ИНЖЕНЕРНЫЕ АГРОПРОМЫШЛЕННЫЕ НАУКИ

DOI 10.35523/2307-5872-2022-39-2-86-91
УДК 637 1:66.067.38

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ МОЛОЧНОЙ СЫВОРОТКИ

Морозов И.В., ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА;
Осадчий Ю.П., ФГБОУ ВО Ивановский ГПУ;
Маркелов А.В., ФГБОУ ВО Ярославский ГТУ**;**
ОсадчийД.Ю., ФГБОУ ВО Ивановский ГЭУ

Анализ применения ультрафильтрации в молочной промышленности как у нас в стране, так и за рубежом, показывает, что с применением этого метода для разделения и концентрирования молочного сырья основное внимание уделяется переработке концентрата, а переработке ультрафильтрата должного внимания не уделяется. При переработке сельскохозяйственной продукции в настоящее время с целью достижения высокого качества продукции, увеличения эффективности производства и соблюдения экологических требований находят применение новые технологии. Среди них в молочной промышленности производство лактозы из сыворотки молока на основе мембранных процессов. Расширение области практического применения мембранных методов разделения многокомпонентных жидких смесей потребовало увеличить производительность установок, усложнить их схемы. Так применяются многоступенчатые установки, поскольку в некоторых случаях схема, состоящая из большего числа ступеней, особенно при установке на линии высокого давления, оказывается более рациональной. Методы расчета подобных систем достаточно сложны и находятся в стадии разработки. Разработка методов расчета мембранных процессов и аппаратов связана с механизмом процессов. При решении данной проблемы возможны различные подходы. Один из подходов состоит в том, чтобы на основании уравнений гидродинамики Навье − Стокса и массопереноса получить уравнения для определения основных технологических характеристик селективности f, проницаемости G и требуемой поверхности мембран S. Существует и иной подход к данной проблеме, сущность которого состоит в том, что данный процесс разбивают на отдельные стадии. Далее находят уравнения для определения скорости переноса на каждой стадии и по уравнению массопередачи рассчитывают необходимую поверхность мембраны.

***Ключевые слова**: молочная промышленность, производство лактозы, баромембранное разделение, жидкие многокомпонентные смеси, высокомолекулярные соединения, анизотропные полимерные мембраны, металлокерамические мембраны, селективность, проницаемость, интенсификация, комплексообразование, экология.*

***Для цитирования**: Морозов И.В., Осадчий Ю.П., Маркелов А.В., Осадчий Д.Ю. Эффективность применения ультрафильтрации молочной сыворотки // Аграрный вестник Верхневолжья. 2022. № 2 (39). С. 86−91.*

Введение. Анализ зарубежных и отечественных данных доказывает большую эффективность применения баромембранных процессов в молочной промышленности [1, с. 12; 2, с. 5-39]. Особенно такой метод, как ультрафильтрация молочной сыворотки, используется не в полной мере на предприятиях ЦФО России [3, с. 44-45; 4, с. 3-24]. Известны установки, работающие на фильтрующих элементах типа фильтр-пресс, состоящих из опорных пластин, на которые уложен дренажный материал и полупроницаемые мембраны [5,с. 942; 6, с. 13-17]. Применение трубчатых ке-

рамических фильтрующих элементов значительно повышает технико-экономические показатели процесса разделения [7, с. 12-35; 8, с. 8-26].

Цель и задачи. Предложены научно-обоснованные технические решения по повторному применению ультрафильтрата, который можно применять для различных целей. Без решения задач, связанных с использованием ультрафильтрата, широкое внедрение методов обработки молока и молочных продуктов невозможно.

Методы исследования. Сущность ультрафильтрации заключается в прохождении через керамические трубки с размером пор 0,05 мкм низкомолекулярной фракции, это вода, раствор лактозы, минеральные соли, а белковый концентрат можно выделить с содержанием сухих веществ до 15-45 %. Оба продукта являются более ценными, чем молочная сыворотка, из которой они выделены. Из белкового концентрата и ультрафильтрата (пермеата) получают пищевые добавки в мясные и хлебопекарные изделия, а лактозный раствор применяется для производства молочного сахара, спирта, различных напитков, кормового белка. Для разделения молочной сыворотки (МС) была разработана интегрированная схема установки, представленная на рисунке 1. Схема данной установки состоит из мембранного аппарата и устройства для применения промывки мембранных элементов для восстановления параметров трубчатых мембран.

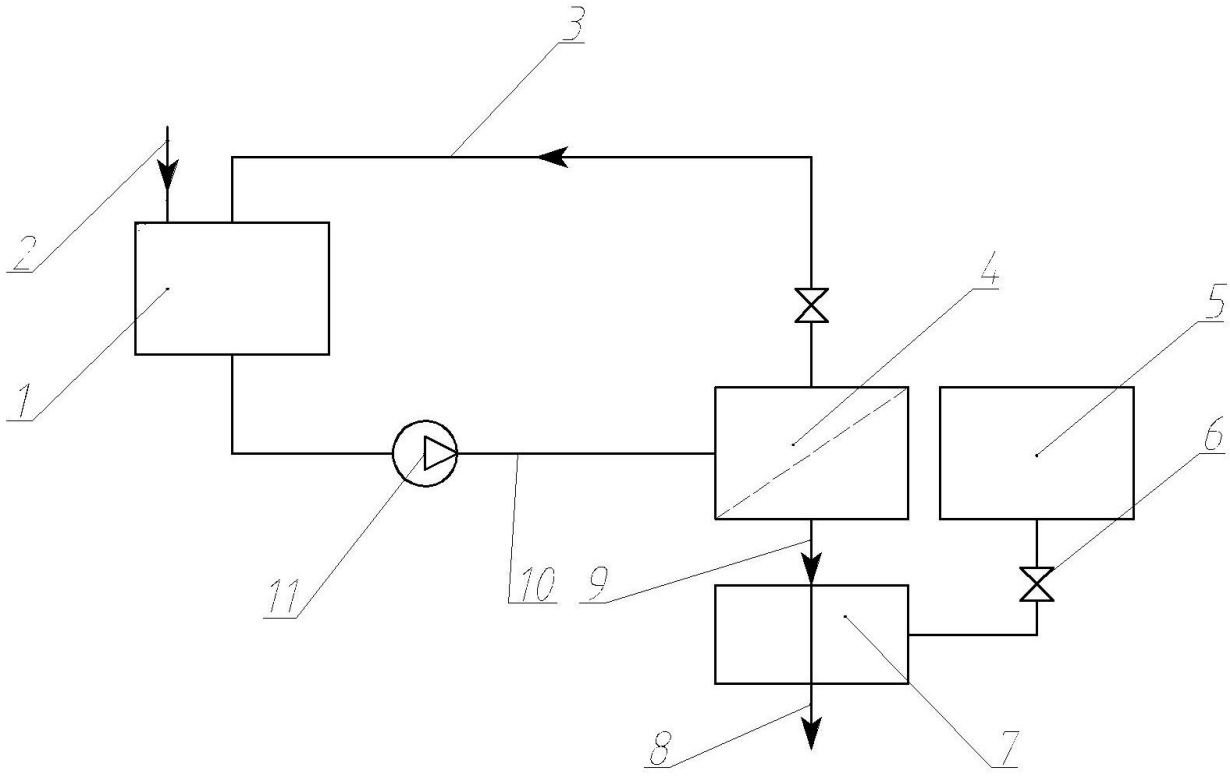

Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки ультрафильтрации многокомпонентных жидких смесей:

1–резервуар с исходной молочной сывороткой, 2–подача МС в резервуар 1 от действующей промышленной линии и получения белкового концентрата; 3–магистраль обратного потока пермеата; 4 –мембранный аппарат; 5–резервуар с для пермеата; 6–вентиль; 7–камера для добавки в раствор лактозы; 8–выход готового продукта; 9–выход пермеата (фильтрата); 10 –магистраль входящего потока МС на мембранный аппарат; 11–насос высокого давления.

Для процесса концентрирования и разделения МС при помощи метода ультрафильтрации с применением мембранных аппаратов характерны два случая зависимости проницаемости от времени [9, с. 33; 10, с. 214; 11, с.18-19]:

– проницаемость – это постоянная величина, по разделению растворов с низкими концентрациями высокомолекулярных соединений [12, с. 392; 13, с. 75; 14, с. 189];

– проницаемость снижается по мере концентрирования исходного раствора [15, с. 192; 16, с. 1515; 17, с. 38].

Концентрация растворов в неселективном потоке через мембрану становится равной концентрации в исходном растворе $x_{нi}$. Учитывая это, концентрацию пермеата определяют

$$x_{пi} = x_{нi} \cdot f_i \quad (1)$$

Долю потока, проходящего через неселективные поры мембраны f_i, определяют как

$$f_i = \frac{G_{исi}}{G_{общ}}, \quad (2)$$

где $G_{исi}$ проницаемость в неселективном потоке м^3/(м^2·с);

$G_{общ}$ общая проницаемость через мембрану, м^3/(м^2·с);

Селективность в данном случае определяют по формуле

$$\varphi_i = 1 - f_i. \quad (3)$$

При разделении многокомпонентной смеси соотношение компонентов в пермеате и концентрате определяется соотношением селективностей данной мембраны по отдельным компонентам [18, с. 29; 19, с. 31].

Материальный баланс данного процесса имеет следующее описание

$$-d(x_i \cdot V_\tau) = G_\tau \cdot x_i \cdot F \cdot (1 - \varphi_i) \cdot d\tau, \quad (4)$$

По формуле (1) возможно определение количества растворённого вещества, которое переносится через неселективную поверхность мембраны за время t. Иначе этот процесс может осуществляться вследствие изменения начального объёма и концентрации, поэтому его можно описать при помощи ряда уравнений:

$$V_\tau \cdot dx_i + x_i \cdot dV_\tau = -G_\tau \cdot x_i \cdot F \cdot (1 - \varphi_i) \cdot d\tau, \quad (5)$$

$$\frac{dx_i}{x_i} + \frac{dV_\tau}{V \cdot \tau} = -\frac{G_\tau}{V\tau} \cdot F \cdot (1 - \varphi_i) \cdot d\tau, \quad (6)$$

$$d(\ln x_i) = \frac{G_\tau \cdot F}{V_\tau} \cdot (1 - \varphi_i) \cdot d\tau - d(\ln V_\tau). \quad (7)$$

Формула для определения объёма разделяемого раствора в данный момент времени имеет вид

$$V_\tau = V_н - G_\tau \cdot F \cdot \tau. \quad (8)$$

После преобразований выражений (5-8) представляется возможным определение продолжительности достижения заданной степени разделения и состав разделяемых компонентов в ретантате (концентрате) в зависимости от времени t, а также концентрацию пермеата, полученного в конце работы системы [18, с.142]. Данные параметры математически имеют вид

$$\tau = \left[1 - \left(\frac{x_{ні}}{x_{кі}}\right)^{\frac{1}{\varphi_i}}\right] = \frac{V_н}{G_н \cdot F}, \quad (9)$$

$$x_{кі} = \frac{x_{ні}}{\left(1 - \frac{G_н F \cdot \tau}{V_н}\right)^{\varphi_i}}, \quad (10)$$

$$x_{пі} = \frac{x_{ні} \cdot V_к}{V_п}. \quad (11)$$

Таким образом, был рассмотрен процесс ультрафильтрации периодического типа при одном из условий, о котором было сказано выше.

Число ступеней, которых необходимо использовать для получения заданной степени разделения при использовании схемы установки с последовательным использованием трубчатых аппаратов, проводят по уравнениям [7, с. 221-223]

$$k_i^n = \frac{(1-\varphi_i)^n}{(1-\varphi_N)^n}; \quad (12)$$

$$k_i^{общ} = \prod_{n=1}^{N_s} k_i^n; \quad (13)$$

$$N_s = \ln(k_i^{общ})^{\frac{1}{\ln k_i}}, \quad (14)$$

На экспериментальном заводе во Владимире организовано серийное производство ультрафильтрационных мембран марки УКМ-450С для обработки молочной сыворотки. Они могут работать при pH 3-11 и температуре до 110°С. Срок эксплуатации при давлении 0,5-0,8 МПа и скорости потока над мембраной до 5 м/с составляет 5 лет. При эксплуатации установки необходимо обеспечить плавные пуск и выключение, чтобы избежать гидравлических ударов. Конструкция модуля должна быть такой, чтобы достигать максимальной производительности мембран, которые соответствуют лучшим зарубежным образцам, быстрой разборке и сборке с целью замены керамических трубок. Содержание сухих веществ в белковом концентрате измерялось в потоке рефрактометром А3-ЕДР. Регенерация мембран осуществлялась обратной промывкой лактозным раствором.

Выводы. При расчётах процесса разделения многокомпонентных смесей методом ультрафильтрации с применением мембранного аппарата существует ряд параметров, влияние которых является значительным. Эти параметры необходимо учитывать для определения селективности активного слоя мембран. Учёт влияния этих параметров является отдельным направлением для дальнейшего изучения механизма баромембранного массопереноса. Создание и освоение процессов разделения и концентрирования многокомпонентных растворов будет способствовать решению задач, поставленных Советом министров РФ о дальнейшем улучшении использования вторичных молочных ресурсов.

Список условных обозначений:

k – коэффициент разделения;
i, N – порядковый номер элементов;
n – порядковый номер аппарата;
N_s – число ступеней разделений;

x_i – концентрация, кг/м^3;

V_τ – объём разделяемого раствора в данный момент времени, м^3;

G_τ – проницаемость в данный момент времени, м^3/(м^2·с);

x_i – концентрация, кг/м^3;

V_τ – объём разделяемого раствора в данный момент времени, м^3;

G_τ – проницаемость в данный момент времени, м^3/(м^2·с);

$G_{исі}$ – проницаемость в неселективном потоке м^3/(м^2·с);

$G_{общ}$ - общая проницаемость через мембрану, м3/(м2·с)

Список используемой литературы

1. Семенов С. А. Планирование эксперимента в химии и химической технологии: учеб.-метод. пособие. М.: ИПЦ МИТХТ, 2001.
2. Семенова И. В. Промышленная экология. М.: Академия, 2009.
3. Конаныхин А.В. Применение мембранных процессов в молочной промышленности Дании. Молочная промышленность, 2011, № 12, с. 45-49.
4. Каталог фирмы «Рон-Пуленк», Ультрафильтрация молока. Инструкция по эксплуатации модулей плоскорамного типа UFP-57, 2015.
5. Федосов С. В., Маркелов А. В., Пахотин Н.Е., Осадчий Ю.П., Крикунов А.В. Устойчивость системы масло-вода // Информационная среда вуза. ИВГПУ. Иваново. 2015. 940-944 с.
6. Хванг С. Т. Мембранные процессы разделения: под ред. проф. Ю. И. Дытнерского. М.: Химия, 1981.
7. Кутепов А. М., ПолянинА. Д., Запрянов З. Д. и др.: Химическая гидродинамика. Справочное пособие. М.: Квантум,1990.
8. БогомоловА. И., ГайлеА. А., Громова В. В. и др. Химия нефти и газа: учеб. пособие для вузов. Л.: Химия, 1989.
9. Черножуков Н. И. Очистка и разделение молочного сырья, производство товарных продуктов. Под ред. ГуреевА. А. и Бондаренко Б. И. М.: Химия, 2018.
10. Шашкин П. И. Выделение компонентов из молочного сырья. М.: Химия, 1990.
11. Laine, J.-M., Vial, D., Moulart, P. / Status after 10 years of operation – overview of UK technology today // Proceedings of the Conference on Membranes in Drinking and Industrial Water Production. Paris, France, 3-6 October, 2000. V. 1, p. 17-27.
12. Ho Chia-Chi, Zydney, L. A combined pore blockage and cake filtration model for protein fouling during microfiltration. // J. Colloid & Interface Science. 2000. V. 232, p. 389-399 c.
13. Knops, F.N.M., Franklin B. Ultrafiltration for 90 MLD Cryptosporidium and Giardia free drinking water: a case study for the Yorkshire Water Keldgate Plant. // Proc. of the Conf. on Membranes in Drinking and Industrial Water Production (Paris, 3-6 October). 2000. V. 1, p. 71-78
14. Kosvintsev S., Holdich R.G., Cumming I.W., Starov V.M. Modelling of dead-end microfiltration with pore blocking and cake formation. // J. Membrane Science. 2002. V. 208, p. 181-192.
15. Mavrov V., Chmiel H., Kluth J., Meier J., Heinrich F., Ames P., Backes K., Usner P. Comparative study of different MF and UF membranes for drinking water production. // Desalination. 1998. V. 117, p. 189-196 c.
16. Schaefer A.I., Fane A.G., Waite T.D. Cost factors and chemical pretreatment effects in the membrane filtration of waters containing natural organic matter. // Water Resources. 2001. V. 35, No. 6, p. 1509-1517 c.
17. Осадчий Ю. П., Масленников В. А., Маркелов А. В. и др. Баромембранное разделение жидких полидисперсных систем // «Экология. Риск. Безопасность»: Материалы Междунар. науч. - практ. конф., 20-21 октября 2010 г. Курганский гос. универ. Курган, 2010. Т. 1

18. Дытнерский Ю. И. Баромембранные процессы. М.: Химия, 1986.
19. Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: учеб. пособие для вузов. В 2-х кн. Ч. 1. Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. М.: Химия, 1995.

References

1. Semenov, S. A. Planirovanie eksperimenta v khimii i khimicheskoy tekhnologii: ucheb.-metod. posobie. M.: IPTs MITKhT, 2001.
2. Semenova, I. V. Promyshlennaya ekologiya. M.: Akademiya, 2009.
3. Konanykhin A.V. Primenenie membrannykh protsessov v molochnoy promyshlennosti Danii. Molochnaya promyshlennost, 2011, №12, s.45-49.
4. Katalog firmy «Ron-Pulenk», Ultrafiltratsiya moloka. Instruktsiya po ekspluatatsii moduley ploskoramnogo tipa UFP-57, 2015.
5. Fedosov S. V., Markelov A. V., Pakhotin N.Ye., Osadchiy Yu.P., Krikunov A.V. Ustoychivost sistemy maslo-voda // Informatsionnaya sreda vuza. IVGPU. Ivanovo. 2015. 940-944 s.
6. Khvang S. T. Membrannye protsessy razdeleniya: pod red. prof. Yu. I. Dytnerskogo. M.: Khimiya, 1981.
7. KutepovA. M., PolyaninA. D., Zapryanov Z. D. i dr.:Khimicheskaya gidrodinamika. Spravochnoe posobie. M.: Kvantum,1990.
8. BogomolovA. I., GayleA. A., Gromova V. V. i dr.Khimiya nefti i gaza: ucheb. posobie dlya vuzov. L.: Khimiya, 1989.
9. Chernozhukov N. I. Ochistka i razdelenie molochnogo syrya, proizvodstvo tovarnykh produktov. Pod red. GureevaA. A. i BondarenkoB. I. M.: Khimiya, 2018.
10. Shashkin P. I. Vydelenie komponentov iz molochnogo syrya. M.: Khimiya, 19990.
11. Laine, J.-M., Vial, D., Moulart, P. / Status after 10 years of operation – overview of UK technology today // Proceedings of the Conference on Membranes in Drinking and Industrial Water Production. Paris, France, 3-6 October, 2000. V. 1, p. 17-27.
12. Ho Chia-Chi, Zydney, L. A combined pore blockage and cake filtration model for protein fouling during microfiltration. // J. Colloid & Interface Science. 2000. V. 232, p. 389-399 s.
13. Knops, F.N.M., Franklin B. Ultrafiltration for 90 MLD Cryptosporidium and Giardia free drinking water: a case study for the Yorkshire Water Keldgate Plant. // Proc. of the Conf. on Membranes in Drinking and Industrial Water Production (Paris, 3-6 October). 2000. V. 1, p. 71-78
14. Kosvintsev S., Holdich R.G., Cumming I.W., Starov V.M. Modelling of dead-end microfiltration with pore blocking and cake formation. // J. Membrane Science. 2002. V. 208, p. 181-192.
15. Mavrov V., Chmiel H., Kluth J., Meier J., Heinrich F., Ames P., Backes K., Usner P. Comparative study of different MF and UF membranes for drinking water production. // Desalination. 1998. V. 117, p. 189-196 s.
16. Schaefer A.I., Fane A.G., Waite T.D. Cost factors and chemical pretreatment effects in the membrane filtration of waters containing natural organic matter. // Water Resources. 2001. V. 35, No. 6, p. 1509-1517 s.
17. OsadchiyYu. P., MaslennikovV. A., Markelov A. V. i dr. Baromembrannoe razdelenie zhidkikh polidispersnykh sistem // «Ekologiya. Risk. Bezopasnost»: Materialy Mezhdunar. nauch. - prakt. konf., 20-21 oktyabrya 2010 g. Kurganskiy gos. univer. Kurgan, 2010. T. 1
18. Dytnerskiy Yu. I. Baromembrannye protsessy. M.: Khimiya,1986.
19. Dytnerskiy Yu. I. Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii: ucheb. posobie dlya vuzov. V 2-kh kn. Ch. 1. Teoreticheskie osnovy protsessov khimicheskoy tekhnologii. Gidromekhanicheskie i teplovye protsessy i apparaty. M.: Khimiya, 1995.

DOI 10.35523/2307-5872-2022-39-2-92-98
УДК 628.16.094.3-962.214+628.161.2

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ УСТАНОВКИ ОБЕЗЖЕЛЕЗИВАНИЯ ВОДЫ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ ОЗОНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Смирнов В.А., ФГБОУ ВО Костромская ГСХА;
Волхонов М.С., ФГБОУ ВО Костромская ГСХА

В центральном федеральном округе РФ в подземных водах наблюдается высокое содержания растворенного железа, приводящее к выходу из строя поильного оборудования на животноводческих комплексах, болезням животных, экономическим потерям. Практика показывает, что в подземных горизонтах водоснабжающих скважин животноводческих ферм также содержится большое количество вредных газов — в основном аммиака и сероводорода, поэтому при очистке воды от железа важно максимально снизить концентрацию загрязняющих газов в очищенной воде и воздухе производственной зоны. В основе методов обезжелезивания воды из подземных водоисточников лежит перевод растворенного железа в гидроокись, а в качестве окислителя часто используют озоновоздушную смесь. В разработанной установке обезжелезивания воды новой конструкции на основе озоновоздушной смеси озон генерируется ультрафиолетовыми излучателями. Экспериментально установлено, что при очистке воды озон в первую очередь вступает в реакцию с вредными попутными газами — сероводородом и аммиаком. При лабораторном исследовании до и после очистки воды в камере смешения установки обезжелезивания получено снижение сероводорода более чем в 10 раз — с 0,038 до 0,004 мг/м^3, содержание озона в сбросных газах составило менее 0,05 мг/м^3, содержание железа в воде снизилось с 2,58 до 0,02 мг/литр, что в 15,0 раз ниже предельно допустимых значений санитарных требований РФ. Экономия денежных средств на фильтрацию воздуха рабочей зоны от попутного сероводорода водоносных горизонтов для фермы крупного рогатого скота на 1000 голов при использовании новой установки обезжелезивания воды составляет порядка 28 тыс. руб. в год в ценах 2022 г.

Ключевые слова: *озон, кислород, сероводород, аммиак, озоновоздушная смесь, обезжелезивание воды.*

Для цитирования*: Смирнов В.А., Волхонов М.С. Экологическая и экономическая эффективность установки обезжелезивания воды новой конструкции на основе озоно-воздушной смеси // Аграрный вестник Верхневолжья. 2022. № 2 (39). С. 92–98.*

Введение. Основной проблемой животноводческих комплексов является загрязнение окружающей среды. За год от них выделяется в атмосферу до 39 млрд м^3 углекислого газа, 1,8 млрдм^3 аммиака, 700 тыс. м^3 сероводорода [1]. Такое большое количество вредных газов оказывает влияние на состав почвы вокруг предприятий, и в конечном итоге часть аммиака и сероводорода обнаруживается в подземных горизонтах водоснабжающих скважин этих животноводческих ферм, поэтому современные методы водоподготовки стремятся максимально снижать концентрацию загрязняющих газов в очищенной воде и воздухе производственной зоны, при этом минимизируя капитальные и текущие экономические затраты на очистку воды.

Аммиак NH4+ в подземной воде появляется в результате хозяйственно-бытовых и навозных стоков, стоков воды с сельскохозяйственных полей при разложении белковых веществ и мочевины, анаэробном восстановлении нитратов и нитритов. Аммиак оказывает нейротропное и удушающее действие, может вызвать отек легких. Пары аммиака могут вызвать химические ожоги и обморожения, потерю зрения [2]. Поражается центральная нервная система, печень, органы дыхания, наблюдаются сосудистые нарушения [3].

Сероводород H_2S появляется в подземных водных горизонтах в результате контакта воды с залежами сульфидных руд либо появляется при процессах гниения животных белков с содержанием серы. Сероводород является ядовитым газом и относится к 3-му классу опасности, его предельно допустимая концентрация в воздухе производственных помещений — 0,01 мг/л. При концентрациях 0,2—0,3 мг/л возникают острые отравления, хронические — при 0,02 мг/л; концентрация выше 1 мг/л вызывает летальный исход.

Сероводород вызывает паралич дыхательного нерва, что приводит к тому, что человек не ощущает его запаха. При хроническом воздействии наблюдаются малокровие, упадок питания, функциональные нарушения нервной системы, дрожание век и пальцев, боли в мышцах, бронхит, хронические заболевания глаз и верхних дыхательных путей, желудочно-кишечные расстройства, брадикардия, артериальная гипотония, дерматиты, экземы [2].

Чтобы предотвратить загрязнение сточных вод и атмосферного воздуха при переработке высокосернистых нефтей, по мнению авторов работы [4], наиболее рационально применять дезодорацию при температуре 60…100 °С, давлении 0,3…0,4 МПа. В этих условиях происходит окисление 80…85 % сероводорода кислородом воздуха до тиосульфатов, остальной сероводород отдувается с отработанным воздухом и сжигается в печи.

Одним из перспективных способов дегазации аммиака и сероводорода является окисление озоном [5].

В большинстве реакций озона с неорганическими веществами в окислении принимает участие только один атом кислорода, два других атома выделяются в виде молекулы O_2. В воде озон разлагается по радикальному механизму, который сопровождается образованием перекисных соединений и свободных радикалов OH*, HO_2*, обладающих высокой химической активностью.

Взаимодействие с озоном обычно приводит к образованию высших оксидов. Так, марганец окисляется до MnO_4–, низшие оксиды азота переходят в N_2O_5, аммиак окисляется до нитрата аммония NH_4NO_3, галогены — до ClO_2 и Br_2O_5.

Окисление озоном сероводорода протекает в две стадии:

$$H_2S + O_3 \rightarrow H_2O + SO_2. \quad (1)$$

$$3H_2S + 4O_2 \rightarrow 3H_2SO_4. \quad (2)$$

При избытке окислителя преобладает вторая реакция [6].

В центральном федеральном округе РФ в подземных водах наблюдается высокое содержания растворенного железа. Железо приводит к выходу из строя поильного оборудования на животноводческих комплексах, болезням животных и в конечном итоге к значительным экономическим потерям животноводческих хозяйств.

Системы очистки воды от растворенного железа основаны на окислении растворенного железа и переводе его в гидроокись с последующим задержанием на загрузке осадочного фильтра. В качестве окислителей используют кислород, хлор, перманганат и озон. Озон, имея высокий окислительный потенциал, получил мировое распространение в промышленных системах водоподготовки, где он генерируется с помощью электрического разряда [7, с. 43]. Однако в системах очистки воды малой производительности до 1000 л/час, используемых на малых животноводческих фермах, озон практически не применяется из-за высокой стоимости таких генераторов, эффективность работы таких систем недостаточно изучена.

Цель научного исследования — исследовать эффективность работы новой установки обезжелезивания воды производительностью до 1000 л/ч, работающей на основе ультрафиолетового генератора озона.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

–исследовать качество очистки воды от железа, определить количество сероводорода и озона после камеры смешивания установки обезжелезивания воды в потоке с помощью озона, генерируемого ультрафиолетовой лампой или блоком ламп;

– определить экономическую эффективность разработанной установки.

Условия, материалы и методы исследований. Нами разработана новая технологическая схема обезжелезивания воды в потоке с помощью озона, генерируемого ультрафиолетовой лампой или блоком ламп (рис.1).

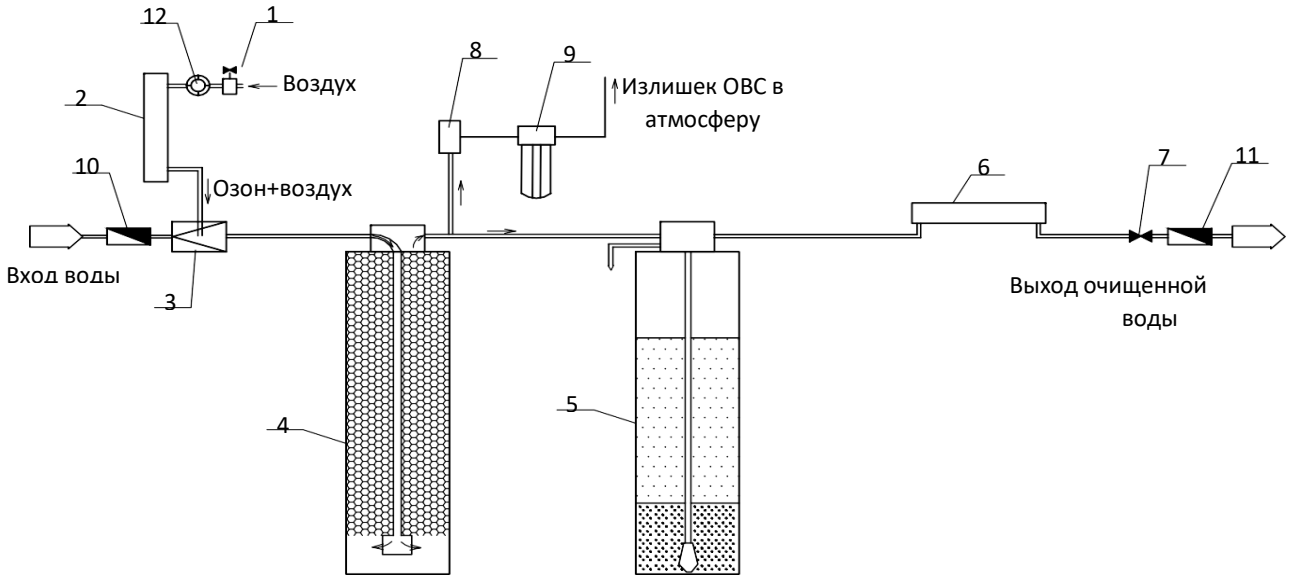

Рис. 1 – Схема установки обезжелезивания воды на основе озоновоздушной смеси

1 – регулятор подачи воздуха; 2 – ультрафиолетовая лампа S8Q-OZ; 3 – инжектор; 4 – камера смешивания с кольцами Палля; 5 – фильтр обезжелезивания; 6 – ультрафиолетовая лампа S8Q-PA2; 7 – регулятор расхода; 8 – воздухоотделительный клапан ARI; 9 – фильтр с угольным картриджем; 10 – счетчик входного потока воды; 11 – счетчик выходного потока воды; 12 – счетчик газа.

Устройство для обезжелезивания воды озоновоздушной смесью содержит ультрафиолетовую лампу в корпусе, снабженном патрубком с вентилем для подвода воздуха и патрубком отвода озоновоздушной смеси, подаваемой в пассивную полость инжектора, на вход которого под давлением подается вода, а выход инжектора соединен с конусным рассекателем, размещенным в нижней части смесительной камеры, в корпус которой засыпана насадка-кольца Палля, на крышке которой установлен воздушный клапан с патрубком, опускающимся до уровня воды в смесительной камере, соединен через угольный картридж в корпусе фильтра с дренажом. Верхняя часть смесительной камеры трубкой соединена с входом расположенного на песчано-гравийном фильтре обезжелезивания регулятора режима работы фильтра, выход которого соединен с потребителями через корпус второй ультрафиолетовой лампы и вентиль, при этом регулятор режима имеет три патрубка, один из которых опущен в верхнюю часть фильтра над песчано-гравийной засыпкой, второй опущен в нижнюю часть под песчано-гравийную засыпку, а третий патрубок связывает регулятор режима работы фильтра с дренажом.

Небольшие дозы озона, производимые из воздуха под воздействием ультрафиолетового облучения с длиной волны 185 нм, окисляют растворенные в воде железо, марганец, органические соединения, а деструкция остаточного озона под воздействием ультрафиолетового облучения с дли-

ной волны 254 нм в конце линии обработки дает возможность провести процесс окисления растворенного железа до конца.

Результаты научного исследования. Испытания новой системы обезжелезивания воды проводили на животноводческой ферме АО «Шувалово» Костромской области. При очистке содержание железа в воде снизилось с 2,58 мг/л до 0,02 мг/литр, что в 10,0 раз ниже предельно допустимых значений санитарных требований ЕС и в 15,0 раз ниже предельно допустимых значений санитарных требований РФ.

При проведении исследований определяли наличие сероводорода и озона после камеры смешивания установки обезжелезивания воды в потоке. Для определения количества попутного сероводорода в исходной воде замеры проводили в сбросных газах после камеры смешивания при отключении ультрафиолетового генератора озона. Для определения воздействия озона на окисление сероводорода включали в работу ультрафиолетовые генераторы озона и проводили замеры спустя 15 минут работы установки обезжелезивания.

В результате испытаний по стандартным методикам Р 2.2.2006-05, ГОСТ 12.1.005-88, РД 52.04.186-89; ГОСТ 17.2.3.01-86 при оценке качества сбросных газов после камеры смешения при отключенном ультрафиолетовом генераторе было обнаружено наличие сероводорода в концентрации 0,038 мг/м^3. При включённом ультрафиолетовом генераторе концентрация сероводорода снизилась и составила менее 0,004 мг/м^3, озона менее 0,05 мг/м^3.

Предельно допустимая концентрация озона в воздухе, установленная Всемирной организацией здравоохранения, составляет 6 частей на 1 млн. Экономическая эффективность установки новой конструкции основана на уменьшении доли дорогостоящего пиролюзита в составе фильтрующей загрузки с заменой его объема на равный объем кварцевого песка. В стандартной системе обезжелезивания для аэрации используется компрессор или инжектор, контактный блок для перемешивания окислителя с водой, а также засыпной фильтр, в составе засыпки которого кварцевый песок с фракцией 0,8…1,2 мм и пиролюзит с фракцией 0,4…1,2 мм.

Пропорции фильтрующих компонентов зависят от времени контакта воды с засыпкой и от содержания железа в обрабатываемой воде и составляют 0,5-0,8 долей кварцевого песка и 0,2…0,5 долей пиролюзита [9].

Наш опыт практической работы показывает, что соотношение пиролюзита и кварцевого песка составляет соответственно 3,5-4,0/6,5-6,0 долей в общем составе фильтрующей загрузки (табл.). При таком соотношении долей загрузки скорость взрыхляющей промывки составляет 45…60 м/час, что влечет за собой измельчение пиролюзита в пылевидную фракцию и ее дальнейшему выносу в дренаж.

Результаты исследования показывают, что окисление железа происходит эффективно от действия озоновоздушной смеси, при объеме катализатора STIROX от 10 % и выше в общем объеме засыпки. Уменьшение доли пиролюзита в общем объеме засыпки фильтра значительно уменьшает цену фильтра, снижает расходы воды на взрыхляющую промывку фильтрующей загрузки, уменьшает вынос пылевидной фракции пиролюзита.

Таблица — К расчёту экономической эффективности применения разработанной установки обезжелезивания на основе ультрафиолетового генератора озона и оптимизации засыпки фильтра AR -1252-OBC-T-CI-B

Наименование показателя	Стандартная установка			Разработанная установка		
	количество	ед.	%	количество	ед.	%
Наполнитель гравий 2,0-5,0 мм	12	кг	0,25	12	кг	0,35
Наполнитель кварц 0,8-1,2 мм	30	л	1,05	45	л	2,19
Корзина верхн.дистрибъютор 1.050"	1	шт.	0,22	1	шт.	0,31
Уплотнение дренажа V1	1	шт.	1,01	1	шт.	1,41
Корпус 12х52	1	шт.	20,63	1	шт.	28,75
Переключатель потоков воды V1 BTZ-3/4"	1	шт.	30,08	1	шт.	41,92
Труба водоподъемная 1,40mx1,05"	1	шт.	1,62	1	шт.	2,26
Блок питания 220-12V	1	шт.	1,18	1	шт.	1,64
Фитинг присоединительный PP32	1	комп	3,24	1	комп	4,52
Шланг дренажный Ду13 POLI TUBE	6	м	2,38	6	м	3,32
Наполнитель Пьюролокс 20*40	20,0	л	38,34	5,0	л	13,33

Расчёты показывают, что стоимость новой системы обезжелезивания воды меньше на 28,18 % по сравнению со стандартной установкой.

Расчётное количество попутного сероводорода, поступающего от подземной воды при водопотреблении стандартной фермы на 1000 голов крупнорогатого скота — 270 $м^3$/сутки, составит 10,26 грамма в сутки или 3,75 кг сероводорода в год, который, как правило, выбрасывается в воздух рабочей зоны за счет аэрации в линиях водоочистки и загрязняет атмосферу.

Самый простой известный способ сорбции сероводорода — это фильтрация через импрегнированный йодистым калием активированный уголь Silcarbon J42 для фильтров воздуха от диоксида серы. Данный фильтрующий материал способен поглотить количество сероводорода до 30 процентов от собственного веса [10].

Расчёты показывают, что применение новой системы очистки воды на основеозоно-воздушной смеси позволяет получить экономию денежных средств на фильтрацию воздуха рабочей зоны от попутного сероводорода водоносных горизонтов для фермы крупного рогатого скота на 1000 голов порядка 28 тыс.руб. в год в ценах 2022 г.

Выводы:

1. Новая установка обезжелезивания воды в потоке с помощью озона, генерируемого ультрафиолетовой лампой, позволяет снизить содержание железа в воде с 2,58 до 0,02 мг/литр, сероводорода в сбросных газах после камеры смешивания с 0,038 до 0,004 мг/$м^3$. Содержание озона в сбросных газах — менее 0,05 мг/$м^3$.

2. Стоимость новой системы обезжелезивания воды на основе озоно-воздушной смеси может быть снижена на 28,18 % по сравнению со стандартной установкой за счёт уменьшения объема пиролюзита — до 10 % от объёма засыпки фильтра без снижения качества работы установки.

3. Экономия денежных средств на фильтрацию воздуха рабочей зоны от попутного сероводорода водоносных горизонтов для фермы крупного рогатого скота на 1000 голов составляет порядка 28 тыс. руб. в год в ценах 2022 г.

Список используемой литературы

1. Вторый В.Ф. Структура системы конверсии вредных газов из воздушной среды коровника // АгроЭкоИнженерия. 2019. № 99. С. 286—295.
2. Растворенные в воде газы: источники, свойства, вред, способы очистки. URL: https://ekotsentr.ru/popup_menu.php?id=59 (дата обращения 08.06.2022).
3. Оценка влияния промышленного предприятия на состояние окружающей среды. URL:https://revolution.allbest.ru
4. Иоакимис Э.Г. Специфические вопросы очистки сточных вод на заводах, перерабатывающих высокосернистые нефти. / Проблемы переработки высокосернистых нефтей// Материалы Первой отраслевой конференции по переработке высокосернистых нефтей, проходившей в Уфе 10-12 февр. 1965 г. / Башк. науч.-исслед. ин-т по переработке нефти. М., 1966. С. 153—160.
5. Романов П.Н. Результаты эксперимента по действию озона на аммиак / П.Н. Романов, И.А. Сорокин, А.Д. Чесноков, М.Ю. Шибаева // Вестник НГИЭИ. 2019. № 10 (101). С. 62—74.
6. Морозова Е.М. Исследование способа обеззараживания сточных вод с помощью озона // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2011. № 3 (11). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-sposoba-obezzarazhivaniya-stochnyh-vod-s-pomoschyu-ozona (дата обращения 08.06.2022).
7. Орлов В.А. Озонирование воды. М.: Стройиздат, 1984.
8. Смолин Н.И., Жеребцов Б.В. Существующие методы и технические средства очистки воздуха от сероводорода // Современная техника и технологии. 2013. № 9. URL: https://technology.snauka.ru/2013/09/2343 (дата обращения 25.01.2022).
9. Черкасов С.В. Обезжелезивание воды. Теория и практика // Мировые Водные Технологии : [сайт]. URL: https://wwtec.ru/index.php?id=241 (дата обращения 08.06.2022).
10. Применение формованного импрегнированного (пропитанного) йодистым калием активированного угля Silcarbon (силкарбон) J42. URL: https://www.silcarbon.ru/formovanyj-aktivirovannyj-ugol/formovanyj-impregnirovany-ugol/impregnirovanyi-ugol-silcarbon-j42

References

1. Vtoryy V.F. Struktura sistemy konversii vrednykh gazov iz vozdushnoy sredy korovnika // AgroEkoInzheneriya. 2019. № 99. S. 286—295.
2. Rastvorennye v vode gazy: istochniki, svoystva, vred, sposoby ochistki. URL: https://ekotsentr.ru/popup_menu.php?id=59 (data obrashcheniya 08.06.2022).
3. Otsenka vliyaniya promyshlennogo predpriyatiya na sostoyanie okruzhayushchey sredy. URL:https://revolution.allbest.ru
4. Ioakimis E.G. Spetsificheskie voprosy ochistki stochnykh vod na zavodakh, pererabatyvayushchikh vysokosernistye nefti. / Problemy pererabotki vysokosernistykh neftey// Materialy Pervoy otraslevoy konferentsii po pererabotke vysokosernistykh neftey, prokhodivshey v Ufe 10-12 fevr. 1965 g. / Bashk. nauch.-issled. in-t po pererabotke nefti. M., 1966. S. 153—160.
5. Romanov P.N. Rezultaty eksperimenta po deystviyu ozona na ammiak / P.N.Romanov, I.A.Sorokin, A.D.Chesnokov, M.Yu.Shibaeva // Vestnik NGIEI. 2019. № 10 (101). S. 62—74.
6. Morozova Ye.M. Issledovanie sposoba obezzarazhivaniya stochnykh vod s pomoshchyu ozona // Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova. 2011. №3 (11). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-sposoba-obezzarazhivaniya-stochnyh-vod-s-pomoschyu-ozona (data obrashcheniya 08.06.2022).
7. Orlov V.A. Ozonirovanie vody. M.: Stroyizdat, 1984.

8. Smolin N.I., Zherebtsov B.V. Sushchestvuyushchie metody i tekhnicheskie sredstva ochistki vozdukha ot serovodoroda // Sovremennaya tekhnika i tekhnologii. 2013. № 9. URL: https://technology.snauka.ru/2013/09/2343 (data obrashcheniya 25.01.2022).

9. Cherkasov S.V. Obezzhelezivanie vody. Teoriya i praktika // Mirovye Vodnye Tekhnologii : [sayt]. URL: https://wwtec.ru/index.php?id=241 (data obrashcheniya 08.06.2022).

10. Primenenie formovannogo impregnirovannogo (propitannogo) yodistym kaliem aktivirovannogo uglya Silcarbon (silkarbon) J42. URL: https://www.silcarbon.ru/formovanyj-aktivirovannyj-ugol/formovanyj-impregnirovany-ugol/impregnirovanyi-ugol-silcarbon-j42

DOI 10.35523/2307-5872-2022-39-2-99-106
УДК 631.358:633.5

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ РАБОТЫ МЕХАНИЗМА ДЛЯ СДВИГАНИЯ ЛЕНТЫ СДВАИВАТЕЛЯ ЛЬНЯНОЙ ТРЕСТЫ

Смирнов С.В., ОГБУЗ «Автобаза ДЗКО»;
Трофимов М.А., ФГБОУ ВО Костромская ГСХА;
Лобачев А.А., ФГБОУ ВО Костромская ГСХА;
Соколов В.Н., ФГБОУ ВО Костромская ГСХА

В процессе предложенной в Костромской ГСХА технологии уборки и подготовки к переработке тресты необходимо, чтобы комли большинства стеблей в рулоне были расположены близко к его торцам. Для осуществления нового способа сдваивания лент разработана технологическая схема сдваивателя и изготовлен его опытный образец. Одним из требований, предъявляемых к исследуемому механизму, является смещение стеблей по конвейеру без увеличения угла отклонения их в ленте. Для этого стебель должен совершать плоскопараллельное перемещение. Для изучения характера воздействия элементов для сдвигания ленты на стебли исследовали процесс сдвигания несцепленных между собой стеблей. При движении в механизме для сдвигания стебли находятся в контакте одновременно с четырьмя различными поверхностями: с неподвижной металлической поверхностью стола, с резиновой поверхностью двух конвейеров, с металлической поверхностью лопаток, закрепленных на конвейерах, и резиновой поверхностью сдвигающего ремня. Первые три указанные поверхности создают сопротивление сдвиганию стеблей. Рассмотрели систему сил, действующих на стебель в процессе установившегося движения. Для обоснования угла α между рабочей ветвью сдвигающего ремня и направлением движения транспортирующих конвейеров рассмотрели силы, возникающие при взаимодействии комля единичного стебля со сдвигающим ремнем. Обосновали условие непроскальзывания комля стебля относительно сдвигающего ремня. Из этого условия вытекает, что для правильной работы механизма для сдвигания ленты (исключающей перекос стеблей) угол α установки рабочей ветви сдвигающего ремня по отношению к направлению движения конвейера не должен превышать значения угла $\varphi_{ком}$ трения покоя комлей стеблей по материалу этого ремня. Таким образом, скорость рабочей ветви сдвигающего ремня зависит от угла α между рабочей ветвью сдвигающего ремня и ремнями конвейера.

Ключевые слова: *лен, стебель, уборка, треста, подбор, сдваивание, льноуборочная машина.*

Для цитирования*: Смирнов С.В., Трофимов М.А., Лобачев А.А., Соколов В.Н. Обоснование параметров и режимов работы механизма для сдвигания ленты сдваивателя льняной тресты // Аграрный вестник Верхневолжья. 2022. № 2 (39). С. 99–106.*

Ведение. В процессе предложенной в Костромской ГСХА технологии уборки и подготовки к переработке тресты [1], основанной на рулонировании из валка, образованного путем сдваивания лент с накладыванием одной на другую вершинными частями комлями наружу, для облегчения разматывания рулона на льнозаводе и формирования перед мяльно-трепальным агрегатом слоя, в котором все стебли расположены комлями в одну сторону и имеют минимальную растянутость, необходимо, чтобы комли большинства стеблей в рулоне были расположены близко к его торцам. Для образования указанного валка в Костромской ГСХА предложен новый способ сдваивания лент тресты [2]. При реализации нового способа сдваивания будут подбираться одновременно две соседние ленты, при этом после подбора одна из них будет сдвигаться воздействием на комли стеблей в направлении их длины, а вторая сначала оборачиваться и затем сдвигаться к первой таким же воздействием на нее. Предложенный способ сдваивания в большей мере обеспечит не

только стабильность расстояния между комлевыми частями лент, но и прямолинейность линий, проходящих через эти части.

Для осуществления нового способа сдваивания лент разработана технологическая схема сдваивателя и изготовлен его опытный образец, состоящий из подбирающе-сдвигающей правой и подбирающе-оборачивающе-сдвигающей левой секций.

Схема сдваивателя представлена на рисунках 1 и 2.

Сдваиватель лент состоит из правой (подбирающе-сдвигающей) 1 и левой (подбирающе-оборачивающе-сдвигающей) 2 секций, установленных на главной раме 3, опирающейся на колеса 4 и имеющей дышло 5. Правая 1 и левая 2 секции приводятся в действие при помощи общего привода, включающего карданный вал 6 от вала отбора мощности трактора, цепные передачи 7 и 8, редуктор 9.

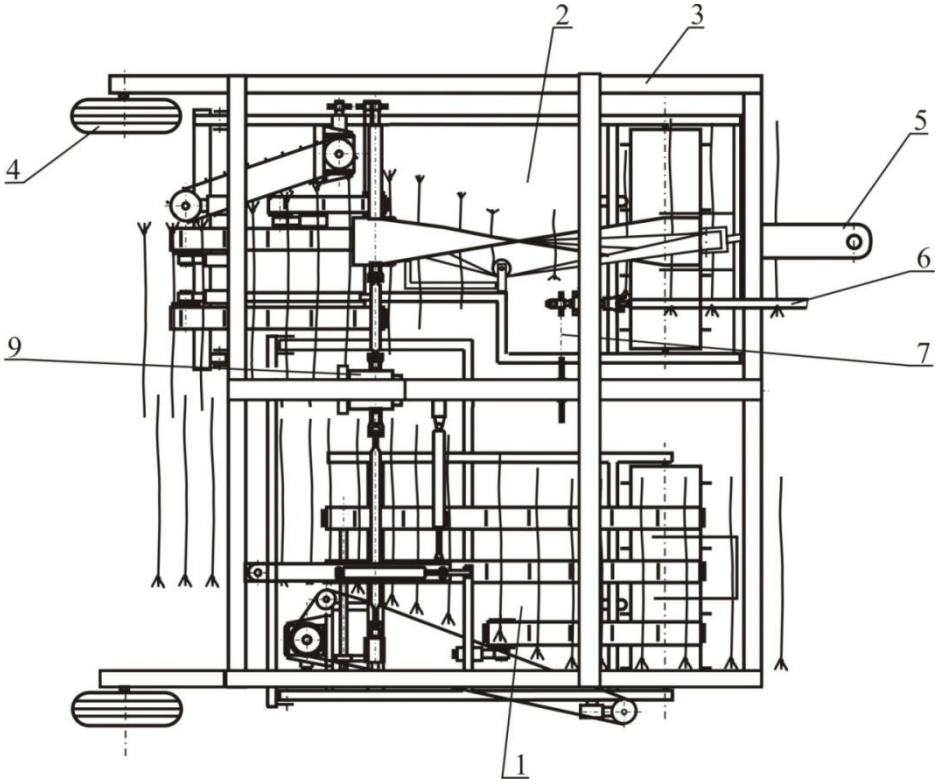

Рисунок 1 – Схема сдваивателя лент тресты, вид сверху

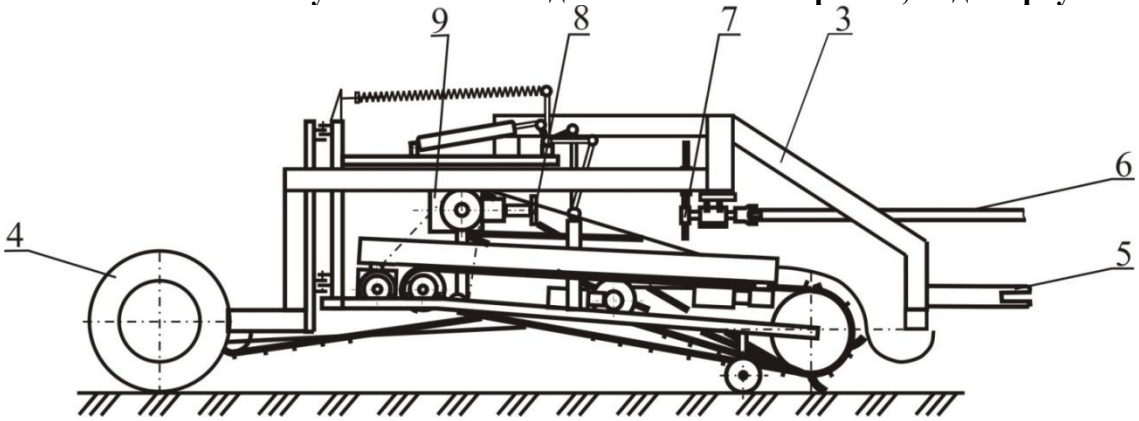

Рисунок 2 – Схема сдваивателя лент тресты, вид сбоку

Сдваиватель лент тресты работает следующим образом. В начале гона тракторист подъезжает к двум соседним лентам, расположенным комлями в одну сторону, так, чтобы одна из них оказалась между колесами трактора, а вторая справа от него, при этом комлевая часть первой ленты была

обращена ближе к правым колесам трактора. Во время движения агрегата с выполнением технологического процесса тракторист, во-первых, наблюдая за правым передним колесом трактора, тщательно направляет агрегат так, чтобы правые его колеса перекатывались на нужном расстоянии от комлей левой ленты, находящейся между колесами трактора, а во-вторых, обращает внимание и на положение правой ленты относительно колес трактора. Если правые колеса трактора будут находиться слишком далеко или близко от правой ленты, тракторист при помощи гидроцилиндра поворачивает правую секцию в нужную сторону, чтобы подбирающий барабан приблизился к правой ленте и уверенно ее подбирал.

Во время установившегося выполнения технологического процесса работают и правая, подбирающе-сдвигающая, и левая, подбирающе-оборачивающе-сдвигающая секции.

При работе правой секции ее подбирающий барабан подбирает ленту тресты, находящуюся справа от трактора, ремни транспортируют ее, а рабочая ветвь ремня, перемещаясь, сдвигает стеблевую массу в сторону левой ленты, одновременно и уменьшая растянутость стеблей. Далее ремни и расстилают ленту на почву.

При работе левой секции ее подбирающий барабан подбирает стеблевую массу, которая пропускается между колесами трактора, оборачивающий ремень совместно с зажимным ремнем оборачивает ленту стеблей и передает ее к транспортирующим ремням. Рабочая ветвь ремня, перемещаясь, сдвигает стеблевую массу в сторону правой ленты и одновременно уменьшает растянутость стеблей. Далее ремни расстилают ленту на почву. При этом вершинная часть расстилаемой левой ленты накладывается на вершинную часть уже разостланной секцией правой ленты.

Таким образом, сдваиватель подбирает одновременно две ленты, при этом правую сдвигает к левой и расстилает ее на почву, а левую оборачивает, сдвигает к правой и расстилает. В результате работы машины получается валок, в котором вершинная часть левой ленты наложена на вершинную часть правой комлями наружу, с сохранением стабильного расстояния между комлевыми частями лент. Расстояние между комлевыми частями лент устанавливается таким, чтобы потом этот валок мог подобрать рулонный пресс и замотать его в рулон, в котором стебли расположены комлями наружу (к торцам рулона).

Цель исследования – исследование процесса сдваивания и выбор оптимальных режимов работы сдваивателя лент.

Операция сдвигания ленты тресты осуществляется в механизме для сдвигания, при этом происходит смещение ее от первоначального положения до требуемого для получения сдвоенного валка определенной ширины, в котором ленты наложены одна на другую вершинными частями комлями наружу, а также уменьшения растянутости стеблей в ленте.

Одним из требований, предъявляемых к исследуемому механизму, схема которого представлена на рисунке 3, является смещение стеблей по конвейеру без увеличения угла отклонения их в ленте.

Исходя из того, что стебли при движении в этом механизме не должны перекашиваться, приходим к выводу, что стебель должен совершать плоскопараллельное перемещение, то есть скорости движения комлевой и вершинной частей стеблей должны быть равны, а проекция скорости сдвигающего ремня $V_{СД.Р.X}$ на ось X должна быть равна скорости транспортирующего конвейера:

$$V_{СД.Р.X} = V_K, \quad (1)$$

где V_K - скорость транспортирующего конвейера.

В свою очередь $V_{СД.Р.X}$ можно найти из выражения:

$$V_{СД.Р.X} = V_{СД.Р.} \cdot Cos\alpha, \quad (2)$$

где $V_{СД.Р.}$ - скорость рабочей ветви сдвигающего ремня;

α – угол между вектором скорости транспортирующего конвейера и вектором скорости рабочей ветви сдвигающего ремня, град.

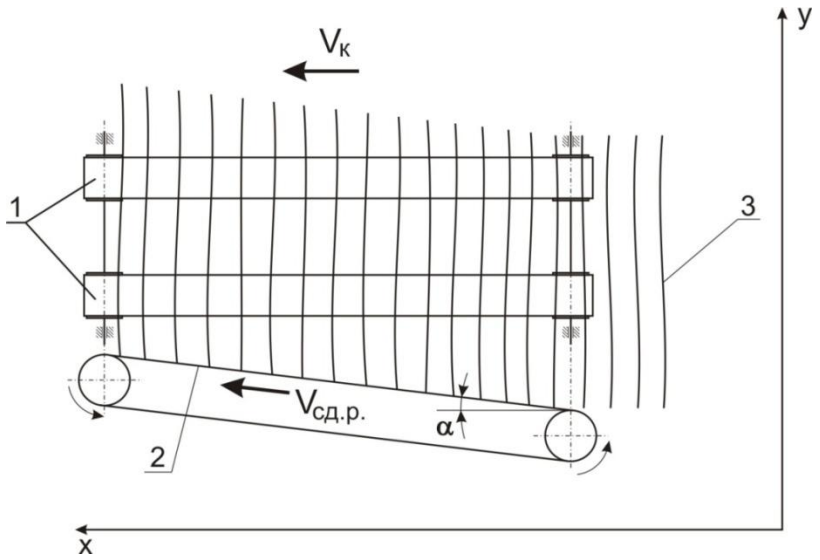

Рисунок 3 – Схема механизма для сдвигания ленты
1 - транспортирующий конвейер, 2 - сдвигающий ремень, 3 - стебли тресты

Тогда с учетом выражений (1) и (2) скорость рабочей ветви сдвигающего ремня будет определятся по формуле:

$$V_{СД.Р.} = \frac{V_K}{Cos\alpha} \quad (3)$$

Пользуясь выражением (3), определяется скорость сдвигающего ремня.

Исследование процесса смещения ленты тресты, состоящей в обычном состоянии из сцепленных стеблей, осложняется из-за малой изученности сцепленности, которая даже при нормальном стеблестое значительно зависит от влажности, спелости тресты и множества других факторов. Поэтому для того, чтобы понять характер воздействия элементов для сдвигания ленты на стебли, исследовали процесс сдвигания несцепленных между собой стеблей.

При движении в механизме для сдвигания стебли находятся в контакте одновременно с четырьмя различными поверхностями: с неподвижной металлической поверхностью стола, с резиновой поверхностью двух конвейеров, с металлической поверхностью лопаток, закрепленных на конвейерах, и резиновой поверхностью сдвигающего ремня. Первые три указанные поверхности создают сопротивление сдвиганию стеблей [3].

Рассмотрим систему сил, действующих на стебель в процессе установившегося движения (рис. 4).

Проекция силы трения стебля о неподвижную поверхность стола механизма для сдвигания на ось Y (рис. 3.2) будет находиться следующим образом:

$$F_{CY} = F_C \cdot Sin\alpha \quad (4)$$

Сила трения стебля о неподвижную поверхность стола:

$$F_C = f_C \cdot N_C, \quad (5)$$

где f_C - коэффициент трения скольжения стебля по неподвижной поверхности стола;

N_C - нормальная реакция со стороны неподвижной поверхности стола на стебель.

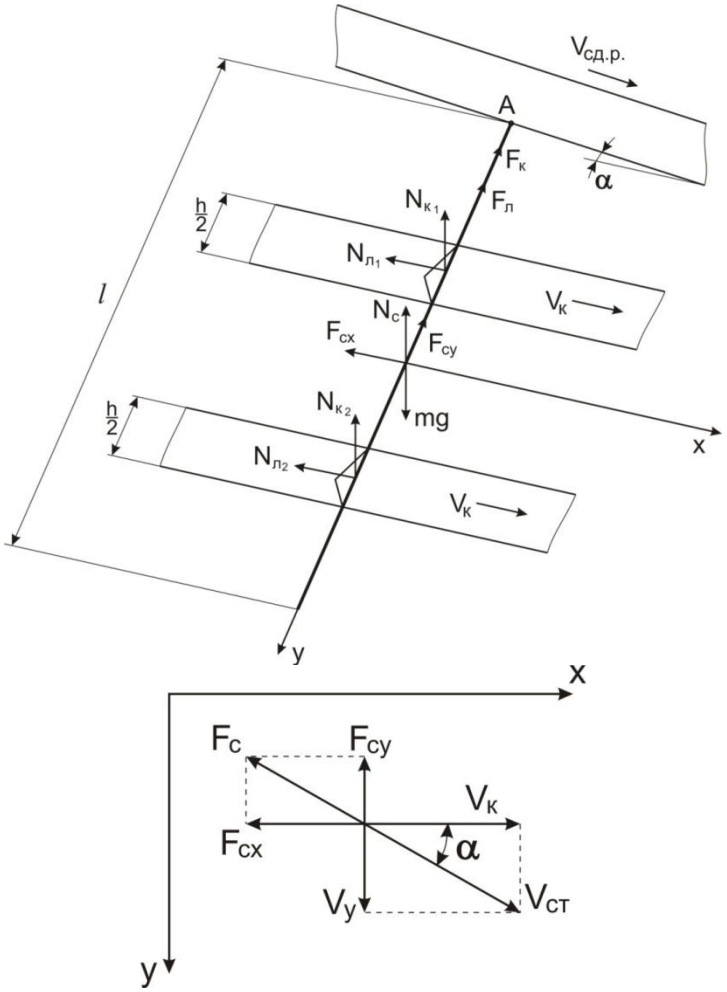

Рисунок 4 – Схемы сил, действующих на стебель

После преобразования формулы (5) получим:

$$F_C = f_C \cdot \left(\frac{l-h}{l} \right) \cdot mg \,, \tag{6}$$

где l – длина стебля;

h – суммарная ширина конвейеров механизма для сдвигания ленты;

m – масса стебля;

g – ускорение свободного падения.

Выражение $\left(\frac{l-h}{l} \right)$ указывает на то, какая доля длины стебля находится в контакте с неподвижной поверхностью стола.

Проекция силы трения стебля о неподвижную поверхность стола сдвигающего устройства на ось X (рис. 4) будет равна:

$$F_{CX} = F_C \cdot Cos\alpha \tag{7}$$

Сила трения стебля о поверхность конвейеров будет равна:

$$F_K = f_K \cdot \frac{h}{l} \cdot mg \,, \tag{8}$$

где f_K - коэффициент трения скольжения стебля по поверхности конвейеров.

Выражение $\frac{h}{l}$ показывает на то, какая доля длины стебля находится в контакте с поверхностью конвейеров.

Сила трения стебля по поверхности лопаток находится по следующей формуле:

$$F_Л = f_Л \cdot N_Л \,, \tag{9}$$

где $f_Л$ - коэффициент трения скольжения стебля по поверхности лопаток;

$N_Л$ - нормальная реакция со стороны лопаток.

Реакция $N_Л$ возникает от действия силы со стороны стебля на лопатку. Эта сила равна проекции силы трения стебля о стол на ось X.

$$N_Л = F_{CX} \tag{10}$$

Тогда выражение (9) примет вид:

$$F_Л = f_Л \cdot F_{CX} \tag{11}$$

Сумма всех сил, действующих вдоль стебля, будет давать результирующую силу $F_{РЕЗ}$.

$$F_{РЕЗ} = F_Л + F_K + F_{CX} \tag{12}$$

Результаты исследования и их анализ. Для обоснования угла α между рабочей ветвью сдвигающего ремня и направлением движения транспортирующих конвейеров рассмотрим силы, возникающие при взаимодействии комля единичного стебля со сдвигающим ремнем (рис. 5).

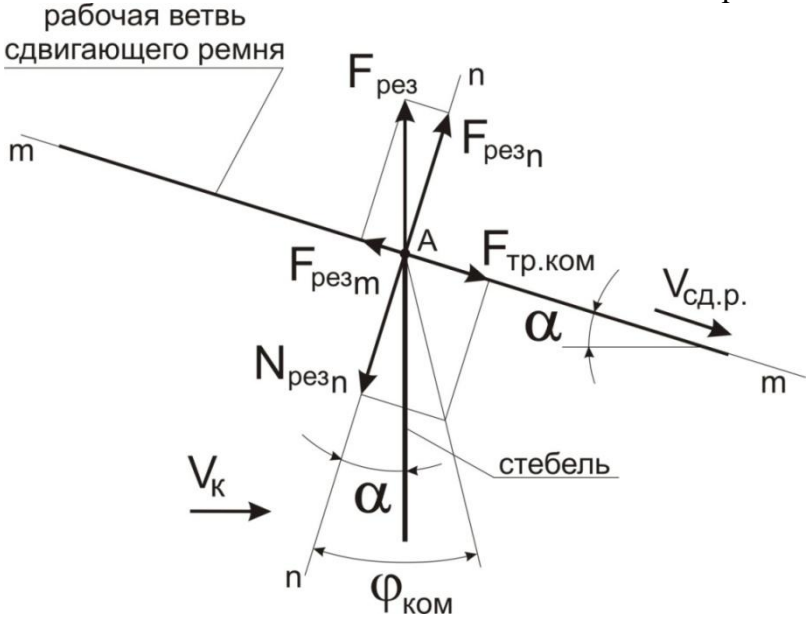

Рисунок 5 – Схема сил, возникающих при взаимодействии комля стебля со сдвигающим ремнем

Силу, с которой стебель действует на сдвигающий ремень $F_{РЕЗ}$, разложим на оси *n* и *m*, которые проведем через точку А касания стебля со сдвигающим ремнем таким образом, чтобы ось *n* являлась нормалью к его рабочей ветви, а ось *m* проходила вдоль рабочей ветви ремня.

Как видно на схеме, при взаимодействии комля стебля со сдвигающим ремнем возникают две силы, направленные вдоль ремня: у одной силы вектор направлен противоположно вектору скорости сдвигающего ремня, а у другой совпадает с ним и она является силой трения комля стебля о ремень.

Силу, вектор которой направлен противоположно вектору скорости сдвигающего ремня $V_{СД.Р.}$, назовем силой проскальзывания. Величина этой силы равна $F_{РЕЗm}$:

$$F_{ПР} = F_{РЕЗm} \tag{13}$$

В свою очередь

$$F_{РЕЗm} = F_{РЕЗ} \cdot Sin\alpha \tag{14}$$

Сила трения комля стебля о ремень направлена в сторону, обратную силе проскальзывания, а величина ее зависит от силы реакции $N_{РЕЗn}$ в точке А (рис. 5), которая в свою очередь равна проекции результирующей силы на ось *n*:

$$N_{РЕЗn} = F_{РЕЗ\,n} \tag{15}$$

$$N_{РЕЗn} = F_{РЕЗ} \cdot Cos\alpha \tag{16}$$

С учетом сказанного сила трения комля стебля по поверхности ремня будет определятся по формуле:

$$F_{ТР.КОМ} = f_{КОМ} \cdot N_{РЕЗn}, \tag{17}$$

где $f_{КОМ}$ – коэффициент трения комля стебля по материалу, из которого изготовлен сдвигающий ремень.

Тогда условием непроскальзывания комля стебля относительно сдвигающего ремня будет условие:

$$F_{ТР.КОМ} \geq F_{ПР} \tag{18}$$

Учитывая зависимости, полученные в формулах с (4) по (18), получим выражение:

$$f_{КОМ} \cdot Cos\alpha \geq Sin\alpha \tag{19}$$

Разделив обе части неравенства на $Cos\alpha$, получим:

$$f_{КОМ} \geq tg\alpha \tag{20}$$

Из теоретической механики известно [4], что коэффициент трения равен тангенсу угла трения. Тогда неравенство (20) примет вид:

$$tg\varphi_{КОМ} \geq tg\alpha, \tag{21}$$

где $\varphi_{ком}$ - угол трения покоя комля стебля по материалу, из которого изготовлен сдвигающий ремень.

Тогда условием установки сдвигающего ремня относительно ремней конвейера будет выражение:

$$\alpha \leq \varphi_{КОМ} \tag{22}$$

Выводы. Из полученного условия вытекает, что для правильной работы механизма для сдвигания ленты (исключающей перекос стеблей) угол α установки рабочей ветви сдвигающего ремня по отношению к направлению движения конвейера не должен превышать значения угла $\varphi_{ком}$ трения покоя комлей стеблей по материалу этого ремня, а также должно выполняться условие (3).

Таким образом, скорость рабочей ветви сдвигающего ремня зависит от угла α между рабочей ветвью сдвигающего ремня и ремнями конвейера. В свою очередь угол α ограничивается углом $\varphi_{КОМ}$ трения покоя комлей стеблей по материалу ремней.

Список используемой литературы

1. Патент 2257704 РФ., МКИ А 01 Д 45/06, Д 01В 1/16. «Способ уборки и подготовки к переработке тресты льняной». /Смирнов Н.А., № 2003111102/12, заявл. 17.04.2003, опубл. 10.08.2005. Бюл. № 22/

2. Патент 2246200 РФ, МКИ А 01 D 45/06 Способ уборки тресты льняной и устройство для его осуществления / Смирнов Н.А., Смирнов С.В., Трофимов М.А., № 2003104054/12 заявл. 11.02.2003, опубл. 20.02.2005. Бюл. № 5.

3. Зинцов А.Н. Повышение эффективности подборщика-очесывателя путем ориентирования ленты льна перед очесывающим аппаратом: Дисс. канд. техн. наук. Кострома, 1996.

4. Яблонский А.А., Никифорова В.М. Курс теоретической механики: Учебник для вузов. изд. 13-е, исправленное. М.: Интеграл-Пресс, 2006.

References

1. Patent 2257704 RF., MKI A 01 D 45/06, D 01V 1/16. «Sposob uborki i podgotovki k pererabotke tresty lnyanoy». /Smirnov N.A., №2003111102/12, zayavl. 17.04.2003,opubl. 10.08.2005. Byul.№22

2. Patent 2246200 RF, MKI A 01 D 45/06 Sposob uborki tresty lnyanoy i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya / Smirnov N.A., Smirnov S.V., Trofimov M.A., № 2003104054/12 zayavl. 11.02.2003, opubl. 20.02.2005. Byul. № 5.

3. Zintsov A.N. Povyshenie effektivnosti podborshchika-ochesyvatelya putem orientirovaniya lenty lna pered ochesyvayushchim apparatom: Diss. kand. tekhn. nauk. Kostroma: 1996.

4. Yablonskiy A.A., Nikiforova V.M. Kurs teoreticheskoy mekhaniki: Uchebnik dlya vuzov. izd. 13-e, ispravlennoe. M.: Integral-Press, 2006.

DOI 10.35523/2307-5872-2022-39-2-107-113
УДК 624.046.2

РАСЧЕТ НА ПРОЧНОСТЬ ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ НА УПРУГО-ПОДАТЛИВОМ ОСНОВАНИИ

Смирнов С.Ф., ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет»;
Терентьев В.В., ФГБОУ ВО Ивановская ГСХА;
Краснов А.А., Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России

В статье отмечено, что в настоящее время в сельскохозяйственном производстве используется значительное количество резервуаров различной вместимости для хранения технологических материалов в жидком виде. В качестве материалов для изготовления резервуаров широко используются металлы (сталь) и пластики. При установке резервуаров используются различные типы оснований, которые отличаются своей жесткостью. Отмечено, что из-за недостатка жесткости основания, на котором устанавливаются вертикальные резервуары, механическая прочность их не обеспечивает работоспособность вследствие увеличения напряжений в деформированном дне. В статье представлены расчетные формулы, позволяющие проводить уточненный расчет на прочность резервуаров вертикального исполнения, предназначенных для хранения различного рода жидкостей (топливо-смазочных материалов, молока, молочных продуктов, растворов удобрений и ядохимикатов и т.д.), изготовленных из различных материалов и располагающихся на упруго-податливом основании (грунте). Получены расчетные выражения напряжений в цилиндрической части и дна резервуара, по которым можно провести уточненный расчет на прочность. В качестве примера представлены результаты расчетов стандартной бочки вместимостью 200 л, установленной на различных основаниях. В статье показано, что прочность резервуаров можно увеличить в десятки раз при установке дна резервуара на жесткое основание, что приведет к значительному уменьшению вероятности экологического и материального ущерба от нарушения прочности и герметичности резервуаров. Представленные расчетные формулы позволяют обосновывать тип основания для установки резервуаров, исходя из их прочностных характеристик, степени заполнения и типа жидкости в резервуаре.

Ключевые слова: *ёмкость, упруго-податливое основание, жесткое основание, изгибающий, радиальный моменты, прочность.*

Для цитирования*: Смирнов С.Ф., Терентьев В.В., Краснов А.А. Расчет на прочность вертикальных резервуаров на упруго-податливом основании // Аграрный вестник Верхневолжья. 2022. № 2 (39). С. 107–113.*

Введение. Вертикальные резервуары из стали, пластика применяются для хранения различного рода жидкостей (топливо-смазочных материалов, молока, молочных продуктов, растворов удобрений и ядохимикатов и т.д.). Известно, что основным требованием обеспечения прочности и надежности детали является выполнение условия, когда нагрузочный эффект меньше или равен несущей способности детали [1].

Для обеспечения высокой надежности корпусных элементов технических систем на этапе конструирования необходимо точное определение внутренних усилий, напряжений и перемещений, действующих на элемент. В работе [2] представлена методика расчета корпуса трансформатора с учетом прогиба плоскости днища, позволяющая точно рассчитать толщину стенок корпуса.

В соответствии с действующими стандартами при проектировании резервуаров на жестком основании, которое представляет сплошную железобетонную плиту, толщина листов дна резервуаров объемом 2000 м^3 и менее должна быть не менее 4 мм (для стальных резервуаров) [3], т.е.

имеет достаточно малую величину для больших объемов резервуаров. Без жесткого основания резервуара рекомендуемая толщина листов дна не обеспечивает требуемую механическую прочность, вследствие увеличения напряжений в деформированном дне. Однако в сельскохозяйственном производстве резервуары зачастую устанавливаются не на железобетонные плиты, а на другие основания, которые во многих случаях не обеспечивают необходимой жесткости. Вследствие этого наблюдается нарушение герметичности резервуаров, приводящее к потерям хранимого продукта, а в некоторых случаях и загрязнению окружающей среды. Одним из примеров является разлив дизельного топлива из резервуара для его хранения вследствие нарушения герметичности, произошедший 29 мая 2020 года в Норильско-Таймырской энергетической компании, входящей в группу компаний «Норильский никель». Поэтому разработка уточненной методики расчета на прочность емкостей, установленных на упруго-податливом основании представляется актуальной в настоящее время.

Цель и задачи. Целью работы является получение расчетных формул для проверки на прочность вертикальных емкостей на упруго-пластичном основании при установленных объемах заполнения, удельного веса жидкости, механических характеристик материала. Основными задачами являются получение математических выражений для расчета усилий и эффективных напряжений в корпусе и дне резервуара.

Материалы и методы. Материал корпуса резервуара характеризуется модулем упругости E (МПа), коэффициентом Пуассона ν, расчетным сопротивлением по пределу текучести R_y (МПа). Жидкость характеризуется удельным весом γ (кН/м^3). Геометрия определяется высотой заполнения резервуара ℓ (м) жидкостью, его радиусом R (м), толщиной стенки цилиндрической части корпуса h_3 (м), толщиной днаh_1 (м).

Результаты. Схема резервуара с жидкостью и внутренних усилий, действующих в нем, представлена на рисунке 1.

Резервуар находится под действием гидростатического давления жидкости, определяемого по формуле:

$$p_3 = \gamma(\ell - x). \quad (1)$$

Гидростатическое давление жидкости изменяется по высоте; максимальное его значение на дне:

$$p_1 = \gamma\ell. \quad (2)$$

Будем полагать, что резервуар установлен на упруго-податливом основании, который не препятствует упругим деформациям до их конечного развития. Расчет усилий в корпусе резервуара проводится путем применения метода расчленения для оболочек вращения [4]. В этом случае напряженно-деформированное состояние оболочки может быть представлено в виде основного состояния, охватывающего цилиндрическую часть резервуара, и состояния краевого эффекта у края оболочки по сечению сопряжения цилиндрической части корпуса резервуара с дном.

Из условия равновесия полусечения равнодействующая продольной силы в оболочке у основания (при x=0) составляет:

$$N_x = \pi \cdot R^2 \cdot p_1. \quad (3)$$

Следовательно, продольная сила, приходящаяся на метр длины, определится из выражения:

$$N_1 = N_x / 2 \cdot \pi \cdot R. \quad (4)$$

Отсюда получаем:

$$N_1 = \frac{p_1 R}{2} = \frac{\gamma l R}{2}. \quad (5)$$

Из уравнения равновесия напряженного состояния [4], действующая нагрузка составит:

$$\frac{N_2}{R} - p_3 = 0, \quad (6)$$

Исходя из действующей нагрузки, определяем окружную продольную силу, которая составит:

$$N_2 = R \cdot p_3. \quad (7)$$

Нормальные перемещения ω в цилиндрической части корпуса с учетом краевого эффекта представляют в виде суммы перемещения ω_0, учитывающего краевой эффект, и перемещения ω^*, полученного по безмоментной теории оболочек [4]:

$$\omega = \omega_0 + \omega^*. \qquad (8)$$

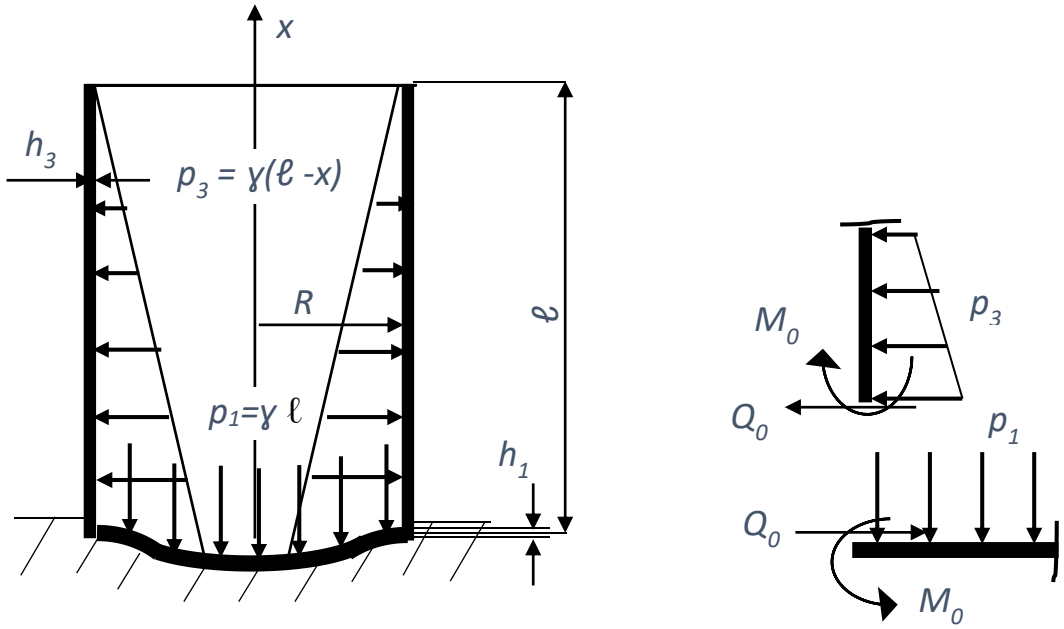

Рисунок 1– Схема резервуара и внутренние усилия

Из уравнения деформаций [4] нормальные перемещения ω^* по безмоментной теории в цилиндрической части корпуса определяются из выражения:

$$\omega^* = \frac{R}{Eh_s}(N_2 - \nu N_1) = \frac{R^2\left[\gamma(\ell - x) - \nu\frac{\gamma\ell}{2}\right]}{Eh_s}. \qquad (9)$$

Перемещение ω_0 рассчитывают из однородного дифференциального уравнения:

$$\frac{\partial^4\omega}{\partial x^4} + 4\cdot\beta_ц{}^4\omega = 0, \qquad (10)$$

где $\beta_ц = \sqrt[4]{\frac{3\cdot(1-\nu^2)}{R^2\cdot h_s^2}}$;

$D_ц = \frac{E\cdot h_3^3}{12\cdot(1-\nu^2)}$ цилиндрическая жесткость корпуса резервуара (см. рисунок 1).

Решение однородного уравнения (10) имеет вид [4]:

$$\omega_0 = e^{\beta_ц x}\cdot\left(C_1\cdot\cos\beta_ц x + C_2\cdot\sin\beta_ц x\right) + e^{-\beta_ц x}\left(C_3\cdot\cos\beta_ц x + C_4\cdot\sin\beta_ц x\right). \qquad (11)$$

C_1 и C_2 принимаем равными нулю, т.к. при x=0 силы производят местный изгиб (краевой эффект), быстро убывающий до нуля при удалении от торца. Считаем оболочку длинной при выполнении условия $l \geq 2{,}5\cdot\sqrt{R\cdot h}$[4].

Таким образом, нормальное перемещение в цилидрической части резервуара с учетом краевого эффекта составит:

$$\omega = e^{-\beta_ц x}\left(C_3\cdot\cos\beta_ц x + C_4\cdot\sin\beta_ц x\right) + \frac{R^2\left[\gamma(\ell - x) - \nu\frac{\gamma\ell}{2}\right]}{Eh_s}. \qquad (12)$$

Постоянные C_3 и C_4 определяются из уравнений для усилий при x=0 из условий [4]:

$$\left.\begin{aligned}(M_x)_{x=0}&=D_ц\left(\frac{d^2\omega}{dx^2}\right)_{x=0}=M_0;\\ (Q_x)_{x=0}&=\left(\frac{dM_x}{dx}\right)_{x=0}=D_ц\left(\frac{d^3\omega}{dx^3}\right)_{x=0}=Q_0\end{aligned}\right\}, \quad (13)$$

где M_0 и Q_0– изгибающий и момент и поперечная сила при x=0.

Решая систему уравнений (13), получаем:

$$C_3=\frac{1}{\beta_ц^2\cdot D_ц}\cdot\left(\frac{Q_0}{\beta_ц}+M_0\right). \quad (14)$$

$$C_4=-\frac{M_0}{2\beta_ц^2\cdot D_ц}. \quad (15)$$

$$\omega=\frac{e^{-\beta_ц x}}{2\beta_ц^2\cdot D_ц}\left(M_0\left(\cos\beta_ц x-\sin\beta_ц x\right)+\frac{Q_0}{\beta_ц}\cdot\cos\beta_ц x\right)+\frac{R^2\left[\gamma(\ell-x)-\nu\frac{\gamma\ell}{2}\right]}{Eh_в}. \quad (16)$$

Угол поворота в цилиндрической части определяем из уравнения:

$$\varphi_ц=\left(\frac{d\omega}{dx}\right)=-\frac{M_0}{D_ц\cdot\beta_ц}e^{-\beta_ц x}\cos\beta_ц x-\frac{Q_0\cdot e^{-\beta_ц x}}{2\beta_ц^2\cdot D_ц}\left(\cos\beta_ц x+\sin\beta_ц x\right)-\frac{R^2\gamma}{Eh_в}. \quad (17)$$

Прогиб дна определяется из теории упругости для круглых пластин по формуле [5]:

$$\omega_{дн}=C_1+C_2r^2-\frac{p_1 r^4}{64D_{дн}}, \quad (18)$$

где $D_{дн}=\frac{E\cdot h_1^3}{12\cdot(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость дна.

Угол поворота срединной плоскости дна определим из выражения:

$$\varphi_{дн}=\frac{d\omega}{dr}=2\cdot C_2\cdot r-\frac{p_1 r^3}{16\cdot D_{дн}}. \quad (19)$$

Радиальный изгибающий момент определится по формуле [5]:

$$M_r=-D_{дн}\left(\frac{d\varphi_{дн}}{dr}+\frac{\nu}{r}\varphi_{дн}\right). \quad (20)$$

Определим C_2 из условия: при r=R радиальный изгибающий момент $M_r=M_0$ в точке пересечения срединных поверхностей пластины и цилиндра:

$$C_2=-\frac{M_0}{2\cdot D_{дн}(1+\nu)}+\frac{p_1\cdot R^2}{32\cdot D_{дн}}\cdot\frac{(3+\nu)}{(1+\nu)}. \quad (21)$$

Взаимное линейное перемещение точки пересечения срединных поверхностей О как точки сопряжения днища и цилиндра равно нулю, следовательно:

$$C_1=\frac{M_0\cdot R^2}{2\cdot D_{дн}\cdot(1+\nu)}-\frac{p_1\cdot R^4}{64\cdot D_{дн}}\cdot\frac{(5+\nu)}{(1+\nu)}. \quad (22)$$

Угол поворота срединной плоскости дна:

$$\varphi_{дн}(r)=-\frac{M_0\cdot r}{D_{дн}\cdot(1+\nu)}+\frac{p_1 R^2\cdot r}{16\cdot D_{дн}}\frac{(3+\nu)}{(1+\nu)}-\frac{p_1\cdot r^3}{16\cdot D_{дн}}. \quad (23)$$

Угол поворота срединной плоскости днища при r=R.

$$\varphi_{дн}=-\frac{M_0\cdot R}{D_{дн}\cdot(1+\nu)}+\frac{p_1\cdot R^3}{8\cdot D_{дн}}\cdot\frac{1}{(1+\nu)}. \quad (24)$$

Для расчета напряжений в дне необходимо определить M_0. Для этого используются условия совместности деформаций цилиндра и дна при x=0: 1) $\omega=0$; 2) $\varphi_ц=-\varphi_{дн}$ (пренебрегая радиальной составляющей перемещения дна), из которых следует:

$$\frac{M_0}{D_ц\cdot\beta_ц^2}+\frac{Q_0}{D_ц\cdot\beta_ц^3}+\frac{R^2\gamma\ell\,(2-\nu)}{Eh_в}=0. \quad (25)$$

$$-\frac{M_0}{D_ц\cdot\beta_ц}-\frac{Q_0}{2D_ц\cdot\beta_ц^2}-\frac{R^2\gamma}{Eh_в}=\frac{M_0\cdot R}{D_{дн}\cdot(1+\nu)}-\frac{p_1\cdot R^3}{8\cdot D_{дн}}\cdot\frac{1}{(1+\nu)}. \quad (26)$$

Решая систему уравнений (25, 26), получим выражение для M_0:

$$M_0 = \frac{\frac{R^2\gamma\ell(2-\nu)}{E h_в 2D_ц\beta_ц^2} - \left[\frac{1}{D_ц\beta_ц^3}\left(\frac{R^2\gamma}{Eh_в} - \frac{\gamma\ell R^3}{8D_{дн}}\frac{1}{(1+\nu)}\right)\right]}{\frac{1}{D_ц\beta_ц^3}\left(\frac{1}{D_ц\beta_ц} + \frac{R}{D_{дн}(1+\nu)}\right) - \frac{1}{2D_ц^2\beta_ц^4}} \quad (27)$$

Для упрощения выражения (27) можно отбросить члены более высокого порядка малости и изгибающий момент M_0 можно рассчитать по более простой формуле:

$$M_0 = \frac{\frac{\gamma\ell R^3}{8D_{дн}}\frac{1}{(1+\nu)}}{\left(\frac{1}{D_ц\beta_ц} + \frac{R}{D_{дн}(1+\nu)}\right)} \quad (28)$$

Для цилиндрической части корпуса наибольшие усилия возникают при x=0

$$M_1 = M_0;\ M_2 = \nu \cdot M_0; N_1 = \frac{p_1 \cdot R}{2};\ N_2 = \nu \cdot N_1;\ . \quad (29)$$

Максимальные нормальные напряжения в цилиндрической части резервуара рассчитываются по формулам:

$$\sigma_1 = \frac{N_1}{h_3} + \frac{6 \cdot M_1}{h_3^2};\quad \sigma_2 = \frac{N_2}{h_в} + \frac{6M_2}{h_в^2}. \quad (30)$$

Для дна: радиальное и тангенциальное усилия [5]:

$$M_r(r) = -D_{дн}\left(\frac{d\varphi_{дн}}{dr} + \frac{\nu}{r}\varphi_{дн}\right) = M_0 - \frac{p_1R^2(3+\nu)}{16} + \frac{p_1r^2(3+\nu)}{16}, \quad (31)$$

$$M_\theta(r) = -D_{дн}\left(\nu\frac{d\varphi_{дн}}{dr} + \frac{\varphi_{дн}}{r}\right) = M_0 - \frac{p_1R^2(3+\nu)}{16} + \frac{p_1r^2(3\nu+1)}{16}. \quad (32)$$

Максимальные нормальные радиальное и тангенциальное напряжения в днище рассчитываем из выражений [3]:

$$\sigma_r = \frac{6 \cdot M_r}{h_1^2};\qquad \sigma_\theta = \frac{6 \cdot M_\theta}{h_1^2}. \quad (33)$$

Наибольшие моменты $M_r(r)$ и $M_\theta(r)$ в днище возникают в центре днища при r=0:

$$M_r = M_\theta = M_0 - \frac{p_1R^2(3+\nu)}{16}. \quad (34)$$

Условие прочности по 4 теории прочности для цилиндра имеет вид [3]:

$$\sigma_{экв} = \sqrt{\frac{1}{2}[\sigma_1{}^2 + (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + \sigma_2{}^2]} \le [\sigma]. \quad (35)$$

Для дна:

$$\sigma_{экв} = \sigma_r = \sigma_\theta \le [\sigma]. \quad (36)$$

Вышеуказанные выражения позволяют провести уточненный расчет прочности для резервуаров вертикального исполнения различной вместимости и степени заполнения на упруго-податливом основании.

В качестве примера практического применения предложенных выражений рассмотрим стальную бочку объёмом 200 л. Геометрические размеры стандартной бочки с несъёмным (герметичным) верхним дном типа 1А1 представлены в [6]. На рисунке 2 представлена схема бочки [6].

Внутренний диаметр d_1=564 мм, высота H_1=860 мм, h_3=4 мм (минимальное расстояние нижнего дна от пола), толщина стенки и дна равны 1,5 мм, ν=0,3.Предположим, что бочка заполнена дизельным топливом с плотностью 860 кг/м^3.

Максимальный прогиб дна возникает при r=0 и его значение из (18) $\omega_{дн}^{max} = C_1 = 2{,}54$ мм, что меньше 4 мм (минимальное расстояние нижнего дна от пола), следовательно, для расчета можно положить, что реализуется упруго-податливое состояние, для которого по формуле (28), $M_0 = 45{,}3$ Нм/м

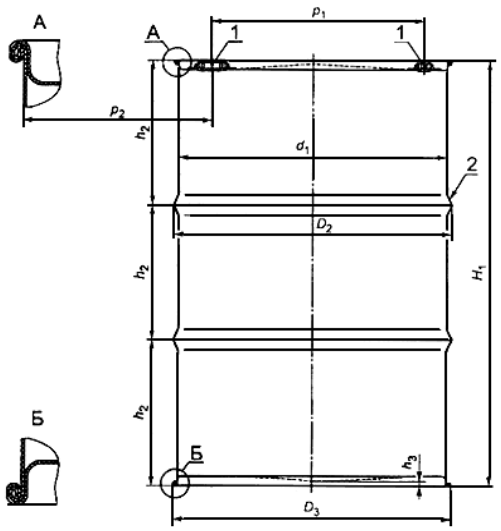

Рисунок 2 – Бочка с несъёмным (герметичным) верхним дном типа 1А1

1 - горловина; 2 - гофр; d_1 - внутренний диаметр; D_2 - наружный диаметр по гофрам катания; D_3 - наружный диаметр по закатному шву; H_1- габаритная высота бочки; h_2 - расстояние между гофрами; h_3 - расстояние нижнего дна от пола; p_1 - расстояние между центрами горловин; p_2 - расстояние от оси заливной горловины до наружной поверхности корпуса, измеренное в 50 мм от верха бочки

Расчет M_0 для жесткого дна можно провести по формуле [7]:

$$M_0 = \left(1 - \frac{1}{\ell\beta_ц}\right)\frac{\gamma\ell R h_в}{\sqrt{12\,(1-\nu^2)}}. \quad (37)$$

Подставляя данные в формулу (37), получаем M_0=0,84 Н·м/м, что в 54 раза меньше M_0для упруго-податливого основания. В этом случае, например, напряжения в дне уменьшаются в 54 раза. Это может быть реализовано установлением конструкции для обеспечения жесткого основания для дна. Таким образом, представленная методика позволяет осуществлять проверку прочности резервуаров, и на этой основе осуществлять выбор основания для различных типов резервуаров.

Выводы. Приведено решение задачи расчета на прочность вертикальных ёмкостей на упруго-податливой опоре. Представленная методика позволяет осуществлять проверку на прочность вертикальных резервуаров на упруго-пластичном основании при установленных объемах заполнения, удельного веса жидкости, механических характеристик материала резервуара. Получены расчетные выражения напряжений в цилиндрической части и дна резервуара, по которым можно провести уточненный расчет на прочность.

Показано, что повышение жесткости дна резервуара обеспечивает уменьшение напряжений в десятки раз по сравнению с упруго-податливым основанием.

Полученные данные можно использовать при инженерном расчете различных резервуаров, установленных на упруго-податливом основании.

Также представленные расчетные формулы позволяют обосновывать тип основания для установки конкретных резервуаров, исходя из их прочностных характеристик.

Список используемой литературы

1. Терентьев В.В., Смирнов С.Ф., Максимовский Ю.М., Краснов А.А. Расчет начальной надежности деталей машин методом двух моментов // Аграрный вестник Верхневолжья. 2021. № 4 (37). С. 73-76.
2. Лебедев В.Д., Смирнов С.Ф., Терентьев В.В. Расчет механической надежности корпуса трансформатора // Аграрный вестник Верхневолжья. 2021. № 3 (36). С. 63-69.
3. ГОСТ 31385-2016. Межгосударственный стандарт. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. Введ. 01.03.2017. М.: «Стандартинформ», 2016.
4. А.А. Амосов Техническая теория тонких упругих оболочек. М.: Издательство АСВ, 2009.
5. Варданян Г.С., Андреев В.И., Атаров Н.М., Горшков А.А. Сопротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. 2-е изд., испр. и доп. М.: ИНФРА-М, 2014.
6. ГОСТ 13950-91 Бочки стальные сварные и закатные с гофрами на корпусе. Технические условия. Введ. 01.01.1993. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.
7. Тимошенко С.П. Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. М.: Наука, 1966.

References

1. Terentev V.V., Smirnov S.F., Maksimovskiy Yu.M., Krasnov A.A. Raschet nachalnoy nadezhnosti detaley mashin metodom dvukh momentov // Agrarny vestnik Verkhnevolzhya. 2021. № 4 (37). S. 73-76.
2. Lebedev V.D., Smirnov S.F., Terentev V.V. Raschet mekhanicheskoy nadezhnosti korpusa transformatora // Agrarny vestnik Verkhnevolzhya. 2021. № 3 (36). S. 63-69.
3. GOST 31385-2016. Mezhgosudarstvennyy standart. Rezervuary vertikalnye tsilindricheskie stalnye dlya nefti i nefteproduktov. Obshchie tekhnicheskie usloviya.Vved. 01.03.2017. M.: «Standartinform», 2016.
4. A.A. Amosov Tekhnicheskaya teoriya tonkikh uprugikh obolochek. M.: Izdatelstvo ASV, 2009.
5. Vardanyan G.S., Andreev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. Soprotivlenie materialov s osnovami teorii uprugosti i plastichnosti. 2-e izd., ispr. i dop. M.: INFRA-M, 2014.
6. GOST 13950-91Bochki stalnye svarnye i zakatnye s goframi na korpuse. Tekhnicheskie usloviya. Vved. 01.01.1993. M.: IPK Izdatelstvo standartov, 2002.
7. TimoshenkoS.P. Voynovskiy-Kriger S. Plastinki i obolochki. M.: Nauka, 1966.