышение температуры вызывает рост коэффициента распределения в системе и смещает равновесие экзо- или эндотермической реакций, снижая скорость прямого процесса. Изменение энергии Гиббса ( $(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}) > 0$  для инулина и  $(\frac{\partial \Delta F}{\partial y}) < 0$  для ГК во всем изучаемом температурном интервале) в процессе выделения компонентов обусловлено величиной энтропийной составляющей, которая обусловлена сольватацией молекул инулина и ГК экстрагентом. В экстракте также возможны процессы ассоциации и деструкции молекул инулина и ГК за счет образования или разрушения межмолекулярных водородных связей.

Также установлено, что закономерность варьирования энергии Гиббса процедуры распределения линейна. Кроме того, предположено, что на движущую силу процесса распределения инулина и ГК при водной экстракции влияет диполь-дипольное взаимодействие, ориентационный эффект и донорно-акцепторное взаимодействие как механизм образования ковалентной связи за счет вакантной орбитали одной частицы и не поделенной электронной пары другой (атом или ион, который предоставляет пару электронов, называют донором, а атом, предоставляющий вакантную электронную орбиталь, – акцептором) между экстрагентом и компонентами водного экстракта.

При этом, как уже отмечалось,  $r_{\text{общ}}$  при экстракции расходуется не только на сам процесс растворения извлекаемого компонента, но и на преодоление его структурной (энтропийной) или адсорбционной связи с сырьем или рафинатом,

что можно обеспечить, в частности, дополнительной энергией при нагреве гидромодуля или экстрагента или при ультразвуковой кавитации.

**Заключение.** Для топинамбура и корня солодки, а также процессов водной экстракции из них инулина и ГК рассчитаны константы их распределения между экстрагентом и твердой фазой, проведен термодинамический анализ и определены параметры статики экстракции, такие как энергетические составляющие свободной энергии Гиббса.

Отмечено, что  $r_{\text{общ}}$  при экстракции расходуется не только на сам процесс растворения извлекаемого компонента, но и на преодоление его структурной (энтропийной) или адсорбционной связи с сырьем или рафинатом, что можно обеспечить, в частности, дополнительной энергией при нагреве гидромодуля или экстрагента или при ультразвуковой кавитации. Учитывая общую теплоту, затрачиваемую при переносе компонента из фазы в фазу, в уравнении теплового баланса, как пример, определено изменение температуры при экстракции с учетом теплоемкости экстракта. Следует отметить, что при изменении гидромодуля и концентрации экстракта, а также вида экстрагента, природы сырья и переносимого компонента, тепловой эффект может варьироваться, в частности усиливаться.

Таким образом, полученные результаты позволяют учесть экзотермический эффект или эндотермический для каждого вида сырья и переносимого компонента при проведении процесса экстракции в аспекте соблюдения температурных ограничений, а также могут использоваться при составлении теплового баланса для определения энергоемкости процесса экстрагирования и моделирования обозначенной операции.

#### Список источников

1. Дьякова Н.А. Экспериментальный подбор оптимальных технологических параметров ультразвуковой экстракции инулина // Вестник Смоленской государственной медицинской академии. 2021. Т. 20, № 4. С. 188–193.
2. Бызов В.А. Системный анализ состояния и перспективы развития производства инулина (обзор) // Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2022. Т. 23, № 6. С. 757–776.
3. Konnova O.I., Maksimenko Y.A. Experimental-analytical study of the process of ultrasonic extraction of inulin from jerusalem tubers // Proceedings of the Voronezh state university of engineering technologies. 2024. Vol. 86, N 3. P. 102–108. (In Russ.). DOI: 10.20914/2310-1202-2024-3-102-108.
4. Коннова О.И., Максименко Ю.А. Технология получения инулина из клубней топинамбура // Индустрия питания. 2025. Т. 10, № 1. С. 23–29.

5. Ларичева К.Н., Гришина У.Г. Глицерин как альтернативный растворитель для экстракции глицирризиновой кислоты из корней солодки голой *Glycyrrhiza Glabra* // Новые технологии. 2024. Т. 20, № 2. С. 90–104.
6. Дубовская Н.А. Разработка методики получения глицирризиновой кислоты из солодки голой при помощи ультразвуковой экстракции. В сб.: Всероссийская научно-практическая конференция «Природные соединения и здоровье человека». Иркутск, 2021. С. 174–178.
7. Соколова Е.В., Максименко Ю.А., Коннова О.И. Интенсификация процесса экстракции при производстве экстракта солодкового корня // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2024. Т. 86, № 4. С. 185–190.
8. Филимонова М.С., Шимановский Н.Л. Различные лекарственные формы глицирризиновой кислоты и возможности их применения при вирус-ассоциированных и воспалительных заболеваниях // Химико-фармацевтический журнал. 2023. Т. 57, № 4. С. 3–11.
9. Рубцова Л.Н., Сорокин В.В., Касьяненко Е.Ф. Экстрагирование из твердых веществ // Ползуновский вестник. 2023. № 3. С. 203–209.
10. Алексанян И.Ю., Свирина С.А., Лебедев В.А., и др. Конструкция экстрактора для реализации процесса экстрагирования из твердых веществ из измельченного растительного сырья // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2022. № 2. С. 7–11.
11. Абашкин И.А., Елеев Ю.А., Глухан Е.Н., и др. Методы экстракции биологически активных веществ из растительного сырья (обзор) // Химия и технология органических веществ. 2021. № 2. С. 43–59.
12. Стремин А.А., Федоренко Б.Н. Использование ультразвука для ускорения экстракции в пищевой промышленности // Вестник науки. 2023. Т. 3, № 5. С. 725–730.
13. Макаров А.Е., Нугманов А.Х.Х., Алексанян И.Ю., и др. Исследование кинетики экстракции водорастворимых веществ из мякоти хурмы // Индустрия питания. 2024. Т. 9, № 3. С. 56–68.
14. Цветов Н.С., Середа Л.Н., Палий А.Е., и др. Изучение кинетики ультразвуковой экстракции биологически активных соединений из сырья *Thymus vulgaris* L. в водно-спиртовой среде // Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада. 2024. № 153. С. 88–96.
15. Шинкарева Т.Е., Овсянников В.Ю., Трунов С.А. Физические методы обработки как фактор интенсификации экстракционного извлечения биологически активных веществ. В сб.: I Национальная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Холодильная техника и биотехнологии». Кемерово, 2019. С. 118–122.
16. Шишацкий Ю.И., Дерканосова А.А., Толстов С.А. Термодинамика фазового равновесия в системах твердое тело-жидкость и твердое тело-газ // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2021. Т. 83, № 1. С. 30–35.
17. Степанов К.С., Турманидзе Г.Н., Сорокин В.В., и др. Применение термодинамических моделей для прогнозирования растворимости биологически активных веществ // Разработка и регистрация лекарственных средств. 2023. Т. 12, № 4. С. 46–53.
18. Jurinjak Tusek A., Benković M., Cvitanović A., et al. Kinetics and thermodynamics of the solid-liquid extraction process of total polyphenols, antioxidants and extraction yield from Asteraceae plants // Industrial Crops and Products. 2016. Vol. 91. P. 205–214.
19. Подгорный С.А., Кошевой Е.П., Косачев В.С. Термодинамический подход в теории сушки // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. 2015. № 4. С. 88–91.
20. Максименко Ю.А., Коннова О.И., Алексанян И.Ю. Термодинамика взаимодействия инулинового комплекса с водой // Новые технологии. 2023. Т. 19, № 4. С. 111–118.
21. Запорожец Е.Ю., Фоменко Е.В., Нугманов А.Х.Х., и др. Термодинамический анализ статических закономерностей сорбции эктокарпусом влаги на основе его гигроскопических характеристик // Индустрия питания. 2023. Т. 8, № 3. С. 113–122.
22. Нугманов А.Х.Х., Бакин И.А., Мустафина А.С., и др. Исследование технологических методов экстракции инулина из корней обыкновенного цикория (*Cichorium intybus* L.) // Хранение и переработка сельхозсырья. 2024. № 4. С. 33–44.
23. Муцаев Р.В., Алексанян И.Ю., Нугманов А.Х.Х., и др. Термодинамический анализ механизма взаимодействия инулина с водой // Современная наука и инновации. 2017. № 4. С. 79–84.

24. Алексанян И.Ю., Хайбулов Р.А., Голубятникова М.В. Анализ механизма тепломассопереноса при оптимизации процесса сушки экстракта корня солодки // Вестник Астраханского государственного технического университета. 2005. № 2. С. 278–283.

### References

1. Dyakova NA. Experimental selection of optimal technological parameters of ultrasonic inulin extraction. *Bulletin of the Smolensk State Medical Academy*. 2021;20(4):188-193.
2. Byzov VA. System analysis of the state and prospects of development of inulin production (review). *Agrarian Science of the Euro-North-East*. 2022;23(6):757-776.
3. Konnova OI, Maksimenko YA. Experimental-analytical study of the process of ultrasonic extraction of inulin from jerusalem tubers. *Proceedings of the Voronezh state university of engineering technologies*. 2024;86(3):102-108. (In Russ.). DOI: 10.20914/2310-1202-2024-3-102-108.
4. Konnova OI, Maksimenko YuA. Technology of inulin production from jerusalem artichoke tubers. *Food industry*. 2025;10(1):23-29.
5. Laricheva KN, Grishina UG. Glycerin as an alternative solvent for the extraction of glycyrrhizic acid from the roots of licorice *Glycyrrhiza Glabra*. *New technologies*. 2024;20(2):90-104.
6. Dubovskaya NA. Development of a technique for obtaining glycyrrhizic acid from licorice using ultrasound extraction. In: *All-Russian Scientific and Practical Conference "Natural compounds and human health"*. Irkutsk; 2021. P. 174–178.
7. Sokolova EV, Maksimenko YuA, Konnova OI. Intensification of the extraction process in the production of licorice root extract. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2024;86(4):185-190.
8. Filimonova MS, Shimanovsky NL. Various dosage forms of glycyrrhizic acid and the possibilities of their use in virus-associated and inflammatory diseases. *Chemical and Pharmaceutical Journal*. 2023;57(4):3-11.
9. Rubtsova LN, Sorokin VV, Kasyanenko EF. Extraction from solids. *Polzunovskiy vestnik*. 2023;3:203-209.
10. Aleksanyan IYu, Svirina SA, Lebedev VA, et al. Extractor design for the implementation of the extraction process from solids from crushed vegetable raw materials. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University*. 2022;2:7-11.
11. Abashkin IA, Eleev YuA, Glukhan EN, et al. Methods of extraction of biologically active substances from plant raw materials (review). *Chemistry and technology of organic substances*. 2021;2:43-59.
12. Stremin AA, Fedorenko BN. The use of ultrasound to accelerate extraction in the food industry. *Bulletin of Science*. 2023;3(5):725-730.
13. Makarov AE, Nugmanov AHH, Aleksanyan IYu, et al. Investigation of the kinetics of extraction of water-soluble substances from persimmon pulp. *Food Industry*. 2024;9(3):56-68.
14. Tsvetov NS, Sereda LN, Paliy AE, et al. Study of the kinetics of ultrasonic extraction of biologically active compounds from raw materials of *OThymus Vulgaris L.* in a water-alcohol environment. *Bulletin of the Nikitsky State Botanical Garden*. 2024;153:88-96.
15. Shinkareva TE, Ovsyannikov VYu, Trunov SA. Physical processing methods as a factor in the intensification of extraction of biologically active substances. In: I National Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists "Refrigeration technology and biotechnology". Kemerovo; 2019. P. 118–122.
16. Shishatsky Yul, Derkanosova AA, Tolstov SA. Thermodynamics of phase equilibrium in solid-liquid and solid-gas systems. *Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2021;83(1):30-35.
17. Stepanov KS, Turmanidze GN, Sorokin VV, et al. Application of thermodynamic models for predicting the solubility of biologically active substances. *Development and registration of medicines*. 2023;12(4):46-53.
18. Jurinjak Tusek A, Benković M, Cvitanović A, et al. Kinetics and thermodynamics of the solid-liquid extraction process of total polyphenols, antioxidants and extraction yield from Asteraceae plants. *Industrial Crops and Products*. 2016;91:205-214.

19. Podgorny SA, Koshevoy EP, Kosachev VS. Thermodynamic approach in drying theory // News of higher educational institutions establishments. Food technology. 2015;4:88-91.
20. Maksimenko YuA, Konnova OI, Aleksanyan IYu. Thermodynamics of interaction of the inulin complex with water. *New technologies*. 2023;19(4):111-118.
21. Zaporozhets EYu, Fomenko EV, Nugmanov AHH, et al. Thermodynamic analysis of static patterns of moisture sorption by ectocarpus based on its hygroscopic characteristics. *Food Industry*. 2023;8(3):113-122.
22. Nugmanov AHH, Bakin IA, Mustafina AS, et al. Investigation of technological methods of inulin extraction from the roots of common chicory (*Cichorium intybus* L.). *Storage and processing of agricultural raw materials*. 2024;4:33-44.
23. Mutsaev RV, Aleksanyan IYu, Nugmanov AHH, et al. Thermodynamic analysis of the mechanism of inulin-water interaction. *Modern Science and innovations*. 2017;4:79-84.
24. Aleksanyan IYu, Khaibulov RA, Golubyatnikova MV. Analysis of the mechanism of heat and mass transfer in optimizing the drying process of licorice root extract. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University*. 2005;2:278-283.

Статья принята к публикации 05.11.2025 / The article accepted for publication 05.11.2025.

Информация об авторах:

**Игорь Юрьевич Алексанян**, профессор кафедры «Технологические машины и оборудование», доктор технических наук, профессор

**Альберт-Хамед-Харисович Нугманов**, профессор кафедры технологических машин и оборудования, доктор технических наук, профессор

**Ольга Ивановна Коннова**, ассистент кафедры технологических машин и оборудования

**Екатерина Владимировна Соколова**, ассистент кафедры технологических машин и оборудования

Information about the authors:

**Igor Yuryevich Aleksanyan**, Professor, Department of Technological Machines and Equipment, Doctor of Technical Sciences, Professor

**Albert-Khamed-Kharisovich Nugmanov**, Professor, Department of Technological Machines and Equipment, Doctor of Technical Sciences, Professor

**Olga Ivanovna Konnova**, Assistant, Department of Technological Machines and Equipment

**Ekaterina Vladimirovna Sokolova**, Assistant, Department of Technological Machines and Equipment

