

А. Б. Торган

*Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет»,
г. Минск, Республика Беларусь*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТИ ТЕСТА, ТЕМПЕРАТУРЫ ПРЕССУЮЩЕГО КОРПУСА И ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ШНЕКА НА ПРОЦЕСС ФОРМОВАНИЯ

Аннотация. Экструзионное формование является одним из ключевых этапов производства макаронных изделий, определяющим их структурно-механические свойства, качество и энергетическую эффективность технологического процесса. В работе исследовано влияние основных технологических и режимных параметров — влажности теста, температуры прессующего корпуса и частоты вращения шнека — на производительность макаронного пресса, удельную энергоёмкость процесса и качество готовых изделий при использовании конфузочно-диффузорных вставок в предматричном пространстве и колодцах матрицы.

Экспериментальные исследования проведены на лабораторном макаронном прессе, оснащённом системой контрольно-измерительной аппаратуры и компьютерным контролем параметров процесса. В качестве сырья использовали пшеничную муку высшего сорта и воду, соответствующие действующим нормативным документам.

Показано, что оптимальная влажность теста составляет 30–32 %, при которой достигаются минимальные потери сухих веществ при варке, максимальная производительность и наименьшая удельная энергоёмкость. Оптимальная частота вращения шнека находится в диапазоне 2,4–2,7 об/с, обеспечивая наилучшее сочетание производительности и качества продукции. Оптимальный температурный режим прессующего корпуса составляет 50–55 °С, при котором снижаются энергозатраты и улучшается структурная целостность макаронных изделий.

Ключевые слова: макаронные изделия, влажность теста, температура прессующего корпуса, частота вращения шнека, производительность, удельная энергоёмкость, массовая доля сухого вещества, матрица, формирующие отверстия, конфузор, диффузор, уплотнение, пластикация, разогрев теста, вязкость.

A. B. Torgan

Educational Institution “Belarusian State Agrarian Technical University”, Minsk, Republic of Belarus

STUDY OF THE INFLUENCE OF DOUGH MOISTURE CONTENT, PRESSING BARREL TEMPERATURE, AND SCREW ROTATION SPEED ON THE FORMING PROCESS

Abstract. Extrusion molding is one of the key stages in the production of pasta products, determining their structural and mechanical properties, quality, and energy efficiency of the technological process. This study investigates the influence of the main technological and operating parameters—dough moisture content, pressing barrel temperature, and screw rotation speed—on pasta press productivity, specific energy consumption, and the quality of finished products when using converging–diverging inserts in the pre-die space and die wells.

Experimental studies were carried out on a laboratory pasta press equipped with a system of measuring and control instruments and computerized process parameter monitoring. Premium-grade wheat flour and water complying with current regulatory standards were used as raw materials.

It was shown that the optimal dough moisture content is 30–32 %, at which minimal dry matter losses during cooking, maximum productivity, and the lowest specific energy consumption are achieved. The optimal screw rotation speed lies in the range of 2,4–2,7 rpm, providing the best combination of productivity and product quality. The optimal pressing barrel temperature is 50–55 °C, at which energy consumption is reduced and the structural integrity of pasta products is improved.

Keywords: pasta products, dough moisture content, pressing barrel temperature, screw rotation speed, throughput (productivity), specific energy consumption, mass fraction of dry matter, die, forming openings, confuser, diffuser, compaction, plasticization, dough heating, viscosity.

Введение. Экструзионное формование является ключевым этапом производства макаронных изделий, во многом определяющим их структурно-механические свойства, качество и энергетическую эффективность технологического процесса. На стадии прессования формируется плотность теста, его однородность, прочность клейковинного каркаса и устойчивость изделий к развариванию. Существенное влияние на эти показатели оказывают как конструктивные особенности прессующего оборудования, так и режимные параметры его работы [1-7].

В последние годы особый интерес представляет совершенствование предматричного пространства макаронных прессов и колодцев матрицы, направленное на улучшение условий уплотнения и пластификации теста перед выходом через формирующие отверстия матрицы. Использование конфузorno-диффузорных элементов в предматричной камере позволяет более равномерно распределять давление, снижать турбулентность потока и улучшать структурообразование тестовой массы. Однако эффективность таких конструктивных решений в значительной степени зависит от сочетания технологических параметров процесса.

К числу наиболее значимых факторов, влияющих на процесс формирования макаронных изделий, относятся влажность теста, температура прессующего корпуса и частота вращения шнека. Влажность теста определяет его реологические свойства и способность к уплотнению, температура корпуса влияет на вязкость и пластичность тестовой массы, а частота вращения шнека — на интенсивность транспортирования, уплотнения и энергозатраты процесса. Неправильный выбор указанных параметров может приводить к снижению производительности, увеличению удельной энергоёмкости и ухудшению качества готовых изделий.

Цель работы — установить закономерности влияния влажности теста, температуры прессующего корпуса и частоты вращения шнека на основные технико-экономические и качественные показатели процесса формования макаронных изделий при использовании конфузorno-диффузорных вставок в предматричном пространстве и в колодцах матрицы.

Полученные результаты позволяют определить оптимальные режимы работы экструдера, обеспечивающие максимальную производительность, минимальные энергозатраты и высокое качество макаронной продукции.

Результаты и их обсуждение. Практическая разработка. Предматричное пространство макаронного пресса представляет собой условный цилиндр, в который прессующим шнеком подается винтообразно закрученный поток теста. Такое движение теста в предматричном пространстве влияет на распределение скоростей и работу шнека, а также на качество макаронных изделий и работу пресса в целом [8–12].

Для оптимизации предматричного пространства макаронного пресса и управления потоком теста, в предматричный канал необходимо установить конфузorno-диффузорную вставку специальной конструкции [13, 14].

На рис. 1. представлена принципиально-конструктивная схема узла прессования с управляемым потоком теста в предматричном пространстве.

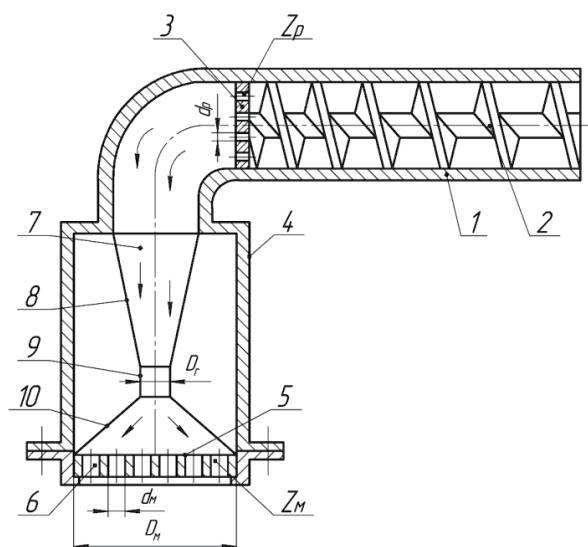


Рис. 1. Принципиально-конструктивная схема узла прессования с управлением потока теста в предматричном пространстве (по патенту на изобретение РБ № 23082)

Fig. 1. A fundamentally constructive scheme of the pressing unit with the control of the text flow in the pre-matrix space (according to the patent of the Republic of Belarus No. 23082)

Согласно патенту на изобретение РБ № 23082 макаронное тесто с помощью шнека нагнетающего типа 2, расположенного в шнековой камере 1, преодолевая сопротивление перфорированной направляющей решетки 3 для выравнивания скоростей окончательного перемещения теста, поступает в прессовую головку 4, где попадает в конфузур 8, в котором происходит стабилизация теста и его пластификации. Из горловины 9 тесто направляется в диффузор 10, в котором имеет место расширение потока, снижение скорости движения теста, при этом часть кинетической энергии потока переходит в потенциальную, необходимую для преодоления гидравлического сопротивления последующих отверстий 6, а теплота трения из механической энергии движения повышает температуру теста и уменьшает его динамическую вязкость.

Так как тесто предварительно уплотнено, дополнительно пластифицировано и частично подогрето, оно плавно проходит через формирующие отверстия 6 при минимально возможном гидравлическом сопротивлении (без гидравлического удара).

Конфузорно-диффузорная вставка играет ключевую роль в подготовке тестовой массы и существенно влияет на эффективность процесса формования макаронных изделий в формирующих механизмах. Она обеспечивает:

- ♦ предварительное и равномерное уплотнение теста в конфузуре и горловине вставки, сопровождающееся его пластификацией;
- ♦ частичное подогревание теста за счёт тепла трения при прохождении через конфузур и горловину, что снижает его вязкость и облегчает прохождение через формирующие отверстия;
- ♦ снижение гидравлического сопротивления благодаря оптимальной конструкции, что позволяет поддерживать требуемое давление без потерь;
- ♦ увеличение скорости выдавливания теста за счёт предварительного уплотнения, дополнительной пластификации, стабилизации потока и снижения гидравлических потерь, что повышает производительность оборудования и улучшает качество полуфабрикатов.

Контроль и стабилизация тестового потока в колодцах матрицы является одним из перспективных направлений модернизации прессового оборудования для производства макаронных изделий. Установка перед фильерами специальных конфузурно-диффузорных вставок с расширяющейся конфузурной частью 2, диффузором 1 и цилиндрическим переходом 3 (горловиной) между ними способствует выравниванию и стабилизации потока теста рис. 2 [15].

а



б

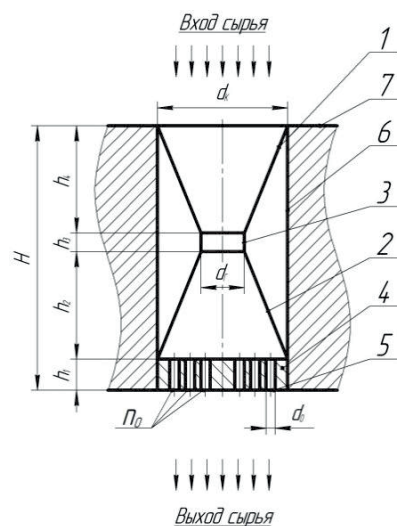


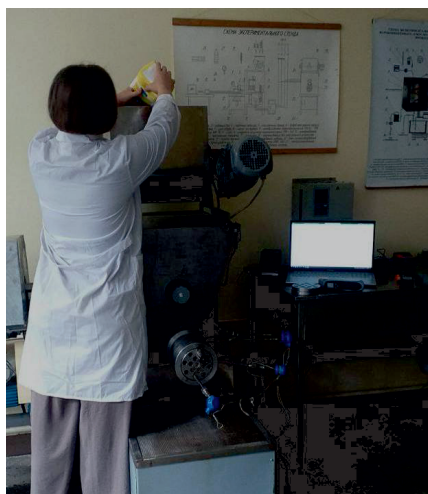
Рис. 2. Общий вид (а) и конструктивная схема (б) матрицы с конфузурно – диффузорными вставками
Fig. 2. General view (a) and structural diagram (b) of the die with converging–diverging inserts

В диффузоре – конической части вставки, примыкающей расширенной частью к вкладышу 4 с формирующими отверстиями 5, постепенно снижается скорость теста и выравнивается давление по плоскости фильеры. При этом важно отметить, что в конфузуре, горловине и диффузоре вставки имеет место не только постепенное уплотнение тестового потока, но также дополнительный его разогрев. Таким образом, тесто подходит к вкладышу 4 предварительно уплотненным и разогретым, а затем плавно входит в формирующие отверстия 5.

Вставка установлена в колодце *б* на фильерном вкладыше *4* плотно (с натягом) без возможности проворачивания, при этом диаметр диффузора *2* равен диаметру вкладыша *4*, что обеспечивает свободный проход теста из диффузора *4* в формующие отверстия *5* матрицы *7*. Рабочее положение матрицы – горизонтальное. Под матрицей устанавливается вращающийся нож для отрезания отформованных изделий (не показан). Стрелками указано направление движения исходного сырья.

Вставку целесообразно изготавливать из того же материала, что и сама матрица, иначе при контакте с тестом может возникнуть гальваническая пара и возникающие в ее системе слабые токи приведут к коррозии металла. Матрицы изготавливают из антикоррозийных и прочих материалов, таких как бронза Бр-АЖ9-4, латунь ЛС59-1, нержавеющая сталь 1Х18Н9Т. Внутренние поверхности вставки (конфузор, горловина и диффузор) желателно полировать или хромировать, но лучшее покрытие – тефлон (фторопласт).

а



б



а – загрузка муки в бункер смесителя; *б* – регулирование контрольно-измерительных приборов и компьютерной системы контроля основных параметров процесса и измерение температуры теста в прессующем корпусе
Рис. 3. Проведение испытаний на экспериментальном стенде
Fig. 3. Conducting tests on the experimental test bench

Экспериментальные исследования. Для проведения эксперимента использовали муку хлебопекарную высшего сорта М 54-28 (СТБ 1666-2006). Данная мука используется на филиале «Боримак» УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» ОАО «Минскхлебпродукт», ОАО «Минский комбинат хлебопродуктов» и ОАО «Лидяхлебопродукт».

Вода, соответствующая СТБ 1188-99 [16].

Для среднего замеса теста необходимо знать влажность муки, чтобы определить количество воды для получения теста влажностью 29,1–31,10 %, необходимого для получения макаронных изделий данного наименования.

Методика подготовки сырья и теста включает следующие этапы:

- ♦ определение влажности муки;
- ♦ определение количества воды, необходимой для замеса теста;
- ♦ составление рецептурной смеси заданной влажности;
- ♦ проверка влажности теста.

Влажность муки для замеса теста определялась по ГОСТ 9404-88 [16] в соответствии с СТБ 1666-2006 [17].

Влажность муки определяется методом по ГОСТ 9404-60. Данный метод предусматривает высушивание навесок муки в электрических сушильных шкафах типа СЭШ.

Оценку качественных показателей проводили в соответствии с СТБ 1963-2009 [18]. Основные моменты проводимых испытаний представлены на рисунке 3.

Программа и методика проведения эксперимента. Исследования процесса формования проводили на экспериментальном стенде с контрольно-измерительной аппаратурой для измерения основных параметров процесса формирования макаронных изделий, соединенным с компьютерной системой контроля, которая в себя включает персональный переносной компьютер ASUS VivoBook 17X M3704YA-AU071, измеритель-регулятор микропроцессорный ТРМ-148 ТУ 4217-004-46526536-2006 и преобразователь интерфейсов АС4 ТУ 4218-003-46526536-2006 (сертификат соответствия № 03.009.0331.) [19].

Стенд представлен на рис. 4.

Для определения наиболее важных факторов, влияющих на процесс формования макаронных изделий, была проанализирована априорная информация, основанная на ранее проведенных аналитических и экспериментальных исследованиях. Для определения факторов варьирования для экспериментальных исследований была проведена серия «отсеивающих экспериментов».

После обобщения результатов предварительной серии экспериментов для проведения экспериментальных исследований процесса формирования макаронных изделий на экспериментальном прессе факторами варьирования были выбраны следующие параметры:

- ♦ температура прессующего корпуса (t_k , °C);
- ♦ частота вращения шнека ($n_{ш}$, с⁻¹);
- ♦ влажность теста (W_T , %).

В табл. 1 представлены интервалы варьирования исследуемых факторов.



- 1 – смесительный бункер; 2 – бункер прессующего корпуса; 3 – прессующий корпус с предматричным пространством в виде конфузorno-диффузорной вставки; 4 – матрица; 5 – датчик давления АИР 10; 6 – преобразователи термоэлектрические ТХК (L); 7 – узел обдува; 8 – измеритель-регулятор микропроцессорный ТРМ – 148; 9 – контрольно-измерительные приборы; 10 – весы электронные портативные; 11 – персональный компьютер ASUS VivoBook 17X M3704YA-AU071; 13 – векторный преобразователь частоты со встроенным PLC-контроллером E2 – 8300-007H; 14 – рама пресс-автомата; 15 – привод смесителя и прессующего корпуса

Рис. 4. Внешний вид экспериментального стенда

Fig. 4. External view of the experimental test bench

Т а б л и ц а 1. Интервалы варьирования исследуемых факторов

Т а в л е 1. Variation ranges of the studied factors

Фактор	Обозначение	Единицы измерения	Минимальное значение	Максимальное значение
Температура прессующего корпуса	t_k	°C	40,0	55,0
Частота вращения шнека	$n_{ш}$	с ⁻¹	2,0	2,8
Влажность теста	W_T	%	28,0	32,5

В качестве выходных параметров выбраны производительность макаронного пресса (P , кг/ч), удельная энергоёмкость процесса ($N_{уд}$, кВт·ч/кг) и массовая доля сухого вещества, перешедшая в варочную воду ($m_{с.в.}$, %).

Результаты эксперимента. Экспериментальные исследования процесса формирования макаронных изделий с конфузorno-диффузорными вставками проводили на экспериментальном макаронном прессе, соответствующие многофакторному плану эксперимента.

После обработки результатов эксперимента получены графические зависимости производительности макаронного пресса P , массовой доли сухого вещества, перешедшей при варке

макаронных изделий в воду $m_{с.в.}$, и удельной энергоёмкости $N_{уд}$ макаронного пресса от технологических и режимных параметров его работы: температуры прессующего корпуса (t_k), влажности теста (W_T) и частоты вращения шнека в прессующем корпусе ($n_{ш}$).

На рисунке 5 представлена зависимость массовой доли сухого вещества, перешедшей при варке в воду, и удельной энергоёмкости макаронного пресса от влажности теста при $t_k = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$ и $n_{ш} = 2,4 \text{ с}^{-1}$.

Кривая зависимости удельной энергоёмкости от влажности теста имеет параболический характер с максимумом при низких значениях влажности (около 26–28 %). При низкой влажности теста около 26 % наблюдается повышенная энергоёмкость до 0,059 кВт·ч/кг. С увеличением влажности до 33–34 % энергоёмкость постепенно снижается до минимального значения до 0,045 кВт·ч/кг. Это объясняется тем, что при увеличении влажности тесто становится более пластичным, снижается внутреннее трение между частицами, что облегчает процесс прессования и снижает потребление энергии экструдера.

Массовая доля сухого вещества, перешедшего в воду при варке, также изменяется по параболическому закону, но с минимумом при влажности теста около 31 %. При низкой влажности около 26–27 % показатель мс.в., достигает максимума, что свидетельствует о повышенной хрупкости и недостаточной структурной целостности изделий. При оптимальной влажности около 30–32 % наблюдается минимум, что указывает на наилучшее качество макаронных изделий — минимальные потери сухих веществ при варке. При дальнейшем увеличении влажности до 33–34 % доля сухих веществ снова увеличивается, что связано с переувлажнением теста, ослаблением клейковинного каркаса и ухудшением структуры изделий.

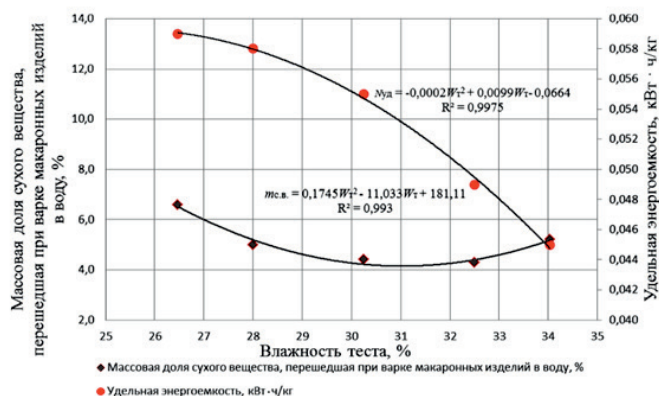


Рис. 5. Зависимость массовой доли сухого вещества, перешедшей в варочную воду мс.в., и удельной энергоёмкости $N_{уд}$ от влажности теста W_T при $t_k = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$ и $n_{ш} = 2,4 \text{ с}^{-1}$

Fig. 5. Dependence of the mass fraction of dry matter transferred into cooking water мс.в., and the specific energy consumption $N_{уд}$ on dough moisture content W_T at $t_k = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$ and $n_{ш} = 2,4 \text{ с}^{-1}$

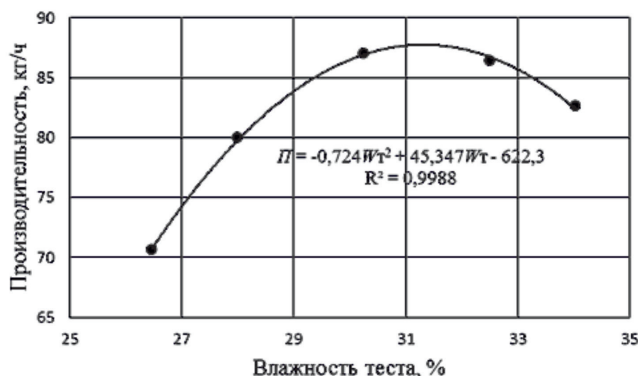


Рис. 6. Зависимость производительности Π от влажности теста W_T при $t_k = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$ и $n_{ш} = 2,4 \text{ с}^{-1}$

Fig. 6. Dependence of productivity Π on dough moisture content W_T at $t_k = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$ and $n_{ш} = 2,4 \text{ с}^{-1}$

ности до 33–34 % доля сухих веществ снова увеличивается, что связано с переувлажнением теста, ослаблением клейковинного каркаса и ухудшением структуры изделий.

Анализ обеих зависимостей показывает, что при снижении энергоёмкости прессования до определённого уровня одновременно наблюдается минимум потерь сухих веществ при варке. Таким образом, существует оптимальный диапазон влажности теста 30–32 %, который обеспечивает минимальные энергетические затраты на процесс и максимальную структурную прочность и качество готового продукта.

На рисунке 6 представлена зависимость производительности макаронного пресса от влажности теста при $t_k = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$ и $n_{ш} = 2,4 \text{ с}^{-1}$.

Кривая имеет параболический характер с ярко выраженным максимумом. При увеличении влажности теста от 26 % до 32 % наблюдается рост производительности. При дальнейшем повышении влажности свыше 32 % производительность снижается. Таким образом, оптимальная влажность теста составляет 32 %, при которой достигается максимальная производительность около 87 кг/ч.

При низкой влажности 26 % тесто имеет повышенную вязкость, плохо перемещается в канале шнека, что снижает производительность. С увеличением влажности тесто становится более податливым и пластичным, улучшается его транспортировка и формование. Однако при влажности выше 32 % излишняя жидкость приводит к ухудшению условий захвата массы витками

шнека, возможному проскальзыванию и снижению подачи. Оптимальная влажность 30–32 % обеспечивает наибольшую производительность и энергетическую эффективность процесса.

На рисунке 7 представлена зависимость производительности макаронного пресса и массовой доли сухого вещества, перешедшего при варке макаронных изделий в воду, от частоты вращения шнека в прессующем корпусе при $t_k = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$ и $W_T = 30,25 \text{ } \%$.

Кривая зависимости производительности от частоты вращения шнека имеет параболическую форму с максимумом. При увеличении частоты вращения от 1,7 до 2,8 об/с производительность экструдера возрастает, достигая максимального значения порядка 87,5 кг/ч. Дальнейшее увеличение скорости вращения приводит к незначительному снижению производительности, что объясняется ростом внутреннего сопротивления теста, ухудшением условий уплотнения и повышением обратного потока материала.

Таким образом, оптимальная частота вращения шнека составляет около 2,6 об/с, при которой обеспечивается наибольшая производительность при умеренных энергозатратах.

Кривая зависимости массовой доли сухого вещества, перешедшего в воду при варке макаронных изделий, показывает обратную тенденцию. При увеличении частоты вращения шнека показатель м.с.в. снижается с 5,7 % до примерно 4,4 %, достигая минимума в диапазоне 2,4–2,8 об/с, после чего слегка повышается. Это указывает на то, что при оптимальной частоте вращения структура теста формируется наиболее равномерно, а плотность и целостность макаронных изделий повышается, что снижает их разваривание при варке и улучшает качество.

Две зависимости на графике взаимосвязаны – рост производительности пресса до оптимального уровня сопровождается улучшением качества макарон (меньше сухих веществ теряется при варке). При превышении оптимальной скорости ухудшаются условия прессования, возрастает турбулентность и неравномерность теста, что ведёт к снижению качества изделий.

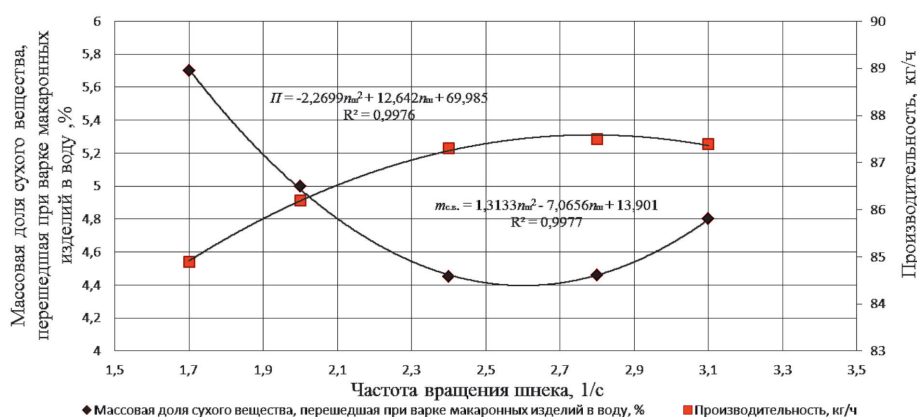


Рис. 7. Зависимость производительности Π и массовой доли сухого вещества, перешедшей при варке в воду $m_{с.в.}$, от частоты вращения шнека $n_{ш}$ при $t_k = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$ и $W_T = 30,25 \text{ } \%$

Fig. 7. Dependence of productivity Π and the mass fraction of dry matter transferred into cooking water $m_{с.в.}$, on the screw rotation speed $n_{ш}$ at $t_k = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$ and $W_T = 30,25 \text{ } \%$

Оптимальная зона работы экструдера находится при 2,4–2,7 об/с, где обеспечивается максимальная производительность и минимальные потери сухих веществ, а также высокое качество готовых макаронных изделий.

На рисунке 8 представлена зависимость удельной энергоёмкости $N_{уд}$ от частоты вращения шнека $n_{ш}$ при $t_k = 47,5 \text{ }^\circ\text{C}$ и $W_T = 30,25 \text{ } \%$.

В процессе переработки макаронного теста одним из ключевых параметров, определяющих эффективность работы шнековых машин, является удельная энергоёмкость $N_{уд}$. Этот показатель характеризует количество энергии, затрачиваемое на переработку единицы массы продукта. Оптимизация энергоёмкости позволяет повысить экономичность и производительность технологического процесса.

При увеличении частоты вращения шнека от 1,7 до 2,7 об/с наблюдается рост удельной энергоёмкости с 0,038 до 0,055 кВт·ч/кг. После достижения частоты около 2,7 об/с кривая начинает снижаться, что указывает на предельный уровень энергоэффективности.

Рост энергоёмкости носит параболический характер, что подтверждается наличием квадратичного члена в уравнении. При малых скоростях шнека 1,7–2,4 об/с увеличение частоты приводит к резкому возрастанию энергоёмкости. В диапазоне 2,4–2,7 об/с рост становится

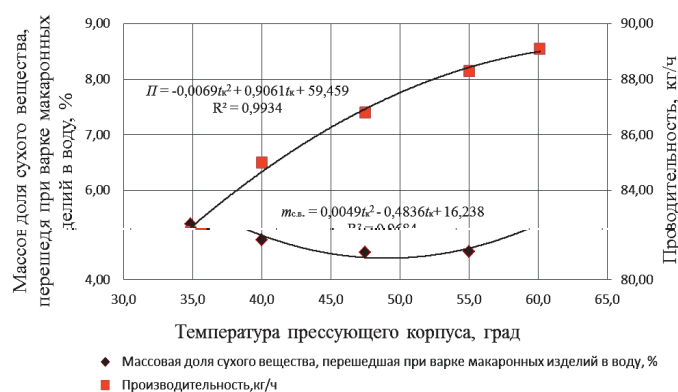


Рис. 8. Зависимость удельной энергоёмкости $N_{уд}$ от частоты вращения $n_{ш}$ при $t_k = 47,5\text{ }^\circ\text{C}$ и $W_T = 30,25\%$
 Fig. 8. Dependence of the specific energy consumption $N_{уд}$ on the screw rotation speed $n_{ш}$ at $t_k = 47,5\text{ }^\circ\text{C}$ and $W_T = 30,25\%$

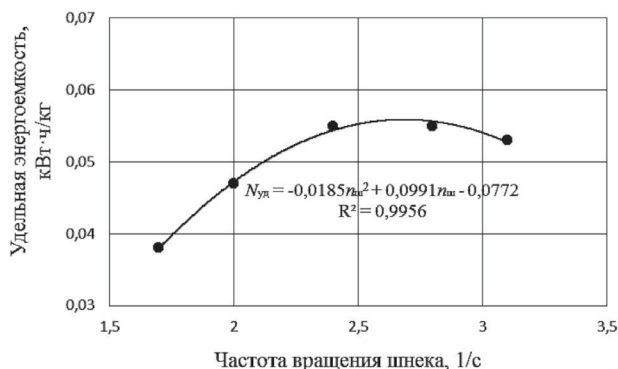


Рис. 9. Зависимость производительности макаронного пресса Π и массовой доли сухого вещества, перешедшей в варочную воду мс.в., от температуры прессующего корпуса t_k при $W_T = 30,25\%$ и $n_{ш} = 2,4\text{ с}^{-1}$
 Fig. 9. Dependence of pasta press productivity Π and the mass fraction of dry matter transferred into cooking water мс.в., on the pressing barrel temperature t_k at $W_T = 30,25\%$ and $n_{ш} = 2,4\text{ с}^{-1}$

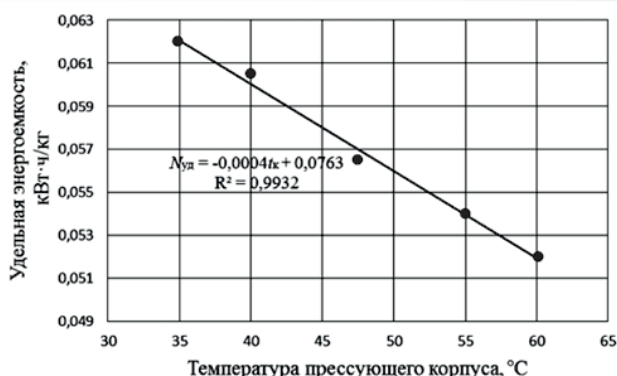


Рис. 10. Зависимость удельной энергоёмкости $N_{уд}$ от температуры прессующего корпуса t_k при $W_T = 30,25\%$ и $n_{ш} = 2,4\text{ с}^{-1}$
 Fig. 10. Dependence of the specific energy consumption $N_{уд}$ on the pressing barrel temperature t_k at $W_T = 30,25\%$ and $n_{ш} = 2,4\text{ с}^{-1}$

более плавным, что связано с оптимизацией движения массы теста и уменьшением трения.

При низкой скорости вращения энергия расходуется на преодоление вязкого сопротивления теста и недостаточную подачу материала. При увеличении частоты вращения повышается интенсивность перемешивания и сдвиговые нагрузки, что требует больше энергии. Однако при достижении оптимальной частоты происходит стабилизация энергетических затрат: тесто приобретает однородную структуру, а внутренние сопротивления снижаются.

Таким образом, оптимальная частота вращения шнека 2,4–2,7 об/с, при которой достигается максимальная энергоэффективность процесса.

На рисунке 9 представлена зависимость производительности и массовой доли сухого вещества, перешедшей при варке макаронных изделий в воду, от температуры прессующего корпуса при $n_{ш} = 2,4\text{ с}^{-1}$ и $W_T = 30,25\%$.

Кривая зависимости производительности от температуры имеет восходящий характер, что говорит о росте производительности с увеличением температуры. При низких температурах 35–40 °C производительность составляет около 82–85 кг/ч. С повышением температуры до 60 °C производительность возрастает до 89 кг/ч. Это объясняется тем, что повышение температуры корпуса способствует снижению вязкости теста и облегчению его продвижения по шнеку, что снижает сопротивление и увеличивает подачу материала. Повышение температуры прессующего корпуса положительно влияет на производительность экструдера.

Зависимость массовой доли сухого вещества, перешедшей в варочную воду от температуры носит параболический характер с минимумом при температуре около 50 °C. При низкой температуре 35–40 °C показатель массовой доли сухого вещества, перешедшей в варочную воду составляет около 5,2–4,8 %. При оптимальной температуре 50 °C наблюдается минимум 4,3 %, что свидетельствует о наименьших потерях сухих веществ при варке, то есть о лучшем качестве макаронных изделий. При дальнейшем повышении температуры выше 55 °C доля сухих веществ снова увеличивается, достигая 5,0 %, что связано с началом перегрева и частичной деградацией структуры белков

и крахмала. Существует оптимальная температура прессующего корпуса $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, при которой обеспечивается минимальное вымывание сухих веществ и, следовательно, наилучшее качество продукции.

Таким образом, можно выделить оптимальный диапазон температур $50\text{--}55\text{ }^{\circ}\text{C}$, в котором достигается оптимальный баланс между качеством продукции и производительностью пресса.

На рисунке 10 представлена зависимость удельной энергоёмкости макаронного пресса от температуры прессующего корпуса при $n_{ш} = 2,4\text{ с-1}$ и $W_t = 30,25\%$.

Энергозатраты при производстве макаронных изделий во многом зависят от температуры прессующего корпуса. Температурный режим определяет вязкость теста, уровень трения в шнековой зоне и эффективность транспортировки тестовой массы. Исследование зависимости удельной энергоёмкости от температуры позволяет определить оптимальные термические условия для минимизации энергопотребления оборудования.

Из графика видно, что удельная энергоёмкость линейно уменьшается с ростом температуры корпуса. При повышении температуры от 35 до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ удельная энергоёмкость снижается с $0,062$ до $0,052\text{ кВт}\cdot\text{ч/кг}$.

При низких температурах тесто имеет высокую вязкость, что повышает сопротивление движению и требует большего крутящего момента шнека. С ростом температуры вязкость теста снижается, облегчается течение и выдавливание массы, уменьшается трение в шнековом канале, что приводит к снижению энергетических затрат. Избыточное повышение температуры (выше $60\text{ }^{\circ}\text{C}$) может привести к частичному денатурированию белков и ухудшению структуры теста, однако в представленном диапазоне тенденция остаётся устойчиво нисходящей. Таким образом, даже умеренное повышение температуры позволяет существенно уменьшить затраты энергии при постоянной производительности. С повышением температуры прессующего корпуса удельная энергоёмкость процесса линейно уменьшается, что подтверждает улучшение текучести теста при нагреве. Оптимизация температурного режима в диапазоне $50\text{--}55\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволяет снизить энергозатраты без ухудшения технологических свойств продукта.

Заключение. В результате проведённых экспериментальных и аналитических исследований установлены закономерности влияния основных технологических и режимных параметров — влажности теста, температуры прессующего корпуса и частоты вращения шнека — на производительность, удельную энергоёмкость и качество макаронных изделий при использовании конфузорно-диффузорных вставок в предматричном пространстве и колодцах матрицы макаронного пресса.

Показано, что применение конфузорно-диффузорных вставок способствует более равномерному уплотнению и пластификации теста, стабилизации потока и снижению гидравлических потерь, что положительно отражается как на технико-экономических показателях процесса, так и на качестве готовой продукции.

Установлено, что влажность теста оказывает определяющее влияние на все исследуемые показатели. Оптимальный диапазон влажности составляет $30\text{--}32\%$, при котором достигаются минимальные потери сухих веществ при варке, наименьшая удельная энергоёмкость и максимальная производительность пресса. Отклонение влажности в сторону как понижения, так и повышения приводит к ухудшению условий формования, росту энергозатрат и снижению качества макаронных изделий.

Анализ влияния частоты вращения шнека показал наличие оптимальной зоны в диапазоне $2,4\text{--}2,7\text{ об/с}$. В этом интервале обеспечивается наибольшая производительность экструдера, минимальные потери сухих веществ при варке и рациональный уровень удельной энергоёмкости. Превышение оптимальной частоты приводит к ухудшению условий уплотнения теста и росту энергетических затрат.

Исследование температурного режима прессующего корпуса показало, что повышение температуры снижает вязкость теста и энергозатраты процесса. Оптимальный диапазон температуры прессующего корпуса составляет $50\text{--}55\text{ }^{\circ}\text{C}$, при котором достигается минимальная массовая доля сухих веществ, перешедших в варочную воду, при одновременном росте производительности и снижении удельной энергоёмкости. Дальнейшее повышение температуры может негативно сказываться на структурной целостности теста.

Таким образом, комплексная оптимизация режимных параметров экструдирования в сочетании с использованием конфузорно-диффузорных вставок позволяет повысить эффективность процесса формования макаронных изделий, снизить удельные энергозатраты и обеспечить высокое качество готовой продукции. Полученные результаты могут быть использованы при модернизации макаронных прессов и разработке рациональных технологических режимов в условиях промышленного производства.

Список использованных источников

1. Назаров, Н. И. Исследование режимов замеса и прессования теста для макарон (обзор) / Н. И. Назаров. – М.: ЦНИИТЭИпищепром, 1970. – 28 с.
2. Мачихин, Ю. А. Формование пищевых масс / Ю. А. Мачихин, Г. К. Берман, Ю. В. Клаповский. – М.: Колос, 1992. – 272 с.
3. Медведев, Г. М. Технология макаронного производства: учебник / Г. М. Медведев. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 280 с.
4. Медведев, Г. М. Технология макаронного производства: учебник для вузов / Г. М. Медведев. – М.: Колос, 1998. – 272 с.
5. Назаров, Н. И. Технология макаронных изделий: учебник для вузов / Н. И. Назаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Пищевая промышленность, 1978. – 286 с.
6. Назаров, Н. И. Структурно-механические свойства макаронного теста / Н. И. Назаров, М. А. Калинина, Ю. В. Калинин // Хлебопекарная и кондитерская промышленность, 1971. – №2. – С. 18–20.
7. Назаров, Н. И. Технология макаронного производства / Н. И. Назаров. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1969. – 288 с.
8. Червячные прессы, агрегаты и линии на их базе как технологическое оборудование для интенсификации процессов переработки полимерных материалов: сб. науч. трудов / ВНИИ резинотехн. Машиностроения; под ред. Ю. А. Жданова. – Тамбов: ВНИИТРмаш, 1985. – 109 с.
9. Чернов, М. Е. Справочник по макаронному производству / М. Е. Чернов, Г. М. Медведев, В. П. Негруб. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 280 с.
10. Чернов, М. Е. Оборудование предприятий макаронной промышленности / М. Е. Чернов. – М.: Пищевая промышленность, – 1978. – 232 с.
11. Чернов, М. Е. Оборудование макаронной промышленности за рубежом / М. Е. Чернов. – М.: ЦНИИТЭИпищепром, – 1978. – 232 с.
12. Martin, J. Extruderzonen in denen Warmedurch Leitung und erzwungene Konvektion abgeführt wird / J. Martin // Wärmeübertrag. – Kunststoffanfbereit. – Dusseldorf, 1986. – S. 169 – 196.
13. Узел прессования макаронного пресса: пат. № 23082 Республика Беларусь, МПК А 21С 11/16, А 21С 11/20 / В. Я. Груданов, А. Б. Торган, Е. Н. Филидович; заявитель: Белорусский государственный аграрный технический университет – заяв. № а 20190027 05.02.2019, опубликовано 27.05.2020.
14. Груданов, В. Я. Узел прессования с процессинговым центром управления потоком макаронного теста в предматричной камере оптимальной конфигурации / В. Я. Груданов, А. Б. Торган, Г. И. Белохвостов // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2021. – № 4 (54), Том 14. – С. 91–96.
15. Матрица для производства макаронных изделий: пат. № 23081 Республика Беларусь, МПК А 21С 11/16 / В. Я. Груданов, А. Б. Торган, Е. Н. Филидович; заявитель: Белорусский государственный аграрный технический университет – заяв. № а 20190012 17.01.2019, опубликовано 27.05.2020.
16. Мука и отруби. Метод определения влажности: ГОСТ 9404-88. – Введ. 01.01.90 (взамен ГОСТ 9404-60). М.: Изд-во стандартов, 1988. – 5 с.
17. Мука пшеничная. Технические условия: СТБ 1666-2006. Введ. 01.12.06 (впервые на территории РБ). – Минск: Госстандарт, 2006. – 11с.
18. Изделия макаронные. Общие технические условия: СТБ 1963-2009. – Введ. 29.12.2009. – Минск: Госкомитет по стандартизации Республики Беларусь: Белорусгосин-т стандартизации и сертификации, 2010. – 30 с.
19. Груданов, В. Я. Испытательное оборудование и оснастка для изучения процессов формирования макаронных изделий с управляемым потоком теста в предматричной камере / В. Я. Груданов, А. Б. Торган // Весн. Грод. дзярж. ўн-та ім. Я. Купалы. Сер. 6. Тэхніка. – 2021. № 1. – С. 75–85.

Информация об авторах

Торган Анна Борисовна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и механизации животноводства и переработки сельскохозяйственной продукции учреждения образования «Белорусский государственный аграрный технический университет» (пр. Независимости, 99, 220012, г. Минск, Республика Беларусь).

E-mail: anechkatorgan@mail.ru.

Information about the authors

Torgan Anna Borisovna, PhD. (Technical), Associate Professor of the Department of Technologies and Mechanization of Animal Husbandry and Agricultural Product Processing, Educational Institution, Belarusian State Agrarian Technical University, (99, Nezavisimosty Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus).
E-mail: anechkatorgan@mail.ru.