

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

УДК 664.769

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ЭКСТРУДЕРА

А. А. Курочкин

В работе представлены результаты теоретических исследований по определению основных параметров вакуумной системы модернизированного экструдера. Получено аналитическое выражение зависимости давления в вакуумной камере экструдера от содержания влаги в обрабатываемом сырье и готовом продукте, площади поперечного сечения вакуумпровода, объема камеры и давления в вакуумной системе экструдера.

Ключевые слова: пористая структура, экструдат, фильера матрицы, объем, вакуумная камера.

Введение

Результаты многочисленных исследований свидетельствуют о том, что пористая структура экструдатов, получаемых из растительного крахмалсодержащего сырья, предопределяет такие их свойства как набухаемость, водо- и жиродерживающая способность, растворимость, коэффициент расширения и др., которые в свою очередь влияют на текстуру, усвояемость и качество готовых продуктов [1, 7, 10, 13, 14].

При этом также известно, что формирование пористой макроструктуры экструдатов в определяющей степени зависят от содержания крахмала в сырье и «взрывного» испарения воды при выходе обрабатываемого материала из фильеры матрицы машины [8].

В связи с тем, что в условиях пониженного давления вода испаряется при температуре, которая существенно ниже температуры парообразования при атмосферном давлении, необходимая интенсивность декомпрессионного воздействия на экструдированное сырье может быть обеспечена за счет замены атмосферного давления, действующего на экструдат при выходе его из фильеры, на пониженное давление (вакуум) [9,11].

Практическая реализация данной научной концепции позволила разработать экструдер (рис. 1), который состоит из загрузочной камеры, корпуса, шнека, фильеры, вакуумной камеры, шлюзового затвора и вакуум-насоса.

Вакуумная камера экструдера расположена соосно шнеку и фильере матрицы. Она включает в себя режущее устройство, вакуумную систему и шлюзовой затвор.

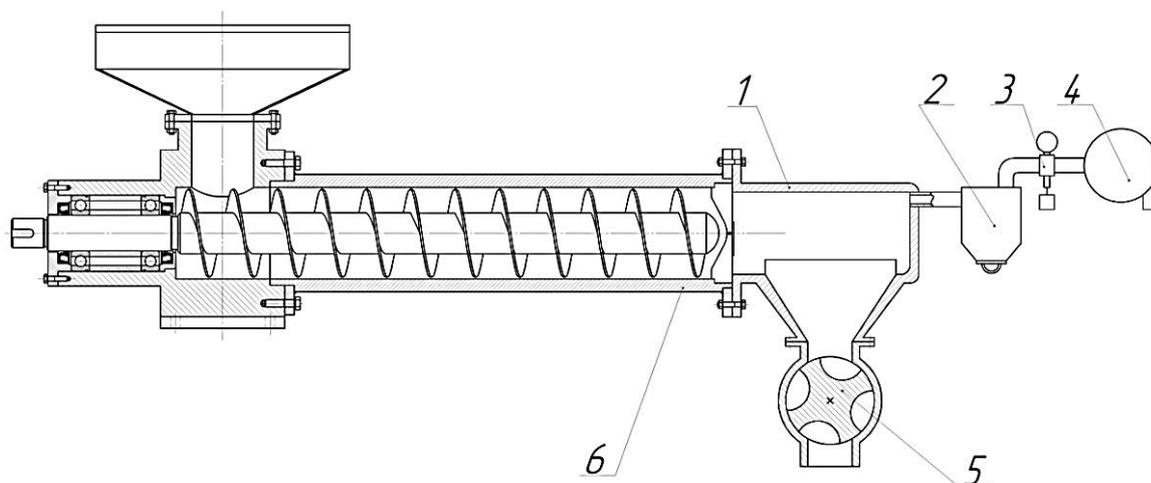


Рис. 1. Экструдер с вакуумной камерой:

1 – вакуумная камера; 2 – вакуум-баллон; 3 – вакуум-регулятор; 4 – вакуум-насос; 5 – шлюзовой затвор; 6 – экструдер

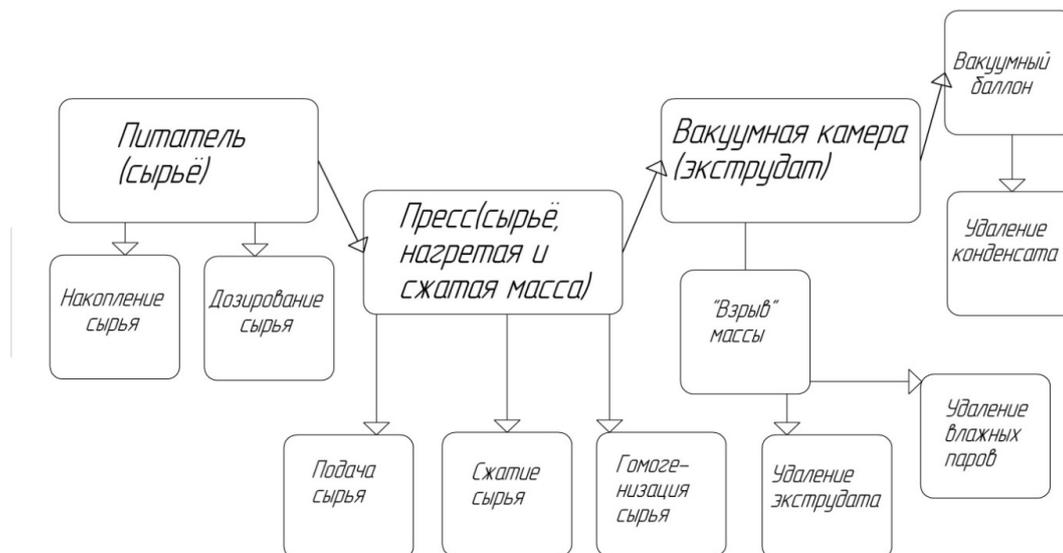


Рис. 2. Схема рабочего процесса экструдера

Режущее устройство (на рис. 1 не показано) выполнено в виде одного или нескольких вращающихся ножей, закрепленных на корпусе экструдера в месте выхода экструдата из фильеры.

В вакуумную систему экструдера входят вакуум-насос, вакуум-регулятор и вакуум-баллон.

Вакуум-насос необходим для создания в вакуумной камере экструдера пониженного давления (давления ниже атмосферного).

Вакуум-регулятор служит для поддержания пониженного давления в вакуумной камере экструдера в заданных пределах для обеспечения необходимой производительности машины, а также переработки сырья и получения продукта с различным содержанием воды.

Для предохранения насоса от попадания в него жидкости, а также сбора конденсата и выравнивания разрежения в вакуумной линии, между ней и насосом устанавливают вакуум-баллон.

Шлюзовой затвор служит для непрерывного отвода полученного экструдата за пределы вакуумной камеры без ее разгерметизации.

Рабочий процесс экструдера с вакуумной камерой осуществляется следующим образом (рис. 2).

Исходное сырьё посредством загрузочной камеры направляется в шнековую часть экструдера. Захваченный шнеком продукт последовательно проходит все рабочие зоны машины и через фильеру матрицы поступает в вакуумную камеру.

В условиях быстрого перехода экструдата из области высоких давлений в условия пониженного давления, происходит декомпрессионный взрыв: вода, находящаяся в продукте, переходит в паровое состояние с выделением значительного количества энергии, что приводит к деструкции

клеточных структур обрабатываемого сырья и получению высокопористого продукта.

Экструдат при выходе из фильеры матрицы с помощью режущего устройства разрезается на частицы размером 1,0...4,0 мм.

Продолжительность обработки сырья в экструдере составляет 15...25 с при температуре 100...110 °С. Содержание влаги в экструдированном продукте регулируется за счет давления в вакуумной камере с помощью вакуум-регулятора [9, 11].

Цель работы – теоретические исследования рабочего процесса вакуумной системы модернизированного экструдера.

Задачи исследования – определить аналитическими методами зависимость давления в вакуумной камере экструдера от ее объема, рабочего давления в вакуумной системе машины и диаметра вакуумпровода.

Объекты и методы исследований

Принцип работы вакуумной камеры модернизированного экструдера основан на постоянном удалении водяных паров, выделяющихся из экструдата при соответствующих давлении и температуре. Объем этих паров зависит от содержания влаги в сырье и готовом экструдате, а также давления воздуха (водяных паров) в вакуумной камере.

Для условий установившегося (стационарно) режима работы вакуумной камеры, интенсивность откачивания воздуха из нее определяется условием равновесия между количеством влаги, испаряемой с поверхности продукта (экструдата) и объемом водяных паров, отводимых из камеры посредством вакуумного насоса.

В связи с этим для обоснования основных пара-

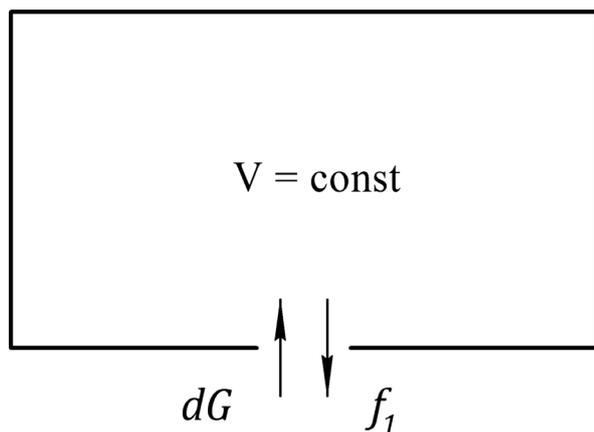


Рис. 3. Расчётная схема вакуумной камеры экструдера

метров вакуумной камеры экструдера необходимо знать законы изменения в ней давления в зависимости от основных параметров рабочего процесса экструдера и самой камеры (давление в вакуумной системе, объем камеры, диаметр вакуумпровода).

Реализация задач исследования связана с рассмотрением модели функционирования вакуумной камеры на «холостом» ходу (при отсутствии в камере экструдата) и во время термовкуумной обработки продукта в процессе его обезвоживания. Расчётная схема функционирования вакуумной камеры экструдера для первого случая представлена на рис. 3. Для данной расчетной схемы будет справедливым считать объем вакуумной камеры экструдера постоянным, а соотношение давлений в камере и за ее пределами не превышающим критического

$$\left(\frac{P_B}{P_a} = 0,578\right).$$

При откачивании воздуха из камеры объёмом V через отверстие с поперечным сечением f_1 количество воздуха будет уменьшаться. И, напротив, при впуске воздуха, его количество будет увеличиваться.

Уравнение баланса воздуха в дифференциальной форме будет иметь вид:

$$dG = \pm dG \quad (1)$$

Знак «+» соответствует впуску воздуха, «-» откачке воздуха из камеры.

В соответствии с принятым допущением об адиабатическом характере исследуемого процесса, уравнение состояния воздуха описывается адиабатой Пуассона [3, 4].

$$PV^k = const \quad (2)$$

где P – рабочее давление в вакуумной камере экструдера.

k – показатель адиабаты.

Удельный объём воздуха, находящегося в вакуумной камере экструдера, равен:

$$g = \frac{V}{M} = \frac{V}{\frac{G}{g}} = \frac{g}{Y_B} \quad (3)$$

где V – текущий объём вакуумной камеры экструдера;

G – вес воздуха, находящегося в камере;

M – масса воздуха;

Y_B – удельный вес воздуха.

С учетом уравнения (3) выражение (2) примет вид

$$P \frac{g^k}{Y_B^k} = const$$

$$\text{или} \quad \frac{P}{Y_B^k} = const = C \quad (4)$$

Вес воздуха можно выразить как

$$G = Y_B \cdot V$$

Тогда из уравнения (4) получим выражение для веса воздуха, находящегося в объёме V :

$$G = C^{\frac{1}{k}} P^{\frac{1}{k}} V \quad (5)$$

В дифференциальной форме это уравнение можно записать как

$$dG = \frac{1}{k} C^{\frac{1}{k}} V P^{\frac{1}{k}-1} dP \quad (6)$$

Для определения правой части уравнения (6) воспользуемся теорией Скроманиса А.А., предложенной им для расчета мембранного пульсатора доильного аппарата [15].

Уравнение состояния газа для вакуумной камеры экструдера имеет вид

$$PV = GRT \quad (7)$$

где R – универсальная газовая постоянная;

При уменьшении давления воздуха на бесконечно малую величину dP в камере также уменьшается вес воздуха и его температура. В дифференциальной форме, состояние газа будет выглядеть следующим образом:

$$\frac{V}{R} dP = TdG + GdT \quad (8)$$

Вес воздуха, откачиваемого из камеры за бесконечно малый промежуток времени через отверстие площадью f_1 можно выразить уравнением:

$$dG = -Y_B f_1 W d\tau \quad (9)$$

где W – скорость истечения воздуха через отверстие за время $d\tau$.

При введении в формулу (9) площади f_1 следует принять, что площади поперечного сечения струи воздуха и поперечного сечения отверстия в вакуумной камере экструдера равны.

Скорость истечения воздуха W можно получить из уравнения Бернулли для идеального сжимаемого газа [15]:

$$\frac{K}{K-1} \cdot \frac{P}{Y} + \frac{W^{*2}}{2g} = \frac{K}{K-1} \cdot \frac{P_B}{Y_B} + \frac{W^2}{2g} \quad (10)$$

где P_B – величина рабочего давления в вакуумной системе экструдера.

В рассматриваемом нами случае течение воздуха не является стационарным, однако в каждый, бесконечно малый промежуток времени $d\tau$ оно соответствует условиям уравнения Бернулли.

С учетом аналогичных расчетов в теории вакуумных систем доильных установок, можно считать, что скорость течения воздуха в отверстии вакуумной камеры экструдера W существенно выше скорости W^* в месте образования струи. Поэтому можно принять, $W^* = 0$, что дает возможность упростить уравнение Бернулли до вида:

$$\frac{K}{K-1} \cdot \frac{P}{Y} = \frac{K}{K-1} \cdot \frac{P_B}{Y_B} + \frac{W^2}{2g} \quad (11)$$

и получить из этого выражения скорость течения воздуха в наиболее узком поперечном сечении струи:

$$W = \sqrt{\frac{2g \cdot K}{K-1}} \sqrt{\frac{P}{Y} - \frac{P_B}{Y_B}} \quad (12)$$

Полученное значение W подставим в уравнение (9), дополнив его правую часть коэффициентом расхода μ . Данный коэффициент учитывает взаимодействие четырех коэффициентов:

- коэффициента скорости, характеризующего сопротивление отверстия истечению воздуха;
- коэффициента сжатия, характеризующего уменьшение поперечного сечения струи воздуха по сравнению с сечением отверстия;
- коэффициента, характеризующего полноту сжатия струи в зависимости от расположения отверстия в вакуумной камере;
- коэффициента, учитывающего форму сопла, отличную от теоретически принятого отверстия [5, 6, 15].

В первом приближении можно принять, что коэффициент расхода μ является постоянной величиной.

Учитывая, что $P_B/Y_B = C$, и заменяя Y_B соответствующей ему величиной, окончательно получим:

$$dG = -P_B^{\frac{1}{K}} f_1 \mu \sqrt{\frac{2g \cdot K}{K-1}} C^{\frac{1}{K}} \sqrt{P^{\frac{K-1}{K}} - P_B^{\frac{K-1}{K}}} d\tau \quad (13)$$

После введения обозначений:

$$\sqrt{\frac{2gK}{K-1}} C^{\frac{1}{K}} = a \quad \text{и} \quad \frac{K-1}{K} = m$$

и, подставив уравнения (6) и (13) в выражение (1), получим дифференциальное уравнение с разделенными переменными:

$$\frac{dP}{P^m \sqrt{P^m - P_B^m}} = -\frac{P_B^{\frac{1}{K}} a f_1 \mu}{V(1-m)} d\tau \quad (14)$$

Знак минус в уравнении (14) показывает, что давление в вакуумной камере экструдера в процессе истечения воздуха уменьшается.

Аналитическое решение уравнения (14) в общем виде показывает, что время откачивания воздуха из вакуумной камеры экструдера является функцией трех переменных величин:

$$\tau = \varphi \left(V; \frac{1}{f_1}; P_B \right).$$

Время достижения значения давления в камере давлению в вакуумной системе экструдера равно:

$$\tau_1 = \frac{5}{8} \frac{V}{f_1 P_B^{\frac{m}{2}} a \mu} \left[\frac{P_a^{\frac{m}{2}} \sqrt{P_a^m - P_B^m} \cdot (2P_a^m + 3P_B^m)}{P_B^{2m}} - \frac{3}{2} \ln \frac{P_a^{\frac{m}{2}} - \sqrt{P_a^m - P_B^m}}{P_a^{\frac{m}{2}} + \sqrt{P_a^m - P_B^m}} \right] \quad (15)$$

Следующим этапом теоретических исследований вакуумной камеры экструдера является аналитический анализ процесса термовакuumного воздействия на экструдата при его обезвоживании. Будем считать, что обрабатываемое сырье содержит определенное количество воды. При выходе из фильеры матрицы экструдера часть воды превращается в водяной пар, который необходимо удалить из камеры. В принятой нами модели водяной пар при давлении P_{Bn} в количестве dG_2 поступает в вакуумную камеру экструдера через отверстие с площадью поперечного сечения f_2 (рис. 4).

Из уравнения материального баланса

$$dG = dG_1 + dG_2 \quad (16)$$

и формул для определения расхода при откачивании и впуске воздуха в вакуумную камеру экструдера

$$dG_1 = -P_B^{\frac{1}{K}} f_1 \mu a \sqrt{P^m - P_B^m} d\tau \quad (17)$$

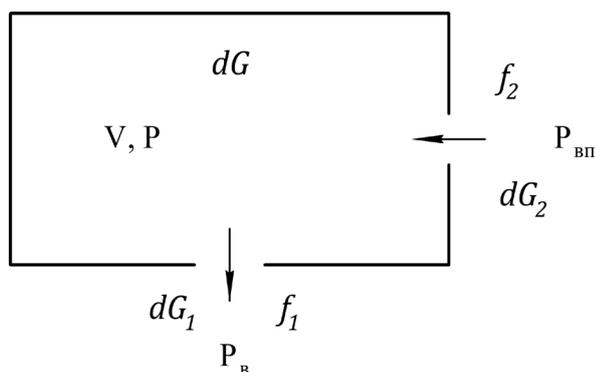


Рис. 4. Расчётная схема вакуумной камеры экструдера при поступлении в нее экструдата

$$dG_2 = P^{\bar{K}} f_2 \mu a \sqrt{P_{Bn}^m - P^m} d\tau \quad (18)$$

получим дифференциальное уравнение, описывающее изменение давления воздуха в вакуумной камере экструдера в режиме термовакuumного воздействия на выходящий из фильеры матрицы экструдат

$$\frac{dP}{d\tau} = \frac{f_1 a \mu P^m}{V(1-m)} \left[\frac{f_1}{f_2} P^{\bar{K}} \sqrt{P_{Bn}^m - P^m} - P_B^{\frac{1}{\bar{K}}} \sqrt{P^m - P_B^m} \right] \quad (19)$$

Уравнение (19) показывает, что давление в вакуумной камере экструдера в первую очередь зависит от следующих параметров:

– содержания влаги в обрабатываемом сырье и готовом продукте (dG_2);

Список литературы

1. Воронина, П. К. Формирование качества пива в процессе сбраживания пивного суслу с использованием экструдата ячменя / П. К. Воронина, А. А. Курочкин // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2012. – № 4. – С. 100–103.
2. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике. / М. Я. Выгодский. М.: Наука, 1977. – 872 с.
3. Королев, В. Ф. Доильные машины, теория и расчеты / В. Ф. Королев. М.: Машиностроение, 1969. – 276 с.
4. Краснов, И. Н. Доильные аппараты / И. Н. Краснов. – Ростов; Ростовский университет, 1974. – 372 с.
5. Курочкин, А. А. Повышение эффективности подготовки нетелей к лактации за счет совершенствования процессов и средств механизации: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / Курочкин Анатолий Алексеевич. Санкт-Петербург, 1993. – 42 с.
6. Курочкин, А. А. Повышение эффективности подготовки нетелей к лактации за счет совершенствования процессов и средств механизации: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01 / А. А. Курочкин. – Сумы, 1993. – 321 с.
7. Курочкин, А. А. Использование экструдированного ячменя в пивоварении / А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, В. В. Новиков // Пиво и напитки. – 2006. – № 5. – С. 16–17.
8. Курочкин, А. А. Экструдаты из растительного сырья с повышенным содержанием липидов / А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, Д. И. Фролов, П. К. Воронина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 4. – С. 70–74.
9. Курочкин, А. А. Системный подход к разработке экструдера для термовакuumной обработки экструдата / А. А. Курочкин // Инновационная техника и технология. – 2014. – № 4. – С. 17–21.
10. Курочкин, А. А. Перспективы использования экструдированной гречихи в пивоварении и хлебопечении

– площади поперечного сечения вакуумпровода (f_1);

– объема камеры (V);

– давления в вакуумной системе экструдера (P_B).

В заключении следует отметить, что зависимость $P = \varphi(\tau)$ можно получить численным решением дифференциального уравнения (19) методом Рунге-Кутты четвертого порядка, дающим достаточно высокую для практического применения точность решений [2].

Результаты и их обсуждение

При постоянном объеме вакуумной камеры, время выхода вакуумной системы экструдера на заданный режим работы зависит от объема камеры, рабочего давления в вакуумной системе и площади поперечного сечения отверстия вакуумной камеры.

В режиме термовакuumного воздействия на экструдат давление в вакуумной камере экструдера зависит от содержания влаги в обрабатываемом сырье и готовом продукте, площади поперечного сечения вакуумпровода, объема камеры и давления в вакуумной системе экструдера.

Выводы

Полученные данные теоретических исследований позволяют прогнозировать базовые показатели параметров вакуумной системы модернизированного экструдера и сравнивать их с результатами экспериментальных исследований.

- / Г. В. Шабурова, П. К. Воронина, А. А. Курочкин, Д. И. Фролов // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2014. – № 4. – С. 79–83.
11. Курочкин, А. А. Теоретическое обоснование термовакуумного эффекта в рабочем процессе модернизированного экструдера / А. А. Курочкин, Г. В. Шабурова, Д. И. Фролов, П. К. Воронина // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. – 2015. – № 3. – С. 15–20.
 12. Научное обеспечение актуального направления в развитии пищевой термопластической экструзии / А. А. Курочкин, П. К. Воронина, В. М. Зимняков, А. Л. Мишанин, В. В. Новиков, Г. В. Шабурова, Д. И. Фролов. – Пенза, 2015. – 181 с.
 13. Шабурова, Г. В. Белковый комплекс экструдированного ячменя / Г. В. Шабурова, А. А. Курочкин, В. П. Чистяков, В. В. Новиков // Пиво и напитки. – 2007. – № 3. – С. 12.
 14. Шабурова, Г. В. Повышение технологического потенциала несоложенных зернопродуктов / Г. В. Шабурова, А. А. Курочкин, П. К. Воронина // Техника и технология пищевых производств. – 2014. – № 1 (32). – С. 90–96.
 15. Скроманис, А. А. Основы расчета доильных аппаратов и установок. / А. А. Скроманис. Елгава: ЛСХА. – 1980. – 320 с.

THEORETICAL RESEARCH OF WORKING PROCESS VACUUM SYSTEMS OF MODERNISED EXTRUDER

A. A. Kurochkin

The paper presents the results of theoretical studies to determine the basic parameters of the vacuum system of the upgraded extruder. An analytical expression for the dependence of the vacuum chamber pressure in the extruder from the moisture content of the processed raw and finished products, the cross sectional area vacuum wires, chamber volume and pressure in the vacuum system of the extruder.

Keywords: porous structure extrudate die matrix volume vacuum chamber.

References

1. Voronina, P.K. Formation of quality of beer in process of fermentation of beer wort with the use of the extrudate barley / P.K. Voronina, A.A. Kurochkin // Bulletin Samara state agricultural Academy. – 2012. – No. 4. – P. 100–103.
2. Vigodsky, M. J. Handbook of higher mathematics. /M. J. Profitable. M.: Nauka, 1977. – 872 p.
3. Korolev, V.F. Milking machines, theory and calculations / V.F. Korolev. M.: Mashinostroenie, 1969. – 276 p.
4. Krasnov, I.N. Milking machines / I.N. Krasnov. – Rostov; Rostov University, 1974. – 372 p.
5. Kurochkin, A. A. Improving the efficiency of training heifers to lactation by improving processes and means of mechanization: author. dis. ... doctor. tech. Sciences: 05.20.01 / Kurochkin Anatoly Alekseevich. St. Petersburg, 1993. – 42 S.
6. Kurochkin, A. A. Improving the efficiency of training heifers to lactation by improving processes and means of mechanization: dis. ... doctor. tech. Sciences: 05.20.01 / A.A. Kurochkin. – Sumy, 1993. – 321 S.
7. Kurochkin, A. A. the Use of extruded barley in brewing/ A.A. Kurochkin, G. V. Shaburova, V. V. Novikov // Beer and drinks. – 2006. – No. 5. – Pp. 16–17.
8. Kurochkin, A. A. the extrudates from vegetable raw materials with a high content of lipids / A.A. Kurochkin, G. V. Shaburova, I. D. Frolov, P.K. Voronina // Bulletin Samara state agricultural Academy. – 2014. – No. 4. – p. 70–74.
9. Kurochkin, A. A. a Systematic approach to the development of the extruder for thermal vacuum processing of the extrudate / A.A. Kurochkin // Innovative technology. – 2014. – No. 4. – P. 17–21.
10. Kurochkin, A. A. prospects for the use of extruded buckwheat in brewing and bread baking / G. V. Shaburova, P.K. Voronina, A.A. Kurochkin, D. I. Frolov // Bulletin Samara state agricultural Academy. – 2014. – No. 4. – P.79–83.
11. Kurochkin, A. A. the Theoretical justification of the thermal effect in the working process of the upgraded extruder / A.A. Kurochkin, G. V. Shaburova, I. D. Frolov, P.K. Voronina // Bulletin Samara state agricultural Academy. – 2015. – No. 3. – P. 15–20.
12. Scientific support for current trends in the development of the edible thermoplastic extrusion / A. A. Kurochkin,

- P.K. Voronina, V.M. Zimnyakov, mishanin A. L., V.V. Novikov, G.V. Shaburova, D.I. Frolov.– Penza, 2015.– 181 p.
13. Shaburova, and G. V. Protein complex extruded barley / G. V. Shaburova, A. A. Kurochkin, V.P. Chistyakov, V. V. Novikov // Beer and drinks.– 2007.– No. 3.– S. 12.
 14. Shaburova, G. V. Improving the technological capacity of unmalted grain products / G. V. Shaburova, A. A. Kurochkin, P.K. Voronina // Technics and technology of food production.– 2014.– № 1 (32) .– S. 90–96.
 15. Straumanis, A.A. Basis of design of milking machines and installations. /A. A. Straumanis. Jelgava: LSHA.– 1980.– 320 p.