

УДК 663.813:663.255.6

DOI: 10.46548/21vek-2021-1054-0027

РАСЧЕТ МЕМБРАННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ МИКРОФИЛЬТРАЦИИ ОВОЩНЫХ СОКОВ

©2021

Кувшинова Ольга Александровна, кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции

Кувшинов Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры мобильных энергетических
средств и сельскохозяйственных машин имени профессора А.И. Лещанкина

Носков Евгений Вадимович, магистрант
кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции

Зайцев Вячеслав Олегович, магистрант
кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва
(430005, Россия, г. Саранск, ул. Большевикская, 68, e-mails: olga-kuvshinova@rambler.ru)*

Аннотация. В данной работе представлена методика и результаты расчета микрофильтрационной установки с керамическими мембранными элементами на этапе очистки тыквенного сока. Объектом исследования является тыквенный сок с мякотью, изготовленный по классической технологии в лабораторных условиях. Овощные соки являются ценнейшими источниками легкоусвояемой клетчатки, пектиновых и минеральных веществ. Тыква имеет уникальный биохимический состав, богата β-кератином и калием и рекомендуется при различных заболеваниях желудочно-кишечного тракта. Следовательно, сок и сокодержащие напитки на основе тыквы служат богатым источником различных витаминов, минералов и антиоксидантов. Актуальной является разработка безотходного и энергосберегающего технологического процесса производства овощных и фруктовых соков с повышенной полезностью для здоровья. Применение мембранных технологий имеет многие преимущества по сравнению с традиционными процессами. Микрофильтрация относится к области мембранной техники и представляет собой фильтрацию через селективно-проницаемые элементы. Необходимо периодически останавливать процесс фильтрации для проведения трудоемкой очистки мембранного канала от загрязнений химическим или механическим путем. Установлено, что наиболее эффективным является принцип поддержания минимальной толщины осадка за счет организации вдоль поверхности фильтрации турбулентного циркуляционного движения концентрируемой фазы. Высокая скорость поперечного потока снижает постоянную фильтрации, что указывает на более медленную скорость загрязнения мембраны. Кроме того, был проведен анализ поверхности и размера частиц для подтверждения результатов моделирования. Рекомендовано перед микрофильтрацией проводить предварительную ферментацию напитка для разрушения коллоидной системы и образования дисперсной фазы. Основными задачами при проектировании мембранных установок указанного назначения являются расчет площади фильтрации, подбор типа мембран в зависимости от состава исходного сырья и требований к осветленному соку, а также определение оптимальных режимов движения пермеата и ретентата в мембранном модуле.

Ключевые слова: мембранная технология, микрофильтрация, методика, овощные соки, секционирование, проектирование.

**CALCULATION OF THE MEMBRANE APPARATUS FOR MICROFILTRATION
OF VEGETABLE JUICES**

©2021

Kuvshinova Olga Aleksandrovna, cand.sci., associate professor, associate professor
of the Department of Mechanization of Agricultural Products Processing

Kuvshinov Aleksey Nikolaevich, cand.sci., associate Professor of the Department of Mobile Energy Means and
Agricultural Machines named after prof. A.I. Leshchankin

Noskov Evgeniy Vadimovich, undergraduate
of the Department of Mechanization of Agricultural Products Processing

Zaitsev Vaycheslav Olegovich, undergraduate
of the Department of Mechanization of Agricultural Products Processing

Mordovia State University named after N.P. Ogareva
(68, Bolshevitskaya, Saransk, 430005, Russia, phone: +7 (8342) 25-40-89

Abstract. This paper presents the method and results of calculating a microfiltration unit with ceramic membrane elements at the stage of pumpkin juice clarification. The object of the study is pumpkin juice with pulp, made according to the classical technology in the laboratory. Vegetable juices are the most valuable sources of easily digestible fiber, pectin and minerals. Pumpkin has a unique biochemical composition, is rich in beta-keratin and potassium and is recommended for various diseases of the gastrointestinal tract. Consequently, pumpkin-based juice and juice drinks are a rich source of various vitamins, minerals, and antioxidants. The development of a waste-free and energy-saving technological process for the production of vegetable and fruit juices with increased health benefits is relevant. The use of membrane

technologies has many advantages over traditional processes. Microfiltration refers to the field of membrane technology and is filtration through selectively permeable elements. It is necessary to periodically stop the filtration process to perform time-consuming cleaning of the membrane channel from contamination by chemical or mechanical means. It is established that the most effective principle is to maintain the minimum thickness of the sediment by organizing the turbulent circulation movement of the concentrated phase along the filtration surface. A high cross-flow rate reduces the filtration constant, indicating a slower rate of membrane contamination. In addition, a surface and particle size analysis was performed to confirm the simulation results. It is recommended to pre-ferment the drink before microfiltration to destroy the colloidal system and form a dispersed phase. The main tasks in the design of membrane installations for this purpose are the calculation of the filtration area, the selection of the type of membranes depending on the composition of the feedstock and the requirements for clarified juice, as well as the determination of the optimal modes of movement of permeate and retentate in the membrane module.

Keywords: membrane technology, microfiltration, technique, vegetable juices, sectioning, design.

Введение. В настоящее время высок спрос населения на употребление овощей и плодов и продуктов их переработки (соки, сокосодержащие напитки). Большое влияние на качество выпускаемых напитков, их питательные и органолептические свойства оказывают выбор исходного сырья, сорта и степени зрелости, а также способ переработки [1-4]. В области пищевой промышленности стоит задача разработки технологий, сохраняющих специфические свойства исходного сырья, его цвет, аромат, вкус и пищевую ценность. Необходимо учитывать требования безопасности для здоровья, удобство составления рецептур и применения продукции, безотходность технологии и стабильность напитков при хранении [5-7].

Традиционные способы получения овощных соков включают несколько периодических операций, достаточно трудоемких и долгосрочных. Альтернативой являются мембранные технологии, в частности микрофильтрация, преимущества которых обусловлены экономичностью, низкими энергозатратами и количеством отходов, повышением качества продукции и упрощением технологического процесса [8-10].

Микрофильтрация заменяет операции осветления и стерилизации, разделяя сок на концентрированную пульпу из волокон и прозрачную фракцию, в которых отсутствуют микроорганизмы порчи. Применение керамических мембран предпочтительно, так как они более стойки к химическому разложению, имеют более долгий срок службы, но хрупки и чувствительны к температурным колебаниям [11-14]. Засорение мембран – комплексное явление и зависит от накопления присутствующих в соке коллоидных частиц на поверхности мембраны в виде осадка, а также от типа закупоривания пор мембраны [15-16]. Большое влияние на процесс фильтрации оказывают технологические параметры – температура, расход, давление и концентрация подаваемого раствора, конструктивные особенности оборудования.

Чаще всего при осветлении соков микро- и ультрафильтрацию используют: в периодическом режиме для концентрирования; в режиме продувки и подпитки и в режиме диафильтрации [17-18]. Во многих овощных соках низкое содержание удерживаемых сухих веществ, поэтому оптимальным рабочим режимом является модифицированный турбулентный режим циркуляции с целью поддержания минимальной

толщины осадка.

В данной работе предложена методика расчета микрофильтрационного блока с непрерывным режимом осветления тыквенного сока после стадии его предварительной ферментации. Этап очистки необходим для улучшения органолептических и микробиологических показателей напитка.

Материалы и результаты исследований. Методика расчета состоит из следующих стадий.

1. *Расчет материальных потоков.* Для создания высокой скорости потока в мембранном канале мембранного модуля (рис.1), снижающей скорость отложения осадка на поверхности мембраны, в технологическую схему введен циркуляционный насос высокой производительности сравнительно небольшого напора. Перед входом в аппарат к потоку G_0 исходного сырья с массовой долей дисперсной фазы C_0 добавляется циркулирующий поток ретентата (концентрата) с расходом G_R и массовой долей дисперсной фазы C_R .

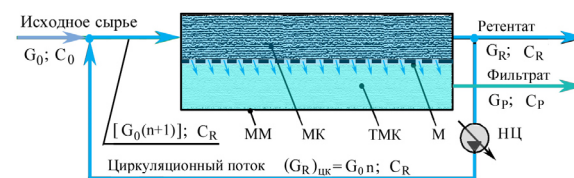


Рисунок 1 – Схема материальных потоков при микрофильтрации

МК – мембранный канал; ММ – мембранный модуль; М – мембрана; НЦ – циркуляционный насос; n – кратность циркуляции; C_0 , C_R , C_P – массовые доли дисперсной фазы исходного сырья, ретентата и фильтрата; G_0 , G_R , G_P – расход исходного сырья, ретентата и фильтрата;

ТМК – трансмембранный канал

Смешавшись, входной поток $G_0(n + 1)$ поступает в мембранный модуль, в котором концентрируется с C_0 до C_R . Поток фильтрата поступает в трансмембранный канал ($C_P = 0$). Циркуляционный контур работает в режиме аппарата идеального смешения (при $n > 10$), следовательно, концентрация в любой точке мембранного канала будет равна C_R .

Уравнения материального баланса в соответствии со схемой материальных потоков в модуле представляются следующим образом [19]:

$$\begin{aligned} & \text{— баланс массовых потоков} \\ & G_0 = G_R + G_P; \end{aligned} \quad (1)$$

– баланс взвешенных веществ

$$G_0 \cdot C_0 = G_R \cdot C_R + C_P \cdot C_P; \quad (2)$$

– массовый поток ретентата (концентрата)

$$G_R = G_0 \frac{C_0 - C_P}{C_R - C_P}; \quad (3)$$

– массовый поток фильтрата

$$G_P = G_0 \frac{C_R - C_0}{C_R - C_P}; \quad (4)$$

– содержание взвешенных веществ (дисперсной фазы) в ретентате

$$C_R = \frac{G_0 \cdot C_0 - G_P \cdot C_P}{G_R} = \frac{G_0}{G_0 - G_P} C_0. \quad (5)$$

Из опыта эксплуатации мембранных установок с керамическими мембранными элементами известно [5], что среднюю скорость \bar{w}_R потока ретентата в мембранном канале задают не менее 5 м/с. Турбулентный режим движения ретентата при этом способствует минимизации отложений на поверхности мембраны.

2. Исследование реологических характеристик продукта и подбор реологического уравнения. Наиболее распространенным уравнением, используемым для описания реологических свойств псевдопластических сред, является уравнение Оствальда-де-Вилля. Установлено, что реологическое поведение дисперсионной фазы овощного сока (на примере тыквенного) может быть описано следующим образом [20]:

$$\tau = k_0 k_T (d\gamma / dt)^{n-1} = k_0 k_T \dot{\gamma}^{n-1}, \quad (6)$$

где τ – касательное напряжение, Па; $d\gamma/dt$ – скорость сдвига, с⁻¹; k_0 – коэффициент консистенции при температуре приведения $T_0 = 25^\circ\text{C}$; n – индекс течения, $kT = \exp[E(x)(T^1 - T^{10})/R]$ – коэффициент, отражающий влияние температуры на значение вязкости (коэффициента консистенции); $E(x)$ – зависимость энергии активации вязкого течения от концентрации растворенных веществ.

3. Определение функции и параметров распределения размеров частиц дисперсной фазы. Данный этап необходим для выбора типоразмера мембран и применения в математической модели процесса мембранной фильтрации. Параметры определяются на лазерном анализаторе ЛАСКА [21] и обрабатываются автоматически.

4. Расчет гидродинамического сопротивления мембранного канала.

4.1 Определение плотности сока и суспензии.

4.2 Расчет объемной доли дисперсной фазы в ретентате.

$$\varphi_f = \frac{V_{\Delta\phi}}{V_{\Delta\phi} + V_{ж}}. \quad (7)$$

4.3 Гидродинамическое сопротивление мембранного канала длиной l :

$$\Delta p_R = \psi l. \quad (8)$$

Гидродинамическое сопротивление находят численным методом с помощью программного комплекса SolidWorks и его расчетного модуля COSMOSFloWorks.

5. Определение удельного сопротивления осадка в канале. При расчете исходим из допущения, что толщина осадка в условиях турбулентного режима течения ретентата соответствует толщине пограничного

слоя.

Ввиду очевидной сжимаемости частиц дисперсной фазы, сопротивление осадка должно зависеть от давления фильтрования. По результатам известных исследований данного эффекта [22] можно предположить, что искомая зависимость описывается уравнением вида:

$$\rho = \rho_0 + k_p [p_R(z) - p_P]^m, \quad (9)$$

где $p_R(z)$ – давление ретентата в мембранном канале, Па; p_P – давление пермеата в трансмембранном канале, Па; k_p (м¹·Па^{-m}) и m – экспериментальные коэффициенты; ρ_0 – удельное сопротивление осадка в отсутствие давления, м².

Ввиду отсутствия данных о сжимаемости дисперсной фазы яблочного сока будем исходить из того, что при отложении на поверхности мембраны частиц дисперсной фазы под действием напряжений сдвига и разности давлений мембранного и трансмембранного каналов формируется наиболее плотная (гексагональная) структура. При сферической форме частиц и равенстве их диаметров для вычисления удельного гидравлического сопротивления осадка в условиях ламинарного режима фильтрования ($Re < 1$) может быть использована формула Эргана в следующем виде:

$$\rho_0 = 150 \frac{\varphi_p^2}{(1 - \varphi_{kp})^3 d_q^2}, \quad (10)$$

где d_q – значение наиболее вероятного размера частиц осадка, м.

6. Определение коэффициента суммарной проницаемости мембраны и осадка. Согласно основному уравнению фильтрации:

$$k_I = \frac{1}{\bar{\eta}_3 (R_m + \rho_0 \delta_z)} = \frac{k_T^{-1}}{(k_m^{-1} + \bar{\eta}_3 \rho_0 \delta_z)}, \quad (11)$$

где $R_m = k_T / (\eta_3 \cdot k_m)$ – коэффициент гидравлического сопротивления мембранного элемента; k_m – паспортная характеристика проницаемости мембранного элемента.

Среднее значение эффективной вязкости при течи пермеата в каналах, образованных осадком:

$$\bar{\eta}_3 = \bar{w}_P (d_3)_{oc} \rho_{ж} / (Re_P)_{np} \quad (12)$$

При этом скорость потока рассчитывается по формуле:

$$\bar{w}_P = k_I \Delta \bar{p}_\phi. \quad (13)$$

При среднем перепаде давлений в мембранном и трансмембранном каналах $\Delta \bar{p}_\phi = 0,5[(p_R)_{ex} + (p_R)_{вых}] - p_P$ число Рейнольдса для пермеата, имеющего псевдопластичное поведение:

$$(Re_P)_{np} = \frac{2^{3-n} \cdot \bar{w}_P^{2-n} (d_3)_{oc}^n \rho_{ж}}{k_T k_0 (3 + 1/n)^n} < Re_{kp} = 1. \quad (14)$$

Интенсивность фильтрации на один мембранный элемент:

$$I_P = k_I S_0 \quad (15)$$

где S_0 – площадь фильтрации, м².

7. Определение суммарной производительности модулей (рис. 2). Для потока пермеата, поступающего в трансмембранные каналы, при наличии градиента давлений в мембранном канале справедливо (рис. 1):

$$Q_P = \pi d_3 n_k m_3 k_I \int_0^z [\Delta p_{ex} - \psi z] dz = \pi d_3 n_k m_3 k_I z (\Delta p_{ex} - 0,5 \psi z), \quad (16)$$

где $\Delta p_{ex} = [(\rho_R)_{ex} - \rho_p]$ – трансмембранная разность давлений (движущая сила процесса) на входе в мембранный канал, Па; $p_p = const$ – избыточное давление пермеата в трансмембранном канале, Па; z – число каналов керамического мембранного элемента; m_3 – число керамических элементов в мембранном модуле.

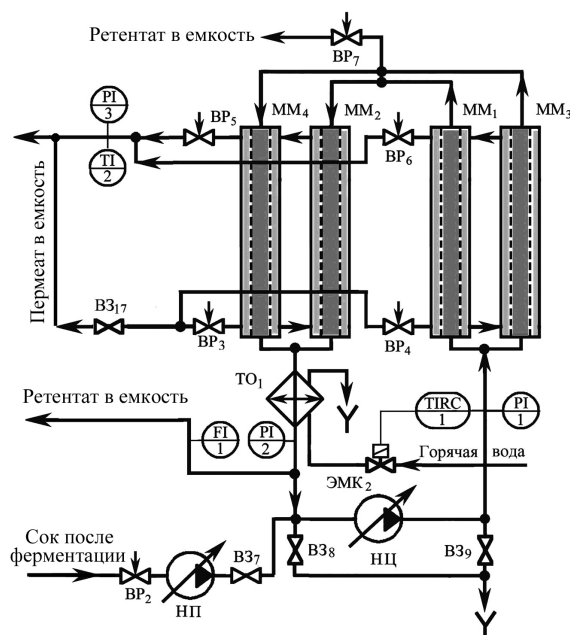


Рисунок 2 – Принципиальная схема микрофилтративного блока установки для осветления сока

ММ1...4 – модули мембранные; НП – питающий насос;
ТО1 – теплообменник; ЦН – циркуляционный насос;
ЭМК2 – клапан электромагнитный;
BP – регулирующие вентили; B3 – запорные вентили;
PI1...3 – датчики давления; TI2 – датчик температуры;
TIRC1 – регулятор температуры

8. *Расчет потерь давления в трубопроводах.* Площадь сечения труб, соединяющих модули ММ₁, ММ₂ и ММ₃, ММ₄, принимается не меньше суммарной площади мембранных каналов каждого модуля.

Потери давления в каждом трубопроводе, соединяющем попарно мембранные модули, определяются по известной формуле [23]:

$$\Delta p_{mp}^{(1)} = 0,5 \bar{w}_R^2 \rho_{жс} (\lambda L / d + \sum \zeta_i), \quad (17)$$

где \bar{w}_R – принятое значение среднерасходовой скорости ретентата в контуре; $d=0,04$ м – принятый внутренний диаметр соединительного трубопровода (труба 45 х 2,5 X18H10T ГОСТ 8734–75); λ – коэффициент гидравлического сопротивления; ρ_c – плотность ретентата; $L=1$ м – принятая длина трубопровода; $\sum \zeta_i$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений в трубопроводе по принципиальной схеме установки.

Избыточное давление ретентата на входе и выходе мембранных модулей ММ₂ и ММ₄:

$$(\rho_R)_{ex}^{2-4} = (\rho_R)_{ex} - \psi l - \Delta p_{mp}^{(1)}; (\rho_R)_{ex}^{2-4} = (\rho_R)_{ex}^{2-4} - \psi l. \quad (18)$$

9. *Выбор циркуляционного насоса.* Циркуляцион-

ный насос выбирается после расчета полных потерь давления $\Delta p_{цк}$ в циркуляционном контуре и избыточного давления $\rho_{ик}$ на входе в циркуляционный насос.

$$\Delta p_{цк} = 2\Delta p_R + \Delta p_{mp}^{(1)} + \Delta p_{mp}^{(2)} + \Delta p_{mp}^{(3)} + \frac{\rho_c \bar{w}^2}{2}; \quad (19)$$

$$\rho_{ик} = (\rho_R)_{вых}^{2-4} - \Delta p_{mp}^{(2)}$$

10. *Расчет потоков ретентата и пермеата.* Объемная и массовая производительность установки по пермеату (осветленному соку) для четырех мембранных модулей (см. рис. 2):

$$Q_P = (Q_P)^{1-3} + (Q_P)^{2-4}; \quad G_P = \rho_{жс} Q_P. \quad (20)$$

Производительность мембранного блока по тыквенной суспензии, подаваемой на микрофилльтрацию, находится по формуле (4) при $C_p=0$:

$$G_0 = G_P \frac{C_R}{C_R - C_0} \quad (21)$$

Кратность циркуляции тыквенной суспензии в контуре:

$$n = (Q_R)_{цк} / Q_0 - 1. \quad (22)$$

Производительность мембранного блока по ретентату – отходу производства рассчитывается из формулы (1). Подающий насос подбирается исходя из величины потока овощной суспензии $Q_0 = G_0 / \rho_{жс}$.

Расчет микрофилтративного блока приведен для следующих параметров: длина мембранного элемента $l = 1178$ мм, диаметр $d_3 = 6$ мм, площадь филльтрации $S_0 = 0,2$ м² и его селективность 500 kD.

Экспериментально установлено, что в тыквенном соке массовая доля растворенных веществ составляет $x = 9,2\%$, а массовая доля дисперсной фазы после ферментного разрушения осадка – $C_0 = 0,5...0,7\%$ с вероятным размером $d_q = 2 \cdot 10^{-6}$ м. При массовой доле дисперсной фазы в ядре потока ретентата $C_R = 0,2$ получены следующие значения: $\rho_{жс} = 1040$ кг/м³; $\rho_c = 1098$ кг/м³; $V_{off} = 0,163$ м³; $\varphi_f = 0,163$. Поправочные коэффициенты для температуры филльтрации $T = 313$ К составляют: $k_D = 1,7$; $k_T = 0,72$ и $E(x) = 16730$ Дж/моль. Значение циркулирующего потока ретентата для одного канала составляет $(Q_R)_{цк} = 1,41 \cdot 10^{-4}$ м³/с. Градиент давлений в мембранном канале равен $\psi = 112$ кПа/м, а гидродинамическое сопротивление мембранного канала $\Delta p_R = 132$ кПа.

Исходя из наиболее вероятного размера частиц осадка сока после ферментации $d_q = 2 \cdot 10^{-6}$ м, получены следующие результаты: толщина пограничного слоя $\delta_z = 80 \cdot 10^{-6}$ м; эквивалентный диаметр каналов, образованных частицами в слое осадка, $(d_3)_{oc} = 4,68 \cdot 10^{-7}$ м; коэффициент суммарной проницаемости мембраны и осадка $k_l = 2,1 \cdot 10^{-9}$ (м/с)/(Па) ≈ 760 л/ч/(м²·бар). При общей площади филльтрации восьмиканального мембранного элемента $S_0 = 0,2$ м² интенсивность филльтрации на один элемент составит $I_p = 152$ (л/ч)/бар. Скорости потока $\bar{w}_P = 4,65 \cdot 10^{-4}$ м/с отвечает значение

$(Re_R)_{np} = 1,57 \cdot 10^4$, что подтверждает правомерность использования формулы Эргана [24]. При этом среднее значение эффективной вязкости фильтрата составляет $\bar{\eta}_c = 1,44 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

С целью минимизации толщины осадка на фильтрующих поверхностях элементов трансмембранная разность давлений принята из условия $\Delta p_{\text{ак}} \leq 200$ кПа, тогда избыточное давление ретентата на входе в мембранные модули составит $(p_R)^{1-3}_{\text{ак}} = 400$ кПа при избыточном давлении пермеата в трансмембранном канале $p_p \geq 200$ кПа. Принято к установке в мембранные модули MM_1 и MM_3 по пять керамических восьмиканальных элемента, тогда при $z=l=1,178$ м имеем для суммарной производительности указанных модулей по пермеату $(Q_p)^{1-3} \approx 1800$ л/ч.

Потеря давления на участке трубопровода, соединяющем циркуляционный насос с мембранными модулями MM_2 и MM_4 , составляет $\Delta p_{mp}^{(2)} \approx 112$ кПа, а в трубопроводе, соединяющем циркуляционный насос с мембранными модулями MM_1 и MM_3 , $\Delta p_{mp}^{(3)} \approx 48,6$ кПа. Избыточное давление $(p_R)^{1-3}_{\text{ак}}$ на входе в мембранные модули MM_1 и MM_3 должно составлять не менее 408 кПа. Мощность, потребляемая электродвигателем насоса НЦ, составляет 7,6 кВт.

Производительность микрофилтрационного блока по пермеату (осветленному соку) составляет $Q_p \approx 3600$ л/ч ($G_p = 3744$ кг/ч), исходной тыквенной суспензии – $G_0 = 3860$ кг/ч; ретентату (отходу производства) – $G_R = 117$ кг/ч, что составляет около 3,2% от количества осветленного сока. Величина циркуляционного потока ретентата для обеспечения указанной производительности должна быть не менее $(Q_{R\Sigma})_{\text{ук}} = 40600$ л/ч при кратности циркуляции $n=11,6$.

Закключение. Исходя из полученных результатов к установке в качестве циркуляционного насоса выбран центробежный насос марки *F 50/250 B* («Pedrollo» Италия) с подачей 50 м³/ч, напором 540 кПа, мощностью привода 15 кВт.

Исходя из требуемого значения фильтруемого потока тыквенной суспензии $Q_0 = 3,51$ м³/ч, в качестве питающего насоса выбран пищевой центробежный насос марки *HF 51 A* («Pedrollo» Италия) с подачей 8 м³/ч, напором 184 кПа, мощностью привода 0,72 кВт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Лукашук Ю.А. Технология и оценка качества тыквенного сока в зависимости от сорта // Студенческая наука – агропромышленному комплексу. Научные труды студентов Горского государственного аграрного университета. 2019. С. 54-56.
2. Кузибаева Ф.К., Николаенко С.Н. Технология и биохимический состав сокодержательных напитков на основе тыквы // Интеграционные взаимодействия молодых ученых в развитии аграрной науки. Материалы Национальной научно-практической конференции молодых ученых. В 3 томах. 2020. С. 134-138.
3. Лимарева Н.С., Донченко Л.В. Моделирование рецептур пектинодержательных напитков на основе тыквенного сока // Современная наука и инновации. 2015. № 4 (12). С. 50-56.
4. Лилишенцева А.Н. Критерии натуральности овощных соков // Техника и технология пищевых производств. 2017. № 4 (47). С. 123-129.
5. Бундаева М.А., Ошина Т.В., Водяков В.Н. Лабораторная обработка техпроцесса получения осветленного тыквенного сока // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. Межвузовский сборник научных трудов, посвященный 100-летию со дня рождения первого декана факультета механизации сельского хозяйства МГУ им. Н. П. Огарева доцента Д. С. Пилипко (1913 – 1989 гг.). Саранск, 2013. С. 159-164.
6. Нурымхан Г.Н., Акчина Г.А. Изучение использования тыквы при получении сокодержательного напитка // Современное состояние, перспективы развития молочного животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции. Материалы международной научно-практической конференции. Омский государственный аграрный университет им. П.А. Столыпина, Институт международного образования. 2016. С. 327-330.
7. Лимарева Н.С., Донченко Л.В., Касьянов Г.И. Исследование минерального состава пектино-содержащих напитков на основе тыквенного сока // Устойчивое развитие, экологически безопасные технологии и оборудование для переработки пищевого сельскохозяйственного сырья; импортозамещение. Сборник материалов международной научно-практической конференции. 2016. С. 174-177.
8. Полянский К.К., Титов С.А., Шахов С.В., Корышева Н.Н., Ключникова Д.В. Подготовка сырья для напитков на основе молочной сыворотки и яблочного сока с применением баромембранных технологий // Сыроделие и маслоделие. 2019. № 1. С. 43-45.
9. Подгорнова Н.М., Петров С.М. Применение керамических мембран при осветлении и пастеризации соков для детского питания // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. 2019. № 12. С. 199-203.
10. Кудряшов В.Л. Роль и эффективность мембранных процессов при модернизации пищевой промышленности // Пищевая промышленность. 2012. №10. С.14-18.
11. Emani S., Uppaluri R., Purkait M. K.. Preparation and characterization of low cost ceramic membranes for mosambi juice clarification // Desalination. V. 317. 2013. P. 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.02.024>
12. Lachowicz S., Oszmiański J., Kolniak-Ostek J., Stokłosa D. Effect of different sizes of ceramic membranes in the process of microfiltration on physicochemical parameters of chokeberry juice // European Food Research and Technology. 2019. V. 245. P. 1263–1275.
13. Sujoy Bose, Chandan Das. Role of Binder and Preparation Pressure in Tubular Ceramic Membrane Processing: Design and Optimization Study Using Response Surface Methodology (RSM) // Ind. Eng. Chem. Res. 2014. V. 53. T. 31, P. 12319–12329. <https://doi.org/10.1021/ie500792a>.
14. Guotong Qin, Xueqian Lu, Wei Wei, Jiajia Li, Ruyue Cui, Shixuan Hu. Microfiltration of kiwifruit juice and fouling mechanism using fly-ash-based ceramic membranes // Food and Bioproducts Processing. V. 96. October 2015. P. 278-284.
15. Alfredo Cassano, Giorgio De Luca, Carmela Conidi, Enrico Drioli. Effect of polyphenols-membrane interactions on the performance of membrane-based processes. A review // Coordination Chemistry Reviews. V. 351. 15 November 2017. P. 45-75.
16. Аверина Ю.М., Курбатов А.Ю., Сахаров Д.А., Субчева Е.Н. Разработка технологии получения нано-филтрационных керамических мембран // Стекло и керамика. 2020. № 3. С. 22-27.
17. Русанова Л.А., Тюплева Е.В. Исследование технологических факторов, влияющих на характеристики разделения мембран при осветлении соков // Сфера услуг: инновации и качество. 2014. № 20. С. 43-64.
18. Кузнецова Е.А. Получение ягодного сока функционального назначения с использованием мембранной технологии // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. 2016. № 4. С. 177-183.
19. Гришин С.С. К вопросу математического моделирования мембранных процессов фильтрования // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 10 (132). С. 57-60.
20. Шаповалов В.М. О применимости модели Оствальда-де-Вилля для решения прикладных задач // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90. № 5. С. 1275-1281.
21. Кувшинова О.А., Сардаева М.Н. Методика работы на

лазерном анализаторе «ЛАСКА-1К» // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. межвузовский сборник научных трудов. Саранск, 2016. С. 268-273.

22. Водяков В.Н., Кузнецов В.В., Кувшинова О.А., Паксеваткин Е.Н. Гидродинамическая модель нестационарного процесса проточной микрофльтрации соков // Хранение и переработка сельхозсырья. 2013. № 3. С. 8-11.

23. Водяков В.Н., Пяткин П.Н., Архипкина Ю.А. Гидродинамический анализ аксиального движения фаз геля и ретентата в мембранном канале // Повышение эффективности функционирования механических и энергетических систем: материалы Всерос. Науч.-тех. конф. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2009. С.365-371.

24. Самохвалов Н.М., Нестерова Т.Ю., Виноградов В.В. Гидравлическое сопротивление щелевой фильтрующей перегородки // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 10 (81). С. 235-239.

Статья поступила в редакцию 17.03.2021

Статья принята к публикации 16.06.2021