

Научная статья

УДК [665.637.73:532.73]:[678.049.36:664.31]

DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-1-12-21

Исследование кинетики растворения технического парафина в гексане и удельной теплоты испарения гексанопарафиновой композиции при получении пищевого парафина

М.А. Марышева, И.Ю. Алексанян, А.Х.-Х. Нугманов*, Л.М. Титова, Ю.А. Максименко

*Астраханский государственный технический университет
Россия, Астрахань, *albert909@yandex.ru*

Аннотация. Исследовали кинетические закономерности процессов растворения технического парафина в н-гексане и конвективного концентрирования полученного раствора, результаты которого необходимы для анализа их механизма и скорости в зависимости от режимных параметров, так как это позволит определить рациональную продолжительность проводимых процедур при выработке гидрофобной пищевой упаковки. Находили основные факторы кинетики процедуры растворения технического парафина в н-гексане (постоянные интенсивности процесса n и k ; энергию активации E_a (кДж/(моль·°К))), а также удельной теплоты испарения гексанопарафиновой смеси r (кДж/кг) в процессе конвективного концентрирования. Объектами изучения служили технический парафин и гексанопарафиновая смесь. Исследование кинетики растворения технического парафина, проводилось гравиметрически, согласно известному методу при температурах 35 и 40°С. Метод опирается на измерение веса при смешении с растворителем, подвешивание перфорированной емкости из металла с пробой на крючок весового механизма, перманентный замер веса пробы емкости с навеской, опускание ее в емкость с изучаемым растворителем и термостатирование, фиксирование данных. Информация о r при фиксированных значениях температуры получена экспериментальным путем на опытной калориметрической установке. Для процесса растворения парафина в н-гексане установлены следующие результаты: $E_a = 105,8$ кДж/(моль·°К); при 40°С $n = 0,686$, $k = 0,031$; при 35°С $n = 1,042$, $k = 0,016$. Для процесса конвективного концентрирования определена величина теплоты испарения растворителя с растворенными в нем токсичными компонентами: $r = 420,9$ кДж/кг.

Ключевые слова: технический парафин; гексанопарафиновая смесь; пищевой парафин; парафинизация; кинетика растворения; удельная теплота испарения; конвективное концентрирование

Original article

Kinetics of technical paraffin dissolution in hexane and the specific heat of vaporization of a hexane-paraffin composition in the production of food paraffin

Marina A. Maryisheva, Igor Yu. Aleksanian, Albert H.-H. Nugmanov*, Lyubov M. Titova, Yury A. Maksimenko

*Astrakhan State Technical University
Astrakhan, Russia, *albert909@yandex.ru*

Abstract. The article is devoted to the study of the kinetic regularities for the processes of technical paraffin dissolution in n-hexane and the convective concentration of the resulting solution. The results of the study are necessary to analyze the mechanism and speed of the processes depending on the regime parameters, allowing to determine the rational duration of the procedures carried out in the development of hydrophobic food packaging. The purpose of this study is to find the main factors of the kinetics for the procedure of dissolving technical paraffin in n-hexane (the process intensity constants n and k ; the activation energy E_a (kJ/(mol °K))), as well as the specific heat of evaporation of the hexanoparaffin mixture r (kJ/kg) in the process of convective concentration. The objects of study were technical paraffin and hexanoparaffin mixture. The kinetics of technical paraffin dissolution of, according to a known method at the temperatures of 35°С and 40°С. The method is based on measuring the weight when mixed with a solvent, hanging a perforated metal container with a sample on the hook of a weighing mechanism, permanently measuring the weight of a sample of a container with a sample, lowering it into a container with a solvent under study, its thermostating, and recording data. Information about r at fixed values of its temperature was obtained experimentally on an experimental calorimetric setup. As a result of the studies carried out for the process of paraffin dissolution in n-hexane, the following values of the target parameters were obtained: $E_a = 105.8$ kJ/(mol °K); at 40°С $n = 0.686$, $k = 0.031$; at 35°С $n = 1.042$, $k = 0.016$. For the process of convective concentration, the value of the heat of evaporation of the solvent with toxic components dissolved in it was also determined: $r = 420.9$ kJ/kg.

Keywords: technical paraffin; hexane-paraffin mixture; food paraffin; paraffinization; dissolution kinetics; specific heat of vaporization; convective concentration

Введение

Для пектиносодержащих пленочных структур, идущих на производство биоразлагаемых упаковочных материалов и являющимися по своей природе гидрофильными, снизить влияние внешних факторов, в первую очередь влаги, позволит их парафинизация, т.е. нанесение на поверхность пленки тонкого слоя расплавленного пищевого парафина для последующей защиты упакованных пищевых продуктов от воздействия влаги и солнечных лучей. При производстве влагоотталкивающих композиций большое внимание уделяется качеству базового пищевого парафина, где одним из важных показателей безопасности является отсутствие в нем канцерогенных ароматических углеводородов [1–3].

Эффективность пищевых технологий с экономической точки зрения существенно обусловлена интенсивностью технологических операций. Научное положение, определяющее механизм и интенсивность варьирования параметров операции, носит название кинетики. Информация о кинетических закономерностях нужна для выявления рациональных режимных параметров при проектировании процессов и оборудования. Исследование кинетических закономерностей исследуемых процессов растворения технического парафина в *n*-гексане и конвективного концентрирования полученного раствора необходимо для анализа их механизма и скорости в зависимости от режимных параметров, что позволит определить рациональную продолжительность этих процедур и удельный выход получаемого продукта.

Результатом изучения и анализа кинетической закономерности процесса растворения парафина в *n*-гексане для данного исследования служит выявление ограничивающего этапа данной операции, его адекватную формально-кинетическую аппроксимацию и нахождение основных факторов кинетики процедуры: постоянных интенсивности и энергии активации. В принципе, растворение парафина в *n*-гексане представляет из себя гетерогенную процедуру и наблюдается на границе фазового раздела между жидкой и твердой субстанциями. По этой причине общая интенсивность данной операции определяется суммированием интенсивностей двух последовательных этапов:

- физико-химический контакт *n*-гексана с техническим парафином;
- диффузионное перемещение компонентов с периферии парафиновой субстанции в раствор.

Общая интенсивность операции обусловлена соотношением интенсивностей данных этапов и лимитируется интенсивностью самого медленного этапа, который и обуславливает кинетический и диффузионный режимы растворения.

Процедура растворения связана с существенным повышением энтропии системы, поскольку при равномерной дисперсии частичек одной субстанции в другой интенсивно растет количество микроскопических состояний системы. Ясно, что в процессе растворения субстанций в твердом состоянии наблюдается их деструкция, что обуславливает энергозатраты и по этой причине растворению сопутствует поглощение тепловой энергии. При условии, что присутствует обратный эффект, вместе с растворением наблюдается какое-либо взаимное влияние между растворителем и растворенной субстанцией, при котором выделяется больше теплоты, чем ее тратится на деструкцию молекулярной решетки субстанции в твердом состоянии.

При моделировании процесса удаления *n*-гексана из исследуемого раствора вместе с токсичными веществами, в частности бенз- α -пирена, необходимо определиться с величиной удельной теплоты образования пара и конденсации растворителя r , (Дж/кг) для различных технологических условий его проведения, т.к. зависимость $r = f(C_n, T)$ входит в дифференциальное уравнение теплопереноса [4, 5].

В качестве удельной теплоты парообразования и конденсации понимают физическую величину, показывающую, какое количество теплоты необходимо подвести к жидкости, чтобы обратить ее 1 кг в парообразное состояние, при определенной температуре жидкой среды и при исключении ее варьирования при испарении [6, 7]. Она соответствует удельной тепловой энергии конденсации единицы паровой массы в жидкое состояние.

Целью исследования является определение рациональных режимов растворения парафина в гексане и удельной теплоты испарения гексанопарафиновой смеси в процессе конвективного концентрирования.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования послужила гексанопарафиновая смесь.

Исследование кинетики растворения технического парафина, полученного из асфальто-смоло-парафиновых отложений, проводилось гравиметрически, согласно методу, подробно описанному в источнике [8] при температурах 35 и 40°C. Метод опирается на измерение веса при смешении с растворителем, подвешивание перфорированной емкости из металла с пробой на крючок весового механизма, перманентный замер веса пробы емкости с навеской, опускание ее в емкость с изучаемым растворителем, термостатирование и фиксирование данных. Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 1.

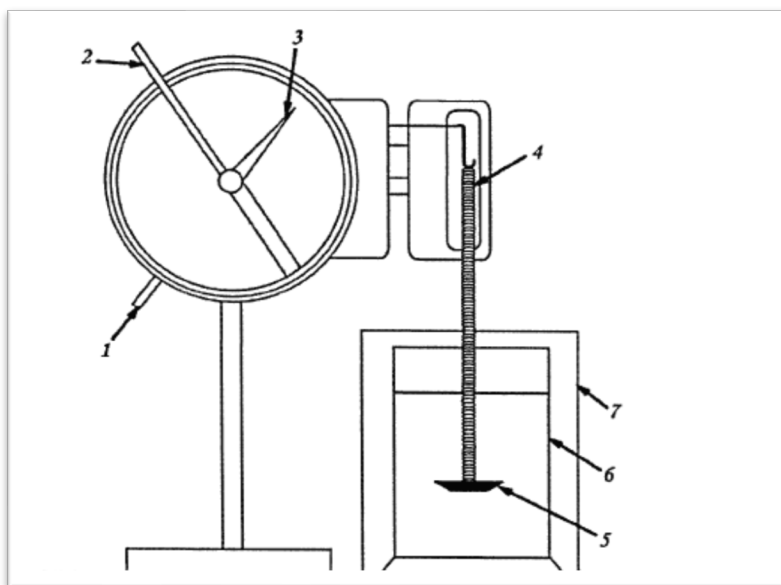


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – арретир; 2 – рычаг натяжения; 3 – указатель массы; 4 – пружина; 5 – металлическая корзина; 6 – сосуд с растворителем; 7 – термостат

Figure 1. Experimental setup: 1 – cage; 2 – tension lever; 3 – weight indicator; 4 – spring; 5 – metal basket; 6 – vessel with a solvent; 7 – thermostat

Отличием выбранного метода служит применение навесок без их деструкции при плавлении, а также возможность перманентного определения варьирования веса парафина. При этом исключается влияние субъективного фактора и перемещения навески в растворителе [9, 10].

Информация о величине удельной теплоты парообразования и конденсации растворителя r при фиксированных значениях температуры была получена экспериментальным путем на опытной калориметрической установке, представленной на рисунке 2. Данный опытный стенд является модернизацией ранее разработанной установки, которая была доработана и адаптирована для данных исследований [11, 12]. Следует отметить, что адаптированная установка в сравнении с другими опытными стендами обладает такими преимуществами, как простота конструкции, быстрота замены исследуемых образцов и заданной для исследуемого материала инженерной точностью определения теплофизической величины.

Определение теплоты испарения основано на измерении количества подведенной теплоты, необходимой для испарения вещества и взвешивании конденсата. Тепло, сообщенное кипящей жидкости нагревателем, идет на ее испарение, а также не избежать его потерь

$$UI\tau = mr + Q_{\text{пот}},$$

где U – напряжение, В;

I – сила тока, А;

τ – время, с;

m – масса собранного конденсата, кг;

r – удельная теплота парообразования, Дж/кг;

$Q_{\text{пот}}$ – потери тепла, Дж.

Так как потеря тепла по закону Ньютона пропорциональна разности температур жидкости и окружающей среды, а температура кипящей жидкости постоянна, то потери тепла в обоих опытах можно считать одинаковыми. Тогда для первого опыта

$$U_1 I_1 \tau = m_1 r + Q_{\text{пот}},$$

для второго

$$U_2 I_2 \tau = m_2 r + Q_{\text{пот}}.$$

Отсюда удельная теплота испарения

$$r = \frac{U_2 I_2 - U_1 I_1}{m_2 - m_1}.$$

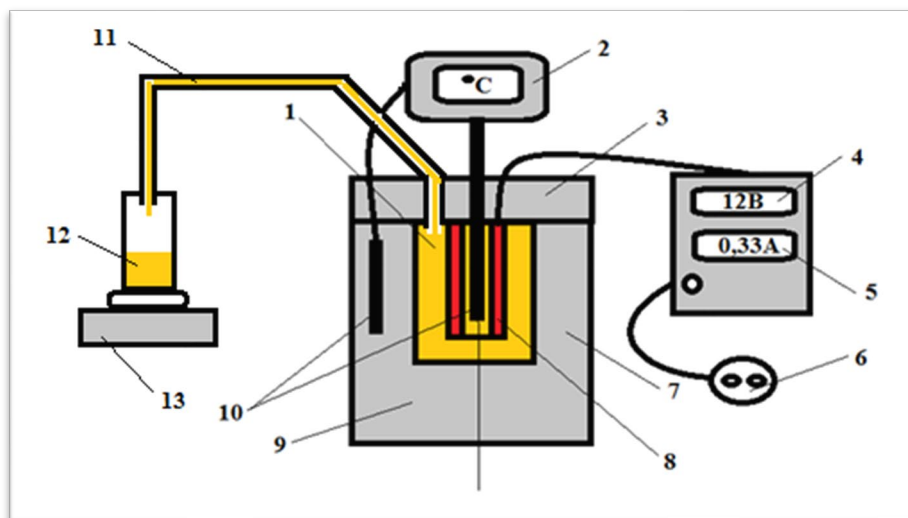


Рисунок 2 – Принципиальная схема опытной установки для определения удельной теплоты испарения: 1 – исследуемый жидкий материал; 2 – дисплей термодатчика; 3 – крышка калориметра; 4 – вольтметр; 5 – амперметр; 6 – источник питания; 7 – калориметр (термос); 8 – электронагреватель; 9 – теплоизоляционный материал; 10 – термопары; 11 – канал для отвода конденсата; 12 – конденсат; 13 – электронные весы

Figure 2. Pilot plant for determining specific heat of vaporization:

1 – investigated liquid material; 2 – display of the temperature sensor; 3 – calorimeter cover; 4 – voltmeter; 5 – ammeter; 6 – power supply; 7 – calorimeter (thermos); 8 – electric heater; 9 – heat-insulating material; 10 – thermocouples; 11 – channel for condensate drainage; 12 – condensate; 13 – electronic scales

Результаты и их обсуждение

Технология изготовления влагонепроницаемого упаковочного материала на основе пектиносодержащих пленочных структур путем их парафинизации представлена на технологической схеме (рисунок 3), в которой одной из основных процедур является растворение технического парафина, полученного из асфальто-смоло-парафиновых отложений, в н-гексане. Было установлено, что наиболее приемлемыми условиями проведения этого процесса являются температура растворителя 40°C и модуль 1:10, где 1 – это доля парафина, а 10 – доля растворителя, при этом сам объект растворения должен быть предварительно измельчен. При проведении этих исследований технический парафин измельчался посредством терочной поверхности с крупными отверстиями в виде капель, размер и форма которых представлена на рисунке 3.

С использованием методики [8] определена степень растворения α , которую рассчитывали как отношение растворившегося парафина к его взятой общей массе, и построена графическая ее зависимость от продолжительности процесса растворения при двух различных температурах (рисунок 4).

Экспериментальное построение кривых при двух различных температурах растворителя позволило вычислить энергию активации E_a , которую априори надо сообщить молекулам (частицам) взаимодействующих веществ, чтобы превратить их в активные, т.е. дать возможность молекулам вещества связаться с молекулами растворителя, образуя соединения, называемые сольватами (от лат. *solvere* – растворять) [13, 14]. Как правило, E_a выражают в кДж/моль.

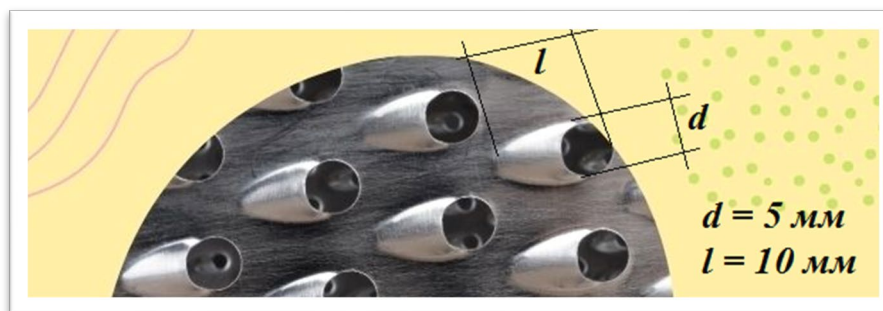


Рисунок 3 – Размер и форма терочной поверхности, используемая для измельчения технического парафина
 Figure 3. Size and shape of the grating surface used for grinding technical paraffin

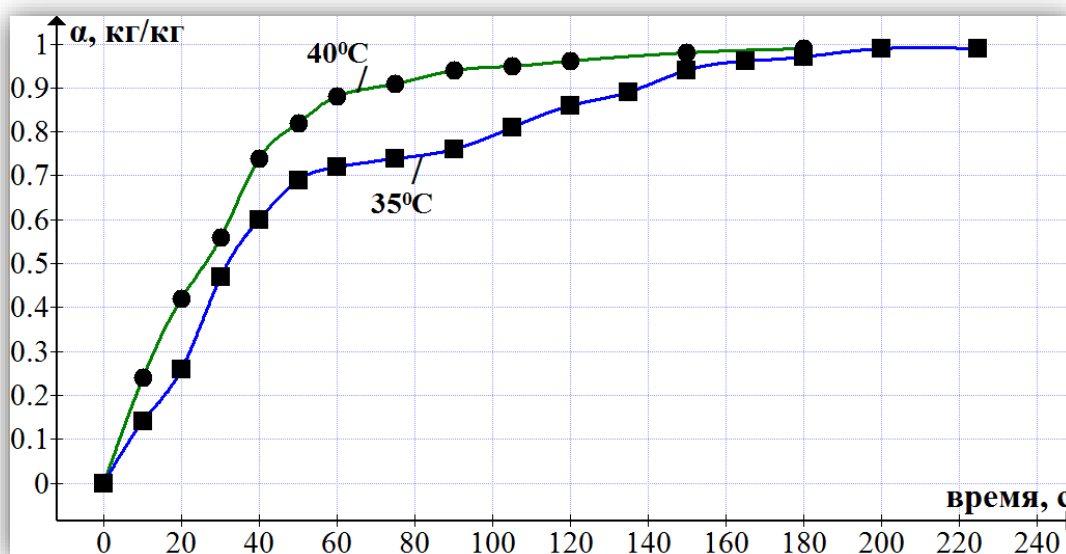


Рисунок 4 – Кинетические кривые растворения технического парафина в н-гексане при температурах 35 и 40°C
 Figure 4. Kinetic curves of technical paraffin dissolution in n-hexane at the temperatures of 35 and 40°C

Из характера кривых, представленных на рисунке 4, следует, что интенсивность растворения парафина в определенном реагенте заметно обусловлена температурой. Вид данных криволинейный зависимости предопределяет то, что растворение парафина осуществляется с наибольшей исходной интенсивностью. В данном случае в качестве реагента взят алифатический растворитель, имеющий малую химическую активность по отношению к ароматическим, откуда следует, что повышение скорости растворения обусловлено зависимостью от температуры, но при росте интенсивности данной операции падает, по причине повышения степени насыщения жидкой среды растворяемой субстанцией.

Подобные процедуры приемлемо описываются соотношением Ерофеева–Колмогорова [15–17]

$$\alpha = 1 - e^{-k\tau^n}, \tag{1}$$

где k – константа, обуславливающая постоянную интенсивности растворения;

τ – длительность процедуры;

n – константа, обуславливающая ее характер, при условии, что $n < 1$ – диффузия, $n = 1$ – реакция первого порядка, интенсивность которой сравнима с интенсивностью диффузии, $n > 1$ – кинетическая процедура.

При необходимости трансформации постоянных интенсивности в размерность c^{-1} целесообразно применить соотношение Саковича [18, 19]

$$K = nk^{-\frac{1}{n}}.$$

В уравнении (1) постоянные n и k можно определить графическим способом, для чего эту зависимость представим в логарифмическом виде

$$\ln(-\ln(1-\alpha)) = \ln k + n \ln \tau. \quad (2)$$

Очевидно, что полученное уравнение (2) является линейным, поэтому n – это тангенс угла наклона прямой, а $\ln k$ – это отрезок между точкой пересечения линией оси ординат и точкой пересечения координатных осей. В итоге по полученным экспериментальным данным (рисунок 4) построены кинетические кривые в координатах $\ln(-\ln(1-\alpha)) \sim \ln \tau$ (рисунок 5).

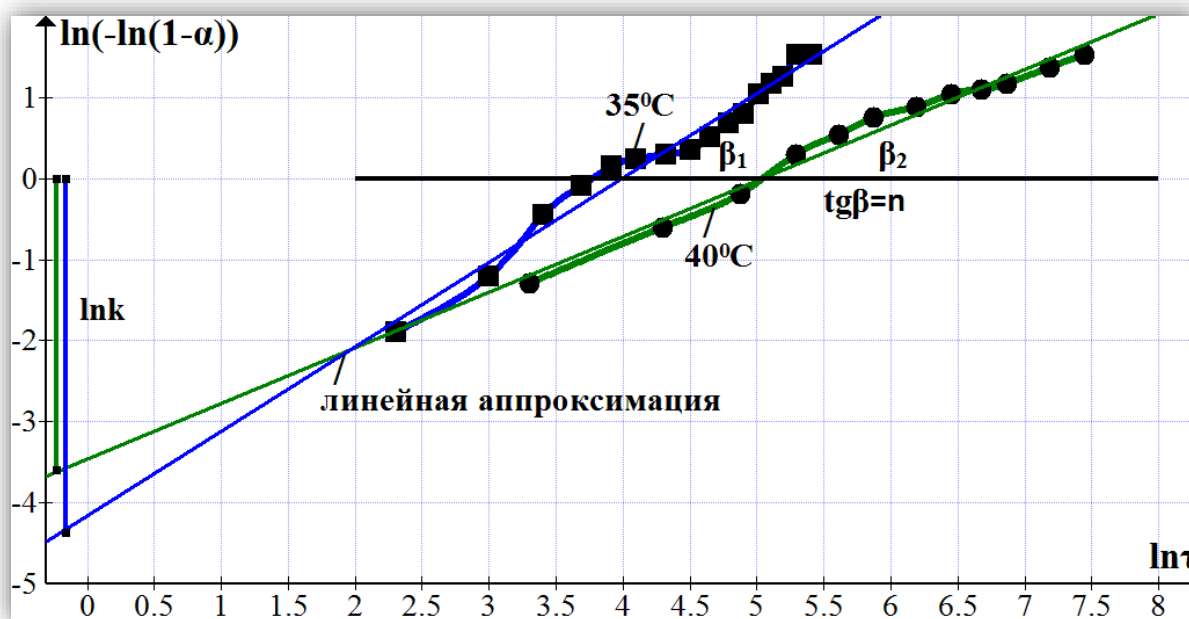


Рисунок 5 – Логарифмические анаморфозы кинетических кривых растворения
 Figure 5. Logarithmic anamorphoses of dissolution kinetic curves

Проведенная линейная аппроксимация кривых на рисунке 5 позволила определить постоянные n и k для двух вариантов растворения технического парафина в н-гексане: при температуре 40°C

$$\ln(-\ln(1-\alpha)) = 0,686 \ln \tau - 3,463,$$

$$n = 0,686; k = 0,031;$$

при температуре 35°C

$$\ln(-\ln(1-\alpha)) = 1,042 \ln \tau - 4,164,$$

$$n = 1,042; k = 0,016.$$

Из полученных результатов видно, что процесс растворения технического парафина в н-гексане при T выше 35°C протекает в диффузионной области ($n < 1$), поэтому только при росте T растворителя появляется вероятность роста диффузионной скорости, и интенсивность взаимного физико-химического влияния как парафина, так и его токсичных веществ на растворитель сравнима с интенсивностью их диффузионного перемещения. При падении T растворителя ввиду его алифатической природы процесс начинает протекать менее интенсивно ($n > 1$), т.к. технический парафин, обладая меньшей кинетической энергией, уже не способен полностью распределиться в н-гексане, обладающем по своей природе низкой химической активностью, и начинает выпадать в осадок.

Для определения величины энергии активации E_a , передающейся молекулярным структурам взаимодействующих субстанций для их трансформации в активные частицы, воспользуемся уравнением, в которое входят температурные условия процесса T_1, T_2 и константы его скорости k_1, k_2 [20]

$$E_a = \frac{RT_1T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{k_2}{k_1},$$

где $R = 8,314$ – газовая постоянная, Дж/(моль·°К).

$$E_a = \frac{8,314 \cdot 308 \cdot 313}{5} \cdot \ln 1,94 = 105,8 \text{ кДж/(моль·°К)}.$$

Кинетическим параметром растворения можно считать зависимость содержания нерастворенной субстанции ω от безразмерной продолжительности $x = \frac{\tau}{\tau_n}$, где τ_n – длительность полного растворения при неизменных долях C и T . $\omega = f(x)$ называют кинетической функцией, в отличие от которой τ всегда обуславливает определенные условия растворения и варьируется при их варьировании.

При условии, что растворение осуществляется при неизменной доле активной субстанции реагента, то τ идентична длительности полного растворения в эксперименте: $\tau = \tau_n$. При варьируемой доле τ связана с τ_n уравнением

$$\tau = \frac{f(T_n)}{f(T)f(C)} \int_0^{\tau_n} \varphi(C_n) d\tau_n. \quad (3)$$

К примеру, для нахождения длительности полного растворения при определенных T_0 и C_0 приемлемо подставить в (3) $f(T_0)$ вместо $f(T)$ и $\varphi(C_0)$ функцию $f(C)$

$$\tau = \frac{f(T_n)}{f(T_0)\varphi(C_0)} \int_0^{\tau_n} \varphi(C_n) d\tau_n. \quad (4)$$

Можно также применить для нахождения τ_0 периодический опыт при $T_0 = T_n$. Таким образом, упрощаем соотношение (4)

$$\tau_0 = \frac{1}{\varphi(C_0)} \int_0^{\tau_n} \varphi(C_n) d\tau_n.$$

Включенный в (3) и (4) интеграл соответствует площади под криволинейной зависимостью $\varphi(C_n)$, и для его расчета приемлемо применить любой известный подход. Итак, данные периодического опыта, осуществленного при варьируемой доле активного реагента C_n , дают возможность просто найти τ_0 , при неизменных C_0 и T_0 . Для трансформации к другим долям и T приемлемо применить уравнение, опирающееся на (3) и (4)

$$\tau = \frac{f(T_n)\varphi(C_0)}{f(T)\varphi(C)}.$$

К примеру, при $f(T) = e^{-\frac{E_a}{RT}}$ и $\varphi(C) = C^\alpha$

$$\tau = \tau_0 e^{\frac{E_a(T_0 - T_1)}{R(T_0 T_1)}} \left[\frac{C_0}{C} \right]^\alpha. \quad (5)$$

Итак, зная величину E_a , α и τ_0 при определенных C_0 и T_0 по (5) можно рассчитать длительность полного растворения τ при варьируемых C и T .

Эмпирические данные по нахождению удельной теплоты парообразования исследуемого раствора представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Данные экспериментов первого опыта при фиксированных U_2 и I_2 Table 1. Experimental data of the first experiment with fixed U_2 and I_2

Эксперимент	Напряжение, В	Сила тока, А	Время на нагрев, с	Масса конденсата, г
1	12,106	0,341	50	6,271
2				6,285
3				6,263
4				6,278
5				6,269
Среднее значение				6,273

Таблица 2. Данные экспериментов второго опыта при фиксированных U_1 и I_1 Table 2. Experimental data of the second experiment with fixed U_1 and I_1

Эксперимент	Напряжение, В	Сила тока, А	Время на нагрев, с	Масса конденсата, г
1	11,702	0,283	50	6,186
2				6,194
3				6,165
4				6,162
5				6,174
Среднее значение				6,176

В итоге удельная теплота испарения исследуемого гексанового раствора при температуре близкой к температуре его кипения (70°C) равна

$$r = \frac{12,106 \cdot 0,314 - 11,702 \cdot 0,283}{0,006273 - 0,006176} 50 = 420866 \text{ Дж/кг.}$$

Полученный результат можно считать удовлетворительным, так как он вполне коррелирует с известными данными по величине теплоты испарения химически чистого н-гексана при той же температуре. Таким образом, для последующего моделирования процесса конвективного концентрирования и решения полученной модели, экспериментально и аналитически были получены все необходимые данные. Что касается найденной экспериментально величины r , то для узкого температурного интервала процедуры удаления растворителя из исследуемого раствора, ее можно принять постоянной.

Выводы

Таким образом, определены рациональные режимные параметры процесса растворения парафина в гексане и удельная теплота испарения гексанопарафиновой смеси в процессе конвективного концентрирования для получения пищевого парафина.

Приведенные данные не входят в конфликт с известными результатами других исследователей, подтверждены экспериментально и следственно могут быть использованы в инженерной практике.

Литература

1. Хужакулов А.Ф. Контактная очистка парафина адсорбентами в сочетании с ультразвуковым воздействием // Молодой ученый. 2012. № 12 (47). С. 114–115.
2. Марышева М.А., Алексанян И.Ю., Шишкин Н.Д. Совершенствование технологии парафина и ее аппаратного обеспечения для эффективного использования в пищевой промышленности // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2019. № 3. С. 111–118.
3. Петрушикина С.Н., Попов А.И. Парафин и его применение // Молодежь, наука, творчество: сб. тр. Ставрополь: Секвойя, 2016. С. 357–358.
4. Алексанян И.Ю., Максименко Ю.А., Нугманов А. Х.-Х., Титова Л.М. Математические методы численного решения научно-технических задач. Астрахань: Изд-во Астрах. гос. техн. ун-та, 2020. 148 с.
5. Карташов Э.М., Кудинов И.В., Кудинов В.А. Новые модельные представления нестационарного теплообмена // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2019. № 4. С. 67–74.
6. Крюков А.П., Левашов В.Ю., Жаховский В.В., Анисимов С.И. Тепло и массоперенос на межфазных поверхностях конденсат-пар // Успехи физических наук. 2021. Т. 191. № 2. С. 113–146.

7. Овчинкин В.А. Фазовые переходы и равновесия. М.: Физматкнига, 2018. 48 с.
8. Иванова И.К., Шиц Е.Ю., Калачева Л.П. Способ определения и оценки эффективности растворителей асфальтосмолопарафиновых отложений: пат. 2520954 Российская Федерация. 2014. Бюл. № 18. 12 с.
9. Иванова И.К., Корякина В.В., Семенов М.Е. Исследование кинетики растворения нефтяных и промышленных парафинов в различных углеводородных реагентах методом ДСК // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. Т. 2. С. 31–38.
10. Иванова И.К., Корякина В.В., Семенов М.Е. Исследование процессов растворения парафиновых отложений при низких температурах // Труды VIII Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD (Якутск, 03–07 июля 2018 года). Якутск: Цумори Пресс, 2018. С. 154–160.
11. Муцаев Р.В., Алексанян И.Ю., Нугманов А.Х.–Х. Определение удельной теплоемкости инулина калориметрическим способом // Технологии пищевой и перерабатывающей промышленности АПК – продукты здорового питания. 2017. № 2(16). С. 53–58.
12. Нугманов А. Х.-Х., Краснов В.А., Максименко Ю.А. Калориметр для определения теплоемкости пастообразных пищевых продуктов // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сб. тр. М.: Университетская книга, 2015. С. 456–459.
13. Соловьев А.В., Яковлев К.А. Методика определения энергии активации, порядка реакции и времени растворения твердой фазы в системах жидкость-твердое // Новые подходы в химической технологии минерального сырья. Применение экстракции и сорбции: сб. тр. Апатиты: Изд-во Кольского науч. центра РАН, 2013. Часть 2. С. 183–185.
14. Кораблев Г.А., Заиков Г.Е., Дебердеев Р.Я., Стоянов О.В. Энергия активации диффузии атомов и молекул в биосистемах // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15, № 5. С. 113–120.
15. Иванова И.К., Шиц Е.Ю. Использование результатов кинетических исследований для оценки эффективности растворителей асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) // Нефтегазовое дело. 2012. № 3. С. 345–353.
16. Иванова И.К., Рыкунов А.А., Шиц Е.Ю. Применение уравнения Ерофеева–Колмогорова для описания кинетики растворения асфальтосмолопарафиновых отложений // Руды и металлы. 2011. № 3–4. С. 73–74.
17. Загородняя А.В. Исследование кинетики и механики растворения полимера типа СБС в низкомолекулярных жидкостях // Луганский национальный аграрный университет. 2019. № 6–1. С. 254–261.
18. Богданов А.В., Исмаилов Т.А. Оценка константы скорости растворения галита в открытом объеме и в пористой среде // Вести газовой науки. 2017. № 2(30). С. 208–213.
19. Иванова И.К., Шиц Е.Ю. Кинетические исследования модельных процессов растворения отложений парафина в бинарной системе гексан-бензол в интервале температур от 10 до 60 °С // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Математика, механика, информатика. 2012. Т. 12, № 4. С. 59–63.
20. Булидорова Г.В., Галяметдинов Ю.Г., Князев А.А. [и др.] Определение порядка, константы скорости и энергии активации элементарных реакций. Казань: Изд-во Казанского национ. исслед. технолог. ун-та, 2015. 87 с.

References

1. Khuzhakulov A.F. Contact cleaning of paraffin with adsorbents in combination with ultrasonic action. *Young Scientist*. 2012, no. 12, pp. 114–115. (In Russian)
2. Marysheva M.A., Aleksanyan I.Yu., Shishkin N.D. Perfection of technology of paraffin and her vehicle providing for the effective use in food industry. *Technologies for the Food and Processing Industry of AIC – Healthy Food*. 2019, no. 3, pp. 111–118. (In Russian)
3. Petrushkina S.N., Popov A.I. Paraffin and its application. Youth, science, creativity. Collection of work. Stavropol, Sekvoya Publ., 2016, pp. 357–358. (In Russian)
4. Aleksanyan I.Yu., Maksimenko Yu.A., Nugmanov A. Kh.-Kh., Titova L.M. *Mathematical methods for the numerical solution of scientific and technical problems*. Astrakhan, Astrakhan Technical University Publ., 2020. 148 p. (In Russian)
5. Kartashov E.M., Kudinov I.V., Kudinov V.A. The new model ideas unsteady heat transfer. *News of RAS. Energy*. 2019, no. 4, pp. 67–74. (In Russian)
6. Kryukov A.P., Levashov V.Yu., Zhakhovskii V.V., Anisimov S.I. Heat and mass transfer at condensate-vapor interfaces. *Physics-Uspekhi*. 2021. V. 64, no. 2. pp. 109–140.
7. Ovchinkin V.A. *Phase transitions and equilibria*. Moscow, Fizmatkniga Publ., 2018. 48 p. (In Russian)
8. Ivanova I.K., Shits E.J., Kalacheva L.P. *Method for determining and evaluating effectiveness of asphalt paraffin deposits solvents*. Patent RF, no. 2520954. 2014.
9. Ivanova I.K., Koryakina V.V., Semenov M.E. Dissolution kinetics investigation of petroleum and commercial paraffins in various hydrocarbon reagents by dsc method. *Interexpo Geo-Siberia*. 2018, V. 2, pp. 31–38. (In Russian)
10. Ivanova I.K., Koryakina V.V., Semenov M.E. Investigation of the processes of dissolution of paraffin deposits at low temperatures. Proceedings of the VIII Eurasian Symposium on the Problems of Strength of Materials and Machines

- for Cold Climate Regions EURASTRENCOLD. (Yakutsk, July 03–07, 2018). Yakutsk, Tsumori Press Publ., 2018, pp. 154–160. (In Russian)
11. Mutsaev R.V., Aleksanyan I.Yu., Nugmanov A.Kh.-Kh. Definition specific heat of inulin by the time colorimetric method. *Technologies for the Food and Processing Industry of AIC – Healthy Food*. 2017, no. 2, pp. 53–58. (In Russian)
 12. Nugmanov A. Kh.-Kh., Krasnov V.A., Maksimenko Yu.A. Calorimeter for determining the heat capacity of pasty food products. *Actual Problems of Drying and Thermal and Moisture Treatment of Materials in Various Industries and the Agro-Industrial Complex*. Collection of Work. Moscow, University Book Publ., 2015. pp. 456–459. (In Russian)
 13. Soloviev A.V., Yakovlev K.A. Methods for determining the activation energy, the order of reaction and the dissolution time of the solid phase in liquid-solid systems. *New approaches to chemical technology of mineral raw materials. Solvent extraction and sorption*. Proceeding of the scientific conference. Apatity, Kola Science Centre RAS Publ., 2013, pp. 183–185. (In Russian)
 14. Korablev G.A., Zaikov G.E., Deberdeev R.Ya., Stoyanov O.V. Activation energy of diffusion of atoms and molecules in biosystems. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2012. V. 15, no. 5, pp. 113–120. (In Russian)
 15. Ivanova I.K., Shitz E.Yu. Using the results of kinetic studies to assess the effectiveness of solvents for asphalt-resin-paraffin deposits (ARPD). *Oil and Gas Business*. 2012, no. 3, pp. 345–353. (In Russian)
 16. Ivanova I.K., Rykunov A.A., Shitz E.Yu. Application of the Erofeev-Kolmogorov equation to describe the kinetics of dissolution of asphalt-resin-paraffin deposits. *Ores and Metals*. 2011, no. 3-4, pp. 73–74. (In Russian)
 17. Zagorodnyaya A.V. Research of the kinetics and mechanics of dissolution of polymer like sbs in low-molecular liquids. *Scientific Bulletin of Lugansk State Agrarian University*. 2019, no. 6-1, pp. 254–261.
 18. Bogdanov A.V., Ismayilov T.A. Estimation of dissolution velocity for halite in open volume and in porous medium. *Vesti gazovoy nauki*. 2017, no. 2, pp. 208–213. (In Russian)
 19. Ivanova I.K., Shitz E.Yu. Kinetic studies of model processes of dissolution of wax deposits in the hexane-benzene binary system in the temperature range from 10 to 60 °C. *Bulletin of Novosibirsk State University. Series: Mathematics, Mechanics, Informatics*. 2012, V. 12, no. 4, pp. 59–63. (In Russian)
 20. Bulidorova G.V., Galyametdinov Yu.G., Knyazev A.A. at al. *Determination of the order, rate constant and activation energy of elementary reactions: a tutorial*. Kazan, Kazan National Research Technological University Publ., 2015. 87 p. (In Russian)

Информация об авторах

Марина Александровна Марышева – старший преподаватель кафедры Технологические машины и оборудование
Игорь Юрьевич Алексанян – д-р техн. наук, профессор кафедры Технологические машины и оборудование
Альберт Хамед-Харисович Нугманов – д-р техн. наук, доцент кафедры Технологические машины и оборудование
Любовь Михайловна Титова – канд. техн. наук, доцент кафедры Технологические машины и оборудование
Юрий Александрович Максименко – д-р техн. наук, доцент, проректор по научной работе и инновациям

Information about the authors

Marina A. Marysheva, Senior Lecturer of the Department of Technological Machines and Equipment
Igor Yu. Aleksanian, D. Sc., Professor of the Department of Technological Machines and Equipment
Albert H.-H. Nugmanov, D. Sc., Associate Professor of the Department of Technological Machines and Equipment
Lyubov M. Titova, Ph.D., Associate Professor of the Department of Technological Machines and Equipment
Yury A. Maksimenko, D. Sc., Associate Professor, Vice-Rector for Research and Innovation

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflicts of interests

Статья поступила в редакцию 10.01.2022
Одобрена после рецензирования 21.02.2022
Принята к публикации 22.02.2022

The article was submitted 10.01.2022
Approved after reviewing 21.02.2022
Accepted for publication 22.02.2022