

ОБОСНОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЖЕКТОРА ТЕРМОВАКУУМНОГО ЭКСТРУДЕРА

Курочкин Анатолий Алексеевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Пищевые производства»

Фролов Дмитрий Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Пищевые производства»

ФГБОУ ВО «Пензенский государственный технологический университет»
440039, г. Пенза, проезд Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11; тел.: 8(8412)49-56-99;
e-mail: anatolij_kuro@mail.ru

Ключевые слова: экструдер, энергоэффективность, термовакуумная экструзия, моделирование, аэродинамические параметры, воздушный поток, вакуумный насос.

В статье описана новая конструктивно-технологическая схема термовакуумного экструдера, в которой камеры предварительного и окончательного обезвоживания готового продукта взаимодействуют между собой с помощью эжектора. Откачиваемый из камеры окончательного обезвоживания пар посредством вакуумного насоса перемещается в высоконапорную область эжектора и выводится за его пределы для регенерации тепловой энергии, затраченной на реализацию технологического процесса машины. Одновременно данный воздушный поток обеспечивает перемещение пара из камеры предварительного обезвоживания экструдера в низконапорную область эжектора. С целью обоснования аэродинамических параметров эжектора методами компьютерного моделирования на базе пакета Solidworks Flow Simulation получена модель эжектора термовакуумного экструдера, а также выполнен ее конечно-элементный анализ. Аэродинамическое исследование эжектора позволило сделать проверку работоспособности схемы и анализ степени удаления пара из камеры предварительного обезвоживания экструдата. Течение воздуха в эжекторе исследовано для получения данных о требуемой производительности (подаче) вакуумного насоса и карты распределения потоков воздуха и давлений. В процессе моделирования объекта исследований были получены карты распределения давлений внутри эжектора и давления на входе в низконапорное сопло. При расчете рассмотрена модель эжектора с начальными условиями объемного расхода $4 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $8 \text{ м}^3/\text{ч}$ для входящего высоконапорного потока. Полученные результаты позволили обосновать потребный расход вакуумного насоса и оценить степень удаления пара из камеры предварительного обезвоживания. Конечной целью представленных в работе данных является повышение энергоэффективности термовакуумной обработки растительного сырья и упрощение технологических регулировок оборудования для ее реализации.

Введение

Термовакуумный эффект в технологии экструзии пищевого сырья улучшает рабочий процесс и обеспечивает нужный коэффициент взрыва экструдата при меньших давлении и температуре [1, 2]. Ранее выполненные исследования свидетельствуют о влиянии различных переменных процесса экструзии и конфигурации экструдера на свойства композитных смесей экструдатов [3 – 14].

Теоретический анализ процесса термовакуумной экструзии, основанный на изучении рассмотренных в предыдущих исследованиях конструктивно-технологических схемах экструдеров с вакуумными камерами [15], выявил следующие недостатки:

- теплота выделяющегося в процессе декомпрессионного взрыва водяного пара полезно не используется;

- пар конденсируется в процессе его соприкосновения с внутренней стороной стенки вакуумной камеры экструдера, а образующийся

конденсат снижает эффективность обезвоживания получаемого продукта;

- эффективность технологического процесса экструдера существенно снижается при обработке сырья с влажностью более 30 %;

- сложность регулирования влажности готового продукта.

Одним из путей устранения отмеченных технических и технологических противоречий является введение в конструктивно-технологическую схему термовакуумного экструдера эжектора, обеспечивающего совместное функционирование камер предварительного и окончательного обезвоживания готового продукта.

Известно, что для сжатия хладагентов в системах охлаждения, перекачки летучих жидкостей или создания вакуума нашли применение различные виды и типы эжекторов, в том числе – сверхзвуковые [16]. Основная задача таких эжекторов – достижение максимального уровня вакуума и увеличение скорости всасывания, которые в наибольшей степени зависят от

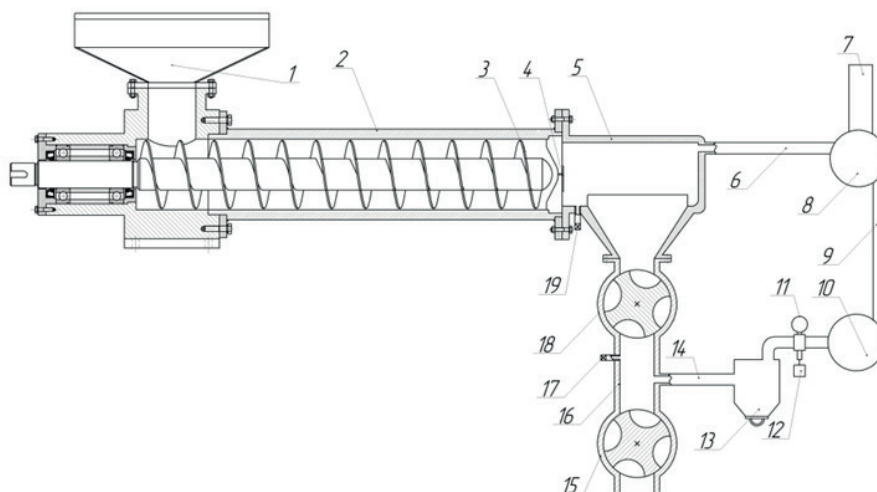


Рис. 1 – Конструктивно-технологическая схема модернизированного экструдера: 1 – загрузочная камера; 2 – корпус; 3 – шнек; 4 – фильера матрицы; 5 – воздушная камера предварительного обезвоживания; 6, 9, 14 – трубопроводы; 7 – выводной патрубок эжектора; 8 – газовый эжектор; 9 – вакуум-регулятор; 10 – вакуумный насос; 11 – вакуум-метр; 12 – вакуум-регулятор; 13 – вакуум-баллон; 15, 18 – шлюзовые затворы; 16 – вакуумная камера окончательного обезвоживания; 17, 19 – воздушные краны

параметров эжектирующего потока. При этом следует отметить, что для работы эжектора существенное значение имеют и свойства эжектируемого (индуцированного) потока воздуха, который проходит через второе сопло [17].

Анализ рабочего процесса эжекторов показывает, что использование многоступенчатых вакуумных эжекторов более предпочтительно по сравнению с одноступенчатыми, так как позволяет создать более высокий вакуум в низконапорном сопле [18]. С другой стороны, в камере предварительного обезвоживания продукта термовакуумного экструдера не предполагается применение высокого вакуума.

Целью работы является аэродинамическое исследование эжектора с проверкой работоспособности конструктивно-технологической схемы модернизированного термовакуумного экструдера.

Задачей исследования является анализ степени удаления пара из камеры предварительного обезвоживания экструдата путем компьютерного моделирования аэродинамики потока воздуха в эжекторе экструдера, конструктивно-технологическая схема которого приведена на рисунке 1.

Экструдер состоит из загрузочной камеры 1, корпуса 2, шнека 3, фильеры матрицы 4, воздушной камеры предварительного обезвоживания 5, вакуумной камеры окончательного обезвоживания 16, двух шлюзовых затворов 15 и 18, вакуум-насоса 10, вакуум-метра 11, вакуум-регулятора 12 и вакуум-баллона 13.

Камера предварительного обезвоживания 5 расположена соосно корпусу экструдера 2 и соединена трубопроводом 6 с элементом газового эжектора 8, замкнутым на пассивный (эжектируемый) поток. Для впуска воздуха в камеру предусмотрен воздушный кран 19.

Вакуумная камера окончательного обезвоживания 16 расположена последовательно с камерой 5 и ограничена с обеих сторон шлюзовыми затворами 18 и 15. Для впуска воздуха в вакуумную камеру служит воздушный кран 17.

С вакуум-баллоном 13 вакуумная камера окончательного обезвоживания соединена трубопроводом 14.

Для создания в вакуум-баллоне 13 и соответственно в вакуумной камере 16 пониженного (ниже атмосферного) давления в экструдере предусмотрен вакуумный насос 10. Выходной патрубок вакуум-насоса с помощью трубопровода 9 соединен с активной (эжектирующей) линией эжектора 8.

Вакуум-регулятор 12 необходим для регулирования и поддержания заданного давления в вакуум-баллоне 13. Для контроля давления в вакуум-баллоне экструдера служит вакуум-метр 11.

Попадая из области высокого давления в камеру предварительного обезвоживания 5, сырье подвергается декомпрессионному взрыву во время которого вода превращается в пар. При испарении жидкости с поверхности экструдата его температура снижается. Горячий пар образует с температурой 120...130 °С и отса-

сывается по трубопроводу 6 с помощью активного потока эжектора 8. Из вакуумной камеры окончательного обезвоживания 16 пар удаляется вакуумным насосом. Таким образом, эжектор позволяет удалить пар из воздушной камеры предварительного обезвоживания 5 с помощью воздушного потока, создаваемого вакуумным насосом 10.

Объем удаляемого пара из камер предварительного и окончательного обезвоживания, а вместе с ним и влажность готового продукта достаточно просто регулируются с помощью воздушных кранов 19 и 17.

Материалы и методы исследований

Теоретические исследования опирались на свойства и термодинамические характеристики водяного пара. Для проведения численного моделирования и симуляции движения воздуха был использован пакет газогидродинамического анализа SolidWorks FlowSimulation. Функции потока для движущейся среды и другие аэродинамические характеристики определяли в FlowSimulation [19, 20]. Модель течения потока воздуха рассчитывали на основе уравнений гидроаэромеханики, включающих:

– уравнение Навье – Стокса:

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F - \text{grad } p + (\xi + \mu) \text{grad div}(v) + \mu \Delta v, (1)$$

где ρ – плотность, кг/м³; v – скорость среды, м/с; F – вектор объемной силы, Н/м³; p – давление текущей среды, Па; μ, ξ – соответственно коэффициенты динамической и объемной вязкости, Па·с; t – время, с;

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho v) = 0 (2)$$

– уравнение энергии:

$$c_p \rho \frac{dT}{dt} - \frac{dp}{dt} = q + \text{div}(\lambda \text{grad } T) + \left\{ \xi (\text{div } v)^2 + 2\mu \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + \mu \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right)^2 \right] \right\}, (3)$$

где c_p – удельная теплоёмкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К); q – количество теплоты, подводимое к единице объёма в единицу времени от немеханических причин, Дж/(м³·с); T – абсолютная температура воздуха, К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); x, y, z – координаты осей, м; v_x, v_y, v_z – составляющие скорости вдоль осей x, y и z , м/с;

– уравнение состояния:

$$p = f_1(\rho, T), \quad S = f_2(\rho, T), (4)$$

где S – энтропия, Дж/К.

Начальные условия приведены в таблице

1. Скорость потока воздуха в начальный момент времени $v_x = v_y = v_z = 0$ м/с.

Таблица 1

Начальные условия при моделировании движения воздуха в эжекторе

| Параметр | Значение |
|---|-------------------|
| Термодинамические: статическое давление, Па; температура, К | 101325 293,2 |
| Турбулентности: интенсивность, %; длина, м | 2,00 4,620E-04 |

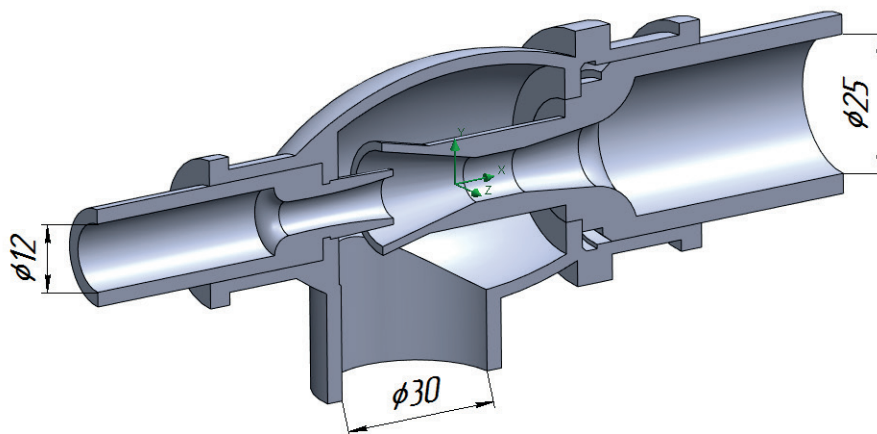


Рис. 2 – Общий вид модели и конструктивные параметры эжектора

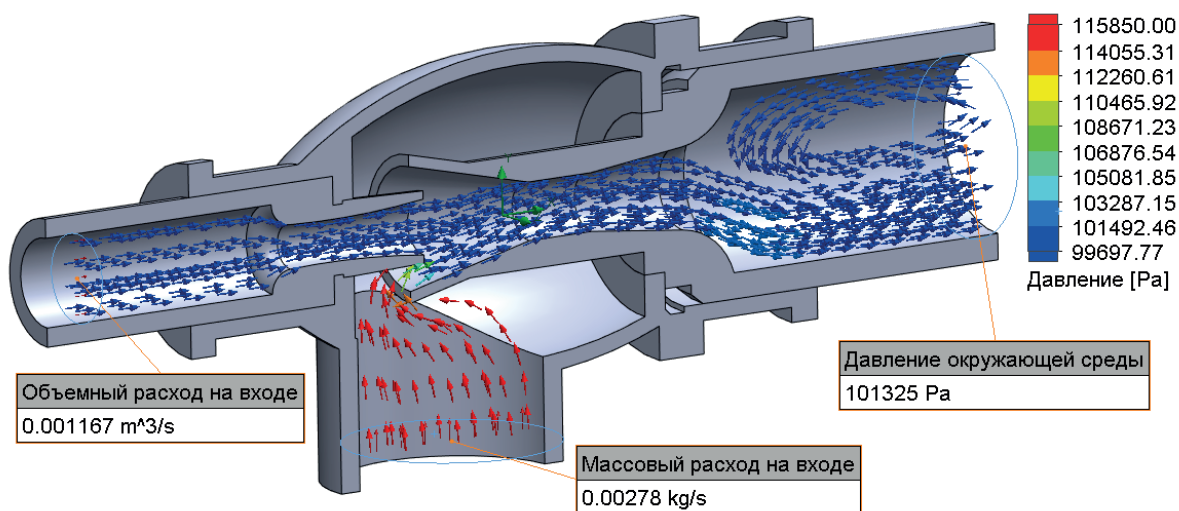


Рис. 3 – Траектории движения воздуха и распределение давления внутри эжектора при объемном расходе 4 м³/ч

В качестве целей для вычисления сходимости расчетов были выбраны средние значения полного давления воздуха, Па и скорости воздуха, м/с.

Диаметры отверстий модели эжектора: входного высоконапорного отверстия – 12 мм, входного низконапорного отверстия – 30 мм, выходного отверстия – 25 мм (рис. 2).

Параметры расчетной сетки: все ячейки – 2458, ячейки в текучей среде – 1435. При расчете рассмотрена модель эжектора с начальными условиями объемного расхода 4 м³/ч (0,001167 м³/с) и 8 м³/ч (0,002333 м³/с) для входящего высоконапорного потока. В качестве граничного условия задан входной массовый расход 0,00278 кг/с в низконапорном отверстии эжектора.

Результаты исследований

Полученные при моделировании аэродинамические характеристики воздушного потока внутри эжектора при входном объемном расходе 4 м³/ч (0,001167 м³/с) представлены в таблице 2.

Таблица 2

Аэродинамические характеристики воздушного потока внутри эжектора при входном объемном расходе 4 м³/ч

| Параметр | Значения параметров | |
|---------------------------------|---------------------|--------------|
| | минимальное | максимальное |
| Плотность потока воздуха, кг/м³ | 1,18 | 1,38 |
| Давление, Па | 99697 | 115850 |
| Скорость, м/с | 0 | 137 |
| Завихренность, 1/с | 3,47E-04 | 42838 |

Результаты моделирования траекторий частиц воздуха и распределение давления внутри эжектора представлены на рисунках 3 и 4. Средняя скорость воздуха приблизительно равна 22,4 м/с.

Аэродинамические характеристики воздушного потока внутри эжектора при входном объемном расходе 8 м³/ч (0,002333 м³/с) представлены в таблице 3.

Таблица 3

Аэродинамические характеристики воздушного потока внутри эжектора при входном объемном расходе 8 м³/ч

| Параметр | Значения параметров | |
|---------------------------------|---------------------|--------------|
| | минимальное | максимальное |
| Плотность потока воздуха, кг/м³ | 1,18 | 1,38 |
| Давление, Па | 98432 | 116132 |
| Скорость, м/с | 0 | 136 |
| Завихренность, 1/с | 3,18E-04 | 42903 |

На рисунке 4 изображены траектории воздушного потока и распределение давления внутри эжектора при объемном расходе 8 м³/ч. Средняя скорость воздуха приблизительно равна 29,7 м/с.

Обсуждение

Анализируя данные, полученные для входящих потоков воздуха внутри эжектора, можно отметить следующие закономерности:

- разница создаваемых давлений для входящих потоков воздуха составляет в среднем 1 кПа;
- средняя скорость потока отличается в

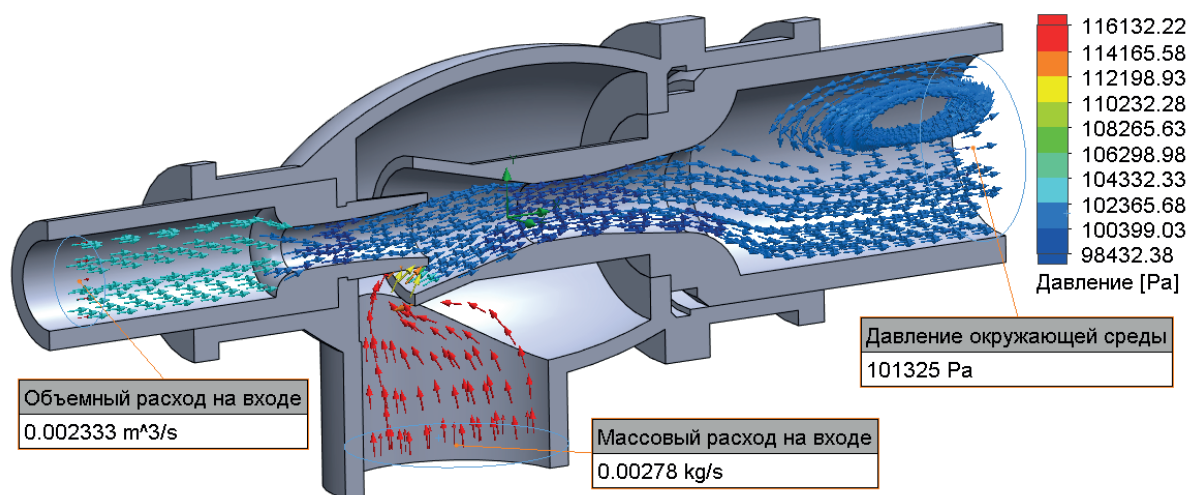


Рис. 4 – Траектории движения воздуха и распределение давления внутри эжектора при объемном расходе 8 м³/ч

пределах 7 м/с;

– средние давления, измеренные в сечении входящего низконапорного сопла, составляют 115755,7 Па и 116038,2 Па соответственно;

– при применении более мощного вакуумного насоса разница между давлениями составляет в среднем 1 кПа;

– объемный расход через низконапорное отверстие эжектора соответствует объему удаляемого пара из камеры предварительного обезвоживания.

Заключение

Полученные в результате выполненных исследований карты распределения скоростей и давлений внутри моделируемого эжектора позволяют рекомендовать для использования вакуумный насос с подачей 4 м³/ч (0,001167 м³/с). Такой параметр насоса обеспечивает приемлемую степень удаления пара из камеры предварительного обезвоживания, а также позволяет повысить энергоэффективность рабочего процесса вакуумного экструдера и упростить его технологические регулировки посредством изменения количества подсосываемого воздуха с помощью воздушных кранов камер модернизированной машины.

Библиографический список

1. Potapov, M.A. Equalization of the moisture content of the mixture for obtaining fertilizers from high-moisture waste of poultry farming by extrusion / M.A. Potapov, A.A. Kurochkin, D.I. Frolov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. - 2020. T. - 1001. - С. 012029.

2. Технология вакуумно-импульсного экс-

трагирования растворимых веществ из крапивы и хмеля / А.А. Гуськов [и др.] // Инновационная техника и технология. - 2018. - № 2 (15). - С. 23–27.

3. Бахчевников, О.Н. Экструдирование растительного сырья для продуктов питания (обзор) / О.Н. Бахчевников, С.В. Брагинец // Техника и технология пищевых производств. - 2020. - Т. 50. - № 4. - С. 690–706.

4. Numerical optimization of process parameters of ready-to-eat (RTE) iron rich extruded snacks for anemic population / S. Suri [et al.] // LWT. 2020. Vol. 134. P. 110164.

5. Sahu, C. Moisture sorption characteristics and quality changes during storage in defatted soy incorporated maize-millet based extruded product / C. Sahu S. Patel // LWT. - 2020. - Vol. 133. - P. 110153.

6. Water solubility index and water absorption index of extruded product from rice and carrot blend / N. Yousf, F. Nazir, R. Salim // Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry. - 2017. - Vol. 6, № 6. - P. 2165-2168.

7. Effects of extrusion variables on corn-mango peel extrudates properties, torque and moisture loss / M. M. Mazlan, R. A. Talib, N. F. Mail [et al.] // International Journal of Food Properties. - 2019. - Vol. 22, № 1. - P. 54-70. DOI: 10.1080/10942912.2019.1568458.

8. Single-pass, double-pass and acid twin-screw extrusion-cooking impact physicochemical and nutrition-related properties of wheat bran / C. Roye [et al.] // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2020. Vol. 66. P. 102520.

9. Extruded whole grain flours and sprout

millet as functional ingredients for gluten-free bread / R. Comettant-Rabanal [et al.] // LWT. 2021. - Vol. - 150. P. 112042.

10. Extrusion-Cooking Modifies Physicochemical and Nutrition-Related Properties of Wheat Bran / C. Roye [et al.] // Foods. - 2020. Vol. 9. - № 6. - P. 738.

11. Файвишевский, М.Л. Использование термопластической экструзии в производстве кормовой муки животного происхождения / М.Л. Файвишевский // Мясные технологии. - 2019. - № 3 (195). - С. 24–27.

12. Гукасян, А.В. Параметрическая модель эффективной вязкости упруго-пластичного масляного материала в канале экструдера / А.В. Гукасян, Д.А. Шпилько // Вестник Керченского государственного морского технологического университета. - 2019. - № 4. - С. 130–139.

13. Кошевой, Е.П. Теоретическое рассмотрение деформирования материала на выходе экструдера / Е.П. Кошевой, В.С. Косачев, З.А. Меретуков // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. - 2004. - № 5-6 (282-283). - С. 86–88.

14. Королев, А.А. Разработка технологии экструдированных поликомпонентных пищевых концентратов / А.А. Королев, Л.Я. Корнева, И.С. Коптяева // Инновационные технологии производства и хранения материальных ценностей для государственных нужд. 2017. № 8 (8). С. 235–244.

15. Kurochkin, A.A. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber / A.A. Kurochkin, D.I. Frolov, V.M. Zimnyakov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. - 2021. - Vol. 640. - № 7. - P. 072018.

16. Macià, L. Simulation of ejector for vacuum generation / L. Macià, R. Castilla, P. Gamez-Montero // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2019. - T. 659. - C. 012002.

17. Jafarian, A. Experimental and numerical investigation of transient phenomena in vacuum ejectors / A. Jafarian, M. Azizi, P. Forghani // Energy. - 2016. - T. 102. - C. 528–536.

18. Mohammadi, A. An investigation of geometrical factors of multi-stage steam ejectors for air suction / A. Mohammadi // Energy. - 2019. - T. 186. C. 115808.

19. Frolov, D.I. Numerical Simulation of the Working Bodies of the Machine for Removing the Tops of Vegetable Crops / D.I. Frolov, A.A. Kurochkin // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 720. № 1. P. 012028.

20. Лулева С.К. Моделирование процессов тепломассопереноса в программной среде solidworks/flowsimulation / С.К. Лулева // Технико-технологические проблемы сервиса. - 2018. - № 2 (44). - С. 27–31.

SUBSTANTIATION OF AERODYNAMIC PARAMETERS OF THERMAL VACUUM EXTRUDER EJECTOR

Kurochkin A.A., Frolov D.I.
FSBEI HE "Penza State Technological University"
440039, Penza, Baydukova dr. / Gagarina st., 1a / 11; tel.: 8 (8412) 49-56-99;
e-mail: anatolii_kuro@mail.ru

Key words: extruder, energy efficiency, thermal vacuum extrusion, modeling, aerodynamic parameters, air flow, vacuum pump.

The article describes a new structural and technological scheme of a thermal vacuum extruder, where chambers for preliminary and final dehydration of the finished product interact with each other by means of an ejector. The steam pumped out of the final dehydration chamber by means of a vacuum pump moves to the high-pressure part of the ejector and is removed outside for regeneration of the thermal energy spent on machine technological process. Simultaneously, this air flow ensures the steam movement from preliminary dehydration chamber of the extruder to the low-pressure part of the ejector. In order to substantiate the aerodynamic parameters of the ejector by computer simulation methods, an ejector model of a thermal vacuum extruder was obtained on the basis of Solidworks Flow Simulation package, and its finite element analysis was also performed. The aerodynamic study of the ejector enabled to check the scheme operability and analyze the degree of steam removal from the chamber for preliminary dehydration of the extrudate. The air flow in the ejector was studied to obtain data on the required capacity (supply) of the vacuum pump and a map of distribution of air flows and pressures. Maps of pressure distribution inside the ejector and the pressure at the inlet to the low-pressure nozzle were obtained in the process of modeling the object of the research. We considered a model of an ejector with the initial volume parameters of the flow rate of 4 m³ / h and 8 m³ / h for the incoming high-pressure flow. The obtained results made it possible to substantiate the required flow rate of the vacuum pump and evaluate the degree of steam removal from the preliminary dehydration chamber. The ultimate goal of the data presented in the work is to increase energy efficiency of thermal vacuum treatment of plant raw materials and to simplify technological equipment adjustments for its implementation.

Bibliography:

1. Potapov, M.A. Equalization of the moisture content of the mixture for obtaining fertilizers from high-moisture waste of poultry farming by extrusion / M.A. Potapov, A.A. Kurochkin, D.I. Frolov // IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. - 2020.V. - 1001. - P. 012029.
2. Technology of vacuum-pulse extraction of soluble substances from nettle and hop / A.A. Guskov [et al.] // Innovative equipment and technology. - 2018. - № 2 (15). - P. 23–27.
3. Bakhchevnikov, O.N. Extrusion of vegetable raw materials for food products (review) / O.N. Bakhchevnikov, S.V. Braginet // Technics and technology of food production. - 2020. - V. 50. - № 4. - P. 690–706.
4. Numerical optimization of process parameters of ready-to-eat (RTE) iron rich extruded snacks for anemic population / S. Suri [et al.] // LWT. 2020. Vol.

134. P. 110164.

5. Sahu, C. Moisture sorption characteristics and quality changes during storage in defatted soy incorporated maize-millet based extruded product / C. Sahu S. Patel // *LWT*. - 2020. - Vol. 133. - P. 110153.

6. Water solubility index and water absorption index of extruded product from rice and carrot blend / N. Yousf, F. Nazir, R. Salim // *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*. - 2017. - Vol. 6, No. 6. - P. 2165-2168.

7. Effects of extrusion variables on corn-mango peel extrudates properties, torque and moisture loss / M. M. Mazlan, R. A. Talib, N. F. Mail [et al.] // *International Journal of Food Properties*. - 2019. - Vol. 22, No. 1. - P. 54-70. DOI: 10.1080/10942912.2019.1568458.

8. Single-pass, double-pass and acid twin-screw extrusion-cooking impact physicochemical and nutrition-related properties of wheat bran / C. Roye [et al.] // *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. Vol. 66. P. 102520.

9. Extruded whole grain flours and sprout millet as functional ingredients for gluten-free bread / R. Comettant-Rabanal [et al.] // *LWT*. 2021. - Vol. - 150. P. 112042.

10. Extrusion-Cooking Modifies Physicochemical and Nutrition-Related Properties of Wheat Bran / C. Roye [et al.] // *Foods*. - 2020. Vol. 9. - No. 6. - P. 738.

11. Faivishevsky, M.L. Application of thermoplastic extrusion in production of animal feed flour / M.L. Faivishevsky // *Meat technologies*. - 2019. - № 3 (195). - P. 24–27.

12. Ghukasyan, A.V. Parametric model of effective viscosity of elastic-plastic oil-bearing material in the extruder channel / A.V. Ghukasyan, D.A. Shpilko // *Vestnik of Kerch State Marine Technological University*. - 2019. - № 4. - P. 130–139.

13. Koshevoy, E.P. Theoretical consideration of material deformation at the output of the extruder / E.P. Koshevoy, V.S. Kosachev, Z.A. Meretukov // *News of higher educational institutions. Food technology*. - 2004. - № 5-6 (282-283). - P. 86–88.

14. Korolev, A.A. Development of technology for extruded multicomponent food concentrates / A.A. Korolev, L. Ya. Korneva, I.S. Koptyaeva // *Innovative technologies for production and storage of material assets for the state needs*. 2017. № 8 (8). P. 235–244.

15. Kurochkin, A.A. Extrudate dehydration rate increase by modernization of the extruder vacuum chamber / A.A. Kurochkin, D.I. Frolov, V.M. Zimnyakov // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. - 2021. - Vol. 640. - No. 7. - P. 072018.

16. Macià, L. Simulation of ejector for vacuum generation / L. Macià, R. Castilla, P. Gamez-Montero // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. - 2019. - V. 659. - P. 012002.

17. Jafarian, A. Experimental and numerical investigation of transient phenomena in vacuum ejectors / A. Jafarian, M. Azizi, P. Forghani // *Energy*. - 2016. - V. 102. - P. 528–536.

18. Mohammadi, A. An investigation of geometrical factors of multi-stage steam ejectors for air suction / A. Mohammadi // *Energy*. - 2019. - V. 186. P. 115808.

19. Frolov, D.I. Numerical Simulation of the Working Bodies of the Machine for Removing the Tops of Vegetable Crops / D.I. Frolov, A.A. Kurochkin // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 720. No. 1. P. 012028.

20. Luneva S.K. Modeling of heat and mass transfer processes in the solidworks / flowsimulation software / S.K. Luneva // *Technical and technological problems of service*. - 2018. - № 2 (44). - P. 27–31.