

Доцент С.А. Быков

(Елецкий гос. ун-т им. И. А. Бунина) кафедра автоматизированных систем управления и математического обеспечения, тел. (47467) 2-28-37

Исследование кинетики гидрофизических параметров частиц оболочки какао (какао-веллы) в диффузионной модели массообменного процесса

Приведены результаты исследований кинетики гидрофизических параметров частиц оболочки какао (какао-веллы) в диффузионной модели массообменного процесса. Определены кинетика поглощения жидкости частицами оболочки какао (какао-веллы), а также кинетика набухания частиц оболочки какао (какао-веллы) при поглощении жидкой фазы, как составные части модели массообменного процесса.

The article contains the results of investigation of hydrophysical parameters kinetics of cocoa outer skin fractions in the diffusion model of mass-transfer process. There were determined the kinetics of liquid intake by cocoa outer skin fractions and also the kinetics of swelling of cocoa outer skin fractions during the liquid phase absorption, as constituents of mass-transfer process model.

Ключевые слова: кинетика поглощения жидкости частицами кофейной оболочки, кинетики набухания частиц кофейной оболочки.

Результаты исследований кинетики гидрофизических параметров измельченного растительного сырья являются составной частью математической модели массообменного процесса в экстракционных аппаратах, которая, в свою очередь, определяет конструктивные особенности и режимы работы реальных производственных систем.

Исходным материалом для получения экстракта какао служит высушенное и обжаренное растительное сырье, отличительной особенностью которого является интенсивное поглощение влаги в начальной стадии процесса экстрагирования. Для высушенных и обжаренных растительных материалов поглощение жидкости и растворение в ней экстрактивных веществ является необходимым условием осуществления этого процесса. Находящееся в порах твердых частиц количество жидкости, определяя в данный момент времени концентрацию растворимых веществ в твердой фазе и движущую силу процесса, оказывает существенное влияние на ход фракционного процесса.

Прежде чем исследовать влагопоглощение жидкости оболочкой какао (какао-веллы), определяли начальную ее влажность. Для этого в десять бюкс отбирали десять проб оболочки из различных точек предоставленного

объема и высушивали при 80 °С до постоянного веса. Определяли влажность продукта по формуле:

$$\varphi = \frac{m_n - m_v}{m_n} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где m_n - масса навески оболочки до высушивания; m_v - масса высушенной навески оболочки.

Результаты опытов, представленные в [2], показали, что средняя влажность оболочки какао (какао-веллы) при хранении ее в сухом помещении составляет 10 %.

Основной структурной единицей растительной ткани является клетка. Структурную основу ее оболочек образует целлюлоза, в волокнах которой имеются микро- и макропоры. Наличие пор объясняет процесс поглощения экстрагента, происходящий, в основном, под действием капиллярных сил [1].

Ввиду сложности явлений, происходящих при поглощении, принимаем допущение, согласно которому поглощаемая влага и вносимые ею сухие вещества мгновенно и равномерно распределяются по всему объему твердой фазы. Сделаем предположение, что скорость процесса влагопоглощения пропорциональна величине $(q_{\max} - q)$, где q - коэффициент влагопоглощения, $q_{\max}$ - максимально возможное количество влаги, поглощаемое единицей массы абсолютно сухого материала.

Тогда изменение массы влаги, поглощенной единицей начальной массы сухих веществ оболочки какао в течение времени процесса экстрагирования, будет иметь вид кинетического уравнения первого порядка [3]:

$$\frac{dq}{d\tau} = K_u (q_{\max} - q), \quad (2)$$

где K_u - кинетический коэффициент интенсивности влагопоглощения.

Экспериментальные исследования кинетики поглощения жидкости оболочкой какао проводили при температурах процесса 70 °С, 80 °С, 90 °С. Методика проведения экспериментов представлена далее. Навеску неизмельченной оболочки какао (какао-веллы) массой 30 г засыпали в емкость авторской установки, заполненную экстрагентом массой 1 кг, предварительно нагретым до температуры опыта. Смесь выдерживали заданное время, барботируя воздухом. Затем частицы твердой фазы извлекали и помещали на одну минуту в перфорированный сосуд, в который от компрессора подавался воздух со скоростью, обеспечивающей витание твердых частиц. Такая операция необходима для удаления поверхностной влаги с частиц оболочки. Эта процедура приобретает еще большее значение, если знать, что, в связи с развитой поверхностью оболочки, на ней содержится до 50 % всей несвязной влаги материала. После удаления поверхностной влаги материал взвешивали, высушивали в сушильном шкафу при температуре 95 °С до постоянного веса. Затем определяем коэффициент влагопоглощения по формуле:

$$q = \frac{W_n}{M_k}, \quad (3)$$

где W_n - масса поглощенной влаги; M_k - масса нерастворимого каркаса.

На рис. 1 представлены графики изменения коэффициента влагопоглощения оболочки какао (какао-веллы) при различных условиях эксперимента. Из графиков видно, что имеет место очень большая способность оболочки впитывать влагу до 700 % от сухого веса, что объясняется, во-первых, большим количеством пор и развитой поверхностью оболочки, во-вторых, быстрым смывом масляной пленки с поверхности частиц с помощью интенсивного барботажа воздухом. Характер кривых показывает, что наибольшая интенсивность поглощения наблюдается в первые 5 минут

процесса. Такая закономерность проявляется во всех опытах независимо от температуры жидкости. Этот этап соответствует заполнению жидкостью наиболее доступных пор поверхности оболочки какао (какао-веллы), а так как площадь поверхности много больше толщины частицы, то и поглощается на данной стадии до 90 % всей поглощенной жидкости. На втором этапе дальнейшее поглощение жидкости связано с заполнением порового пространства внутренних, более удаленных от поверхности слоев частицы, что вызывает уменьшение интенсивности поглощения и соответствующее уменьшение угла наклона кривых к оси абсцисс. Увеличение температуры процесса приводит к повышению скорости поглощения жидкости (рис. 1).

Полученные экспериментальные зависимости коэффициента влагопоглощения от времени процесса при различных температурах были обработаны методом наименьших квадратов при помощи стандартных программ и получены следующие выражения:

для температуры 70 °С:

$$q = 3,3194\tau^{0,09857}, \quad (4)$$

для температуры 80 °С:

$$q = 3,99\tau^{0,08536}, \quad (5)$$

для температуры 90 °С:

$$q = 5,7\tau^{0,0341}, \quad (6)$$

Используя формулу (2), а также полученные экспериментальные данные, можно определить кинетический коэффициент интенсивности влагопоглощения K_u :

для температуры 70 °С:

$$\frac{dq}{d\tau} = 3,2719\tau^{-0,0143} \cdot (6,6 - q), \quad (7)$$

для температуры 80 °С:

$$\frac{dq}{d\tau} = 0,3406\tau^{-0,9146} \cdot (6,8 - q), \quad (8)$$

для температуры 90 °С:

$$\frac{dq}{d\tau} = 0,1944\tau^{-0,9659} \cdot (7 - q), \quad (9)$$

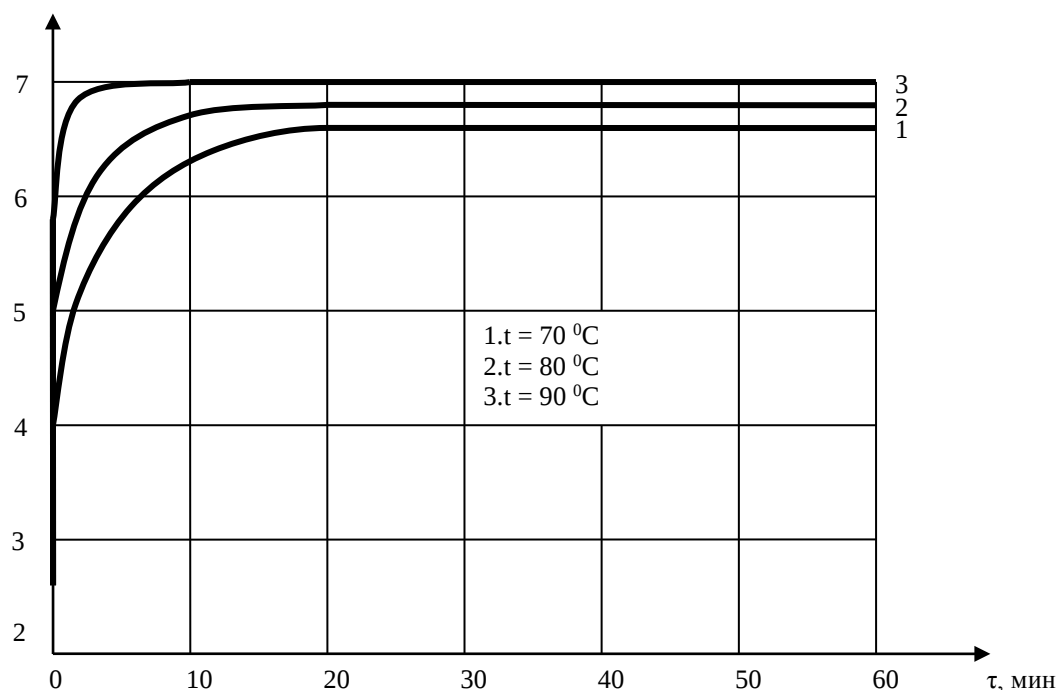


Рис. 1. Изменение коэффициента влагопоглощения оболочки какао (какао-веллы) в течение времени при различных температурных режимах.

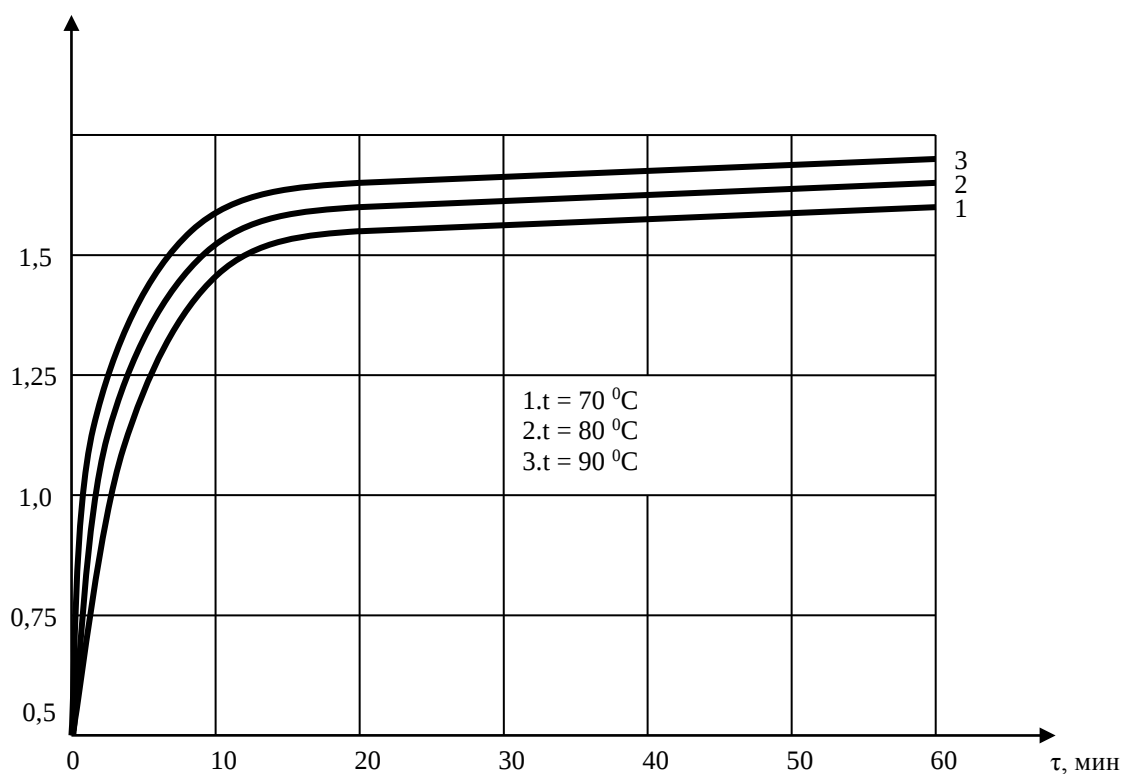


Рис. 2. Изменение коэффициента влагопоглощения какао в течение времени при различных температурных режимах.

В работе [2] в изучаемом диапазоне температур исследовано влагопоглощение измельченного какао (рис. 2) и раскрыты функциональные зависимости:

для температуры 70°C :

$$\frac{dq}{d\tau} = (2,54 + 45,1/\tau)(1,68 - q), \quad (10)$$

для температуры 80 °С:

$$\frac{dq}{d\tau} = 228,28 \cdot \tau^{-0,654} (1,685 - q), \quad (11)$$

для температуры 90 °С:

$$\frac{dq}{d\tau} = 372,1 \cdot \tau^{-0,719} (1,70 - q), \quad (12)$$

Характер этих кривых на рис. 2 аналогичен кривым влагопоглощения какао-веллы. Отличия заключаются в длительности первого этапа интенсивного поглощения влаги (у какао он 10 минут) и, конечно, в значительно меньшей влагопоглощающей способности измельченного какао, что объясняется его строением и физическими свойствами. Эти различия, безусловно, внесут коррективы в изучении массопроводных свойств смеси измельченного какао и какао-веллы при их совместном экстрагировании.

Полученные зависимости (4), (5), (6) и другие фактически описывают поглощение чистого экстрагента (воды), поскольку концентрация поглощаемой жидкости при проведении экспериментов незначительна, а в начальный момент времени равна нулю. При противоточном процессе и проведении ряда экспериментов по снятию экстракционных кривых для определения коэффициента диффузии высушенный обжаренный материал поглощает концентрированный экстракт с плотностью выше плотности экстрагента. Поскольку в процессе влагопоглощения определяющим параметром является объем поглощаемой жидкости, а ее плотность пропорциональна концентрации растворенных в ней веществ, принимается допущение, что полученные выше зависимости определяют и в этом случае количество поглощенного чистого экстрагента.

Было выполнено исследование кинетики набухания частиц оболочки какао (какао-веллы) при поглощении жидкой фазы.

На первой стадии процесса экстрагирования материала растительного происхождения, в котором растворимые вещества находятся в твердом состоянии, происходит интенсивное поглощение жидкой фазы порами твердых частиц и растворение целевого компонента. Появление жидкой фазы в порах приводит к возникновению сил, вызванных капиллярным давлением и действующих на стенку пор. Под влиянием этих сил элементы пористого тела смещаются, и пористая структура тела изменяется. Изменения в пористой структуре приводят к изменению

геометрических размеров, деформации тела, а также влияют на физические и массопроводные свойства материала [3].

Точное математическое описание, а также экспериментальная оценка величины этих сил ввиду малых размеров объекта весьма сложны. На этом основании выдвигается предположение о равенстве действующих сил по всем направлениям твердой частицы. Это позволит распространить результаты исследования набухания, проведенного по какому-либо одному геометрическому параметру частицы, на весь объем этой частицы.

Исследование кинетики набухания оболочки какао проводили по следующей методике. Из навески отбирали несколько частиц оболочки какао, которые фотографировали в определенном фиксированном положении с одним и тем же увеличением. Масштаб увеличения $M = 7,5:1$. Затем частицы помещали в термостатированный сосуд с водой при температуре 70 °С, 80 °С, 90 °С. Через выбранные промежутки времени частицы оболочки извлекали из сосуда, убирали фильтровальной бумагой поверхностную влагу и фотографировали в том же фиксированном положении и с тем же увеличением. Кинетику набухания исследовали по полученным отпечаткам (рис. 3). В качестве определяющего параметра выбрали площадь поверхности изображения частиц на отпечатках. Площадь измеряли следующим образом. На прозрачную бумагу (целлофан) наносили масштабную сетку с ценой деления 5 мм, потом накладывали ее на полученные отпечатки и путем подсчета количества полных и неполных клеток на отпечатках получали площадь в условных квадратных единицах по формулам:

$$S_n = m_n + n_n / 2, \quad (13)$$

$$S_c = m_c + n_c / 2, \quad (14)$$

где S_n и S_c - площади набухшей и сухой частицы, соответственно, ед²; m_n и m_c - число полных клеток в набухшей и сухой частице, ед², соответственно; n_n и n_c - число неполных клеток в набухшей и сухой частице, ед², соответственно.

Площадь изображения частицы до набухания S_c принимали за единицу.

Тогда:

$$K_p = \frac{(S_n - S_c) + S_c}{S_c}, \quad (15)$$

где K_p - коэффициент, характеризующий относительное изменение площади отпечатков.

Учитывая ранее принятое предположение об изотропности структуры частицы оболочки какао, т.е. равенстве сил набухания по всем направлениям, имеем:

$$K_p = \frac{R_n}{R_c} \text{ или } R_n = K_p R_c, \quad (16)$$

где R_n - эквивалентный радиус (половина толщины пластины) оболочки какао после набухания; R_c - эквивалентный радиус оболочки какао до набухания.

Результаты проведенных исследований в виде графического их изображения показаны на рис. 3. Характер кривых набухания оболочки какао очень своеобразен, причем это особенно заметно при 80 °C и 90 °C. При 70 °C интенсивное увеличение размеров частиц происходит в первые 20 минут процесса. Разрушенный маслянистый покров дает возможность оболочке впитывать влагу, насыщая поры, тем самым, увеличивая свои размеры до определенных пределов, совпадающих по времени с предельным насыщением частиц влагой. Совершенно другая картина набухания оболочки видна при 80 °C и 90 °C. Здесь интенсивное набухание происходит первые 10 и 5 минут процесса, соответственно, для 80 °C и 90 °C, причем максимальная величина частиц с ростом температуры уменьшается. Затем происходит обратный процесс – сжатие частицы, причем при более высокой температуре оно интенсивнее, при 90 °C за 10 минут частица теряет 20 % своего объема, при сохраняющемся росте поглощения жидкости. При 80 °C это сжатие растягивается на 20 минут при потере 14 % объема набухшей частицы.

Этот феномен можно объяснить разрушением пор и внутренних перегородок под действием температуры и напора экстрагента, заменой целевого компонента в материале в ходе процесса экстрагентом и, как следствие, потеря упругости каркаса частицы.

Учитывая данное явление, провели аппроксимационную обработку экспериментальных данных методом наименьших квадратов с помощью стандартных программ на ЭВМ. Были получены следующие зависимости коэффици-

циента набухания оболочки какао от времени процесса:

для температуры 70 °C:

$$K_{p_0} = 0,70277 \tau_i^{0,1167}, \quad (17)$$

для температуры 80 °C, до 10 минут процесса:

$$K_{p_0} = 0,7382 \tau_i^{0,1287}, \quad (18)$$

после 10 минут:

$$K_{p_0} = 3,74078 \tau_i^{-0,12949}, \quad (19)$$

для температуры 90 °C, до 2,5 минут процесса:

$$K_{p_0} = \tau_i / (2,6042 + 0,6052 \cdot \tau_i), \quad (20)$$

после 2,5 минут:

$$K_{p_0} = \tau_i / (-28,7035 + 0,7896 \cdot \tau_i), \quad (21)$$

где K_{p_0} - коэффициент набухания кофейной оболочки; τ_i - время процесса набухания, с.

На рис. 4 показаны кривые набухания частиц измельченного какао при поглощении жидкости с температурой 70 °C, 80 °C, 90 °C. Характер кривых позволяет разделить процесс на два этапа. Первый этап – интенсивное увеличение размеров частицы измельченного какао первые 30 минут, второй этап – относительная стабилизация размеров частицы, вызванная заполнением всех пор жидкостью. Данные зависимости также были аппроксимированы методом наименьших квадратов, в результате получены следующие равенства:

для температуры 70 °C:

$$K_{p_k} = 0,8812 \tau_i^{0,03352}, \quad (22)$$

для температуры 80 °C:

$$K_{p_k} = 0,88801 \tau_i^{0,03256}, \quad (23)$$

для температуры 90 °C:

$$K_{p_k} = 0,8948 \tau_i^{0,03299}, \quad (24)$$

где K_{p_k} - коэффициент набухания частиц измельченного какао; τ_i - текущее время процесса, с.

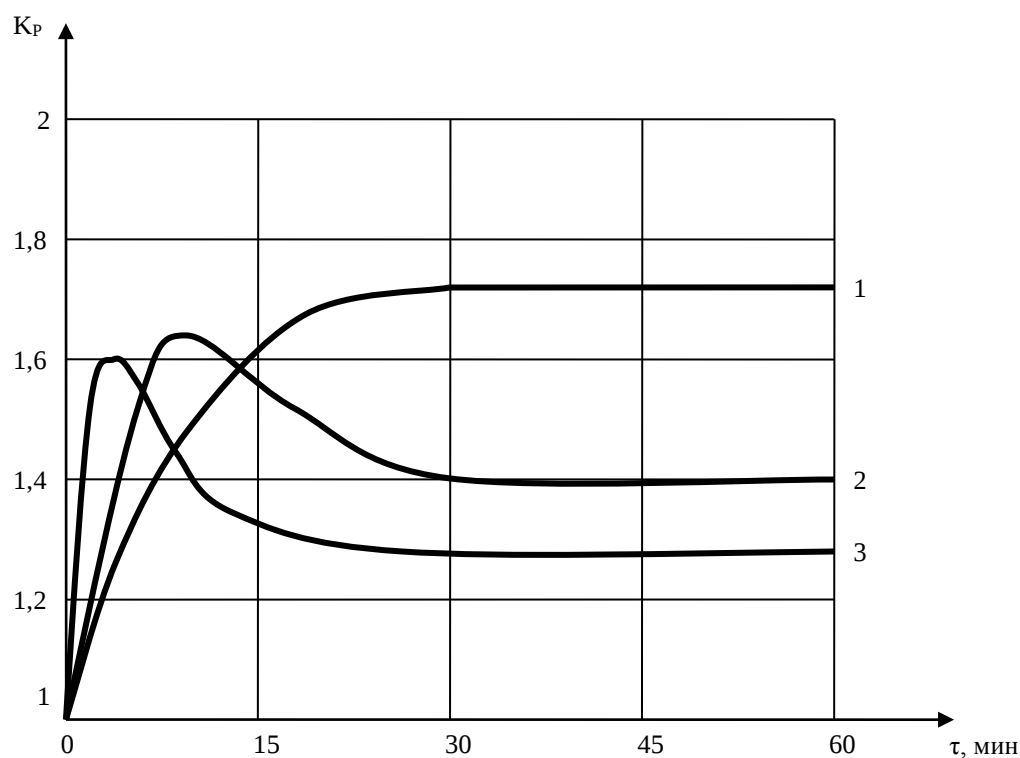


Рис. 3. Кинетические кривые набухания оболочки какао при поглощении жидкости: 1- $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 - $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 - $t = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

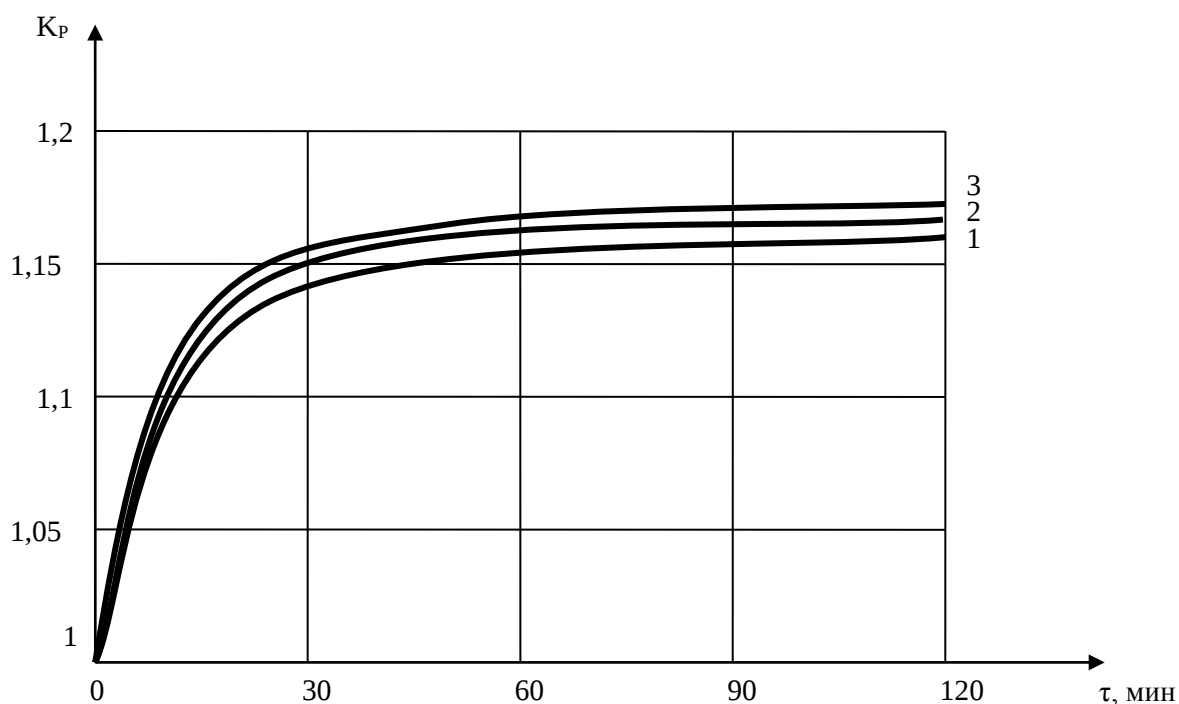


Рис. 4. Кинетические кривые набухания измельчённого какао при поглощении жидкости: 1- $t = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 - $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 - $t = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В предложенном интервальном методе расчета коэффициента диффузии выражения (17) – (24) применяются в случае проведения экстрагирования с использованием отдельно

оболочки какао, либо отдельно измельчённого какао. Совместное проведение же процесса экстрагирования предполагает определение общего коэффициента набухания. В работе [2]

смесь измельчённого какао и какао-веллы предлагалось моделировать единой формой тела, в качестве которой была выбрана форма шара со своим эквивалентным радиусом. Таким образом, для такого эквивалентного радиуса эквивалентный коэффициент набухания будет выражаться следующим образом:

$$K_{p_{эк}} = \frac{y}{100} \cdot K_{p_0} + \frac{100-y}{100} K_{p_k}, \quad (25),$$

где y - содержание кофейной оболочки в смеси, %; $K_{p_{эк}}$ эквивалентный коэффициент набухания. Выражения (17) – (25) могут практически использованы при решении задач с помощью математической модели. Данная авторская математическая модель универсальна, применима для любых соответственным образом обработанных смесей измельчённых растительных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1 Аксельруд, Г. А. Введение в капиллярнохимическую топологию [Текст] / Г. А. Аксельгурд, М. А. Альтшулер. – М.: Химия, 1983. – 263 с.

2 Быков, С. А. Исследование диффузионных и массообменных свойств смесей измельчённых растительных материалов [Текст]: монография / С. А. Быков. – Елец: ЕГУ им. И. А. Бунина, 2010. – 196 с.

3 Быков, С. А. Исследование гидродинамических характеристик процесса экстрагирования смесей измельчённых растительных материалов [Текст]: монография / С. А. Быков. – Елец: ЕГУ им. И. А. Бунина, 2008. – 134 с.

REFERENCES

1 Akselrud, G. A. Introduction to capillary-chemical topology [Text] / G. A. Akselgurd, M. A. Altschuler. – M.: Chemistry, 1983. – 263 p.

2 Bykov, S. A. Studies of diffusion and mass transfer properties of mixtures of shredded the plant material [Text]: monograph / S. A. Bykov. - Elets: ESU named after I. A. Bunin, 2010. – 196 p.

3 Bykov, S. A. Investigation of hydrodynamic characteristics of the extraction process mixes shredded plant material [Text]: monograph / S. A. Bykov. – Elets: ESU named after I. A. Bunin, 2008. – 134 p.