

Працэсы і апараты харчавых вытворчасцей

УДК 664.692.5

В. Я. Груданов, А. Б. Торган

**ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНАСТКА
ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПРОЦЕССОВ ФОРМОВАНИЯ
МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ С УПРАВЛЯЕМЫМ
ПОТОКОМ ТЕСТА В ПРЕДМАТРИЧНОЙ КАМЕРЕ**

Во введении отмечено, что процесс прессования макаронных изделий характеризуется большими удельными затратами энергии и неравномерностью выхода экструдированного теста из формирующих отверстий матрицы. Наряду с теоретическим анализом проблемы необходимы комплексные экспериментальные исследования реологических аспектов формования таких изделий. Используемое в настоящее время испытательное оборудование и оснастка не позволяют моделировать и изучать течение макаронного теста в различных каналах, включая каналы переменного сечения. Цель работы – создание конструкции экспериментального оборудования и оснастки с расширенными техническими возможностями, позволяющими управлять потоком движения теста, в том числе за счет изменения направления движения этого потока, а также интенсивности его сдвигового деформирования. В теоретической части приведено обоснование реологических аспектов модернизации конструкции испытательного оборудования и оснастки. В основной части описана разработанная конструкция испытательного стенда на базе пресс-автомата МИТ-2, снабженного системой управления движением потока теста в предматричной камере. Модернизация конструкции позволяет расширить технические возможности за счет наличия системы изменения направления движения макаронного теста с только горизонтального у традиционной конструкции на вертикальное, или наклонное, или горизонтальное, что обеспечивается применением поворотного углового адаптера. Второй особенностью стенда является включение в состав его конструкции специальных элементов (конического, коническо-цилиндрического и/или конфузочно-диффузорного типа, например трубки Вентури) для регулирования гидродинамической зоны сопротивления. Элементы предназначены для установки как в колодцах матрицы, так и в предматричной зоне. Изложена методика проведения экспериментов с использованием модернизированного оборудования. В заключении отмечено, что произведенные усовершенствования направлены на изучение процессов формования макаронных изделий в узлах прессования с целью снижения энергетических затрат, повышения их прочности и качества, увеличения срока хранения.

Ключевые слова: макаронное тесто, реологические модели, течение, конфузор, диффузор, вставка.

Введение. Макароны относятся к основным продуктам питания и выработка их во все более возрастающем ассортименте требует совершенствования оборудования и технологии этого процесса. Процесс прессования характеризуется большими удельными затратами энергии [1–4], а вопросы рационального расходования топливно-энергетических ресурсов приобретают первостепенное значение. Ведущими представителями, производящими технологии и оборудование для экструзионного воздействия на перерабатываемый материал, являются следующие фирмы: «Бюлер» (Германия); «Паван-маммпьянти», «FAVA s.p.a.» (Италия); «Бассано» (Франция), «BUHLER.AG» (Швейцария) [5–7]. Вышеперечисленные фирмы разработали достаточно эффективные методы осуществления экструзионных технологий. Номенклатура выпускаемых изделий неуклонно расширяется. Однако, несмотря на наличие при фирмах научно-исследовательских центров, технологии, разработанные ими, рассчитаны на высококачественное сырье, которое производится прежде всего

Груданов Владимир Яковлевич, д-р техн. наук, проф., проф. каф. технологии и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции БГАТУ (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь; e-mail: pererabotka.kafedra@mail.ru

Торган Анна Борисовна, канд. техн. наук, доц., зав. каф. технологии и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции БГАТУ (Беларусь).

Адрес для корреспонденции: пр. Независимости, 99, 220023, г. Минск, Беларусь; e-mail: anechkat@tut.by

в странах, где изготавливают оборудование для производства макаронных изделий. Возможные изменения состава, обусловленные необходимостью применения частично или полностью местного сырья или введения функциональных добавок, например, при производстве питания для отдельных групп населения (детей, спортсменов, лиц пожилого возраста или с хроническими заболеваниями), изменяют реологические свойства теста, а соответственно, сказываются на режимах формования изделий. Современные конструкции оборудования и оснастки для формования макаронных изделий этого не учитывают. В связи с изложенным необходимы теоретические и экспериментальные исследования реологических аспектов формования макаронных изделий. Для экспериментальных исследований необходимо испытательное оборудование и оснастка, позволяющие моделировать и изучать течение макаронного теста в различных каналах, включая каналы переменного сечения.

Цель работы – создание конструкции экспериментального оборудования и оснастки с расширенными техническими возможностями за счет изменения направления движения потока макаронного теста, а также интенсивности его сдвигового деформирования.

Реологические аспекты модернизации конструкции испытательного оборудования с расширением технических возможностей. Макаaronное тесто представляет собой реологически сложную систему, деформирование которой связано с преодолением вязкого внутреннего и внешнего трения, а также обусловленных этим трением трибологических эффектов [6–10]. Реологическое поведение пищевых смесей рассмотрено в работах [11–14], а применительно к течению при экструзивном формовании – в работах [15–19]. Специфика предматричного пространства при этом не учитывается [17; 18].

В научно-технической литературе течение высоконаполненных систем изучено только в общетеоретической постановке [12–14], а также применительно к течению высоконаполненных полимерных композитов [20; 21].

Анализ экспериментальных данных показал, что макаронное тесто подчиняется с достаточной для технических расчетов точностью закону вязкого течения Балкли–Гершеля [17; 18]:

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

где τ_0 – сдвиговая прочность материала (минимальные значения напряжений сдвига, при которых начинает происходить необратимое сдвиговое деформирование материала); k – аналог вязкости, называемый коэффициентом консистенции, n – параметр среды, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига.

Размерность k зависит от значения n , поэтому k не является физической величиной: это коэффициент, получаемый в результате аппроксимации кривой течения степенной функцией.

Таблица 1 – Расчетные потери давления на преодоление предельного сопротивления сдвигу τ_0 макаронного теста влажностью 30 % в каналах ступенчато-переменного сечения при температуре 40 °С и давлении 4,9 МПа

Вид муки для макаронного теста	Предельное сопротивление сдвигу, τ_0 , кПа	Потери давления по ступеням, кПа				Суммарные потери давления, кПа
		1-я ступень: $d_1 = 23$ мм, $L_1 = 32$ мм	2-я ступень: $d_2 = 21$ мм, $L_2 = 29$ мм	3-я ступень: $d_3 = 20$ мм, $L_3 = 26$ мм	4-я ступень: $d_4 = 18$ мм, $L_4 = 23$ мм	
Высший сорт	3,28	18,25	18,12	17,06	16,76	70,19
Первый сорт	5,60	31,17	30,93	29,12	28,62	119,84
На основе полукрупки	15,0	83,48	82,86	78,0	76,67	321,01

Примечания: при увеличении температуры происходит уменьшение предельного напряжения сдвига (сдвиговой прочности) материала. В частности, для муки первого сорта: при 18 °С – 18,3 кПа, при 40 °С – 5,6 кПа, при 56 °С – 2,1 кПа.

Вместе с тем ранее выполненные исследования показали, что вклад сдвиговой прочности τ_0 в общее сопротивление течению мал [18]. Например, в таблице 1 приведены расчетные значения потерь давления на преодоление предельного сопротивления сдвигу τ_0 различных видов макаронного теста с содержанием влаги 30 % в каналах ступенчато-переменного сечения при температуре 40 °С и давлении 4,9 МПа.

Из таблицы 1 видно, что вклад τ_0 в общий вклад давления мал (0,3 МПа) в сравнении с общим давлением формования (6,0–12,0 МПа), поскольку он не превышает 2,5...5 %. Основной вклад вносит вязкая составляющая сопротивлению течения. Поэтому при технических расчетах можно осуществлять анализ на основе степенного реологического уравнения Оствальда-де-Вила [17; 21]:

$$\tau \approx k\dot{\gamma}^n. \quad (2)$$

Значения констант k и n для наиболее распространенного состава теста при температуре 40 °С приведены в таблице 2 [18].

Таблица 2 – Расчетные значения констант k и n для наиболее распространенного состава теста при температуре 40 °С

Скорость сдвига $\dot{\gamma}$, с ⁻¹	Значение реологических констант	
	n	k
0,020	0,471	102,79
0,098	0,457	110,47
0,280	0,488	112,18
0,530	0,503	111,72
0,890	0,492	111,60
1,440	0,427	111,05

Источник: [18].

Из представленных данных видно, что показатель степени n обычно меньше единицы, вследствие чего с увеличением скорости сдвигового деформирования эффективная вязкость теста снижается. При этом эффективная вязкость теста определяется как отношение касательных напряжений к скорости сдвигового деформирования:

$$\eta_y = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = k\dot{\gamma}^{n-1}. \quad (3)$$

Без учета влияния сдвиговой прочности теста показатели эффективной вязкости совпадают со значениями так называемой пластической вязкости теста.

Зависимость эффективной (пластической) вязкости $\eta_{пл}$ (кПа·с) макаронного теста из муки различных сортов от скорости сдвига приведена в таблице 3 (влажность 0,30 кг/кг, температура 40 °С, давление 4,9 МПа).

Таблица 3 – Зависимость пластической вязкости $\eta_{пл}$ (кПа·с) макаронного теста из муки различных сортов от скорости сдвига $\dot{\gamma}$ (с⁻¹)

Высший сорт		Первый сорт		Полукрупка	
$\dot{\gamma}$	$\eta_{пл}$	$\dot{\gamma}$	$\eta_{пл}$	$\dot{\gamma}$	$\eta_{пл}$
0,039	520	0,02	1140	0,02	1820
0,21	162	0,098	420	0,12	654
0,38	113	0,28	232	0,43	292
0,85	79	0,53	165	0,84	205
1,77	51	0,89	125	1,36	161
2,66	43	1,44	94	–	–

Источник: [13].

Этот эффект снижения эффективной вязкости при увеличении скорости сдвигового деформирования может быть использован в конструкциях формующей оснастки путем продавливания теста через каналы переменного сечения.

Основной недостаток узлов прессования отечественных и зарубежных производителей проявляется в бесконтрольном (неуправляемом) движении тестового потока в предматричной камере и, как следствие, неравномерной скорости выпрессовывания теста в поперечном сечении матрицы. При проектировании предматричных камер следует также учитывать пульсацию давления в потоке тестовой массы, которая может составлять 20–25 % от максимального значения. При этом большое значение имеет конфигурация предматричного пространства.

Анализ современных технологических решений показывает, что для регулирования (управления) движения тестового потока в предматричной камере наилучшим образом подходит конфигурация камеры, выполненная в виде трубы Вентури [5; 19]. Такая конструкция позволяет не только поддерживать необходимую величину давления, но и не снижает его уровень существенно, что в целом обеспечивает минимальные гидравлические потери, сглаживание пульсации и снижение амплитуды колебаний давления.

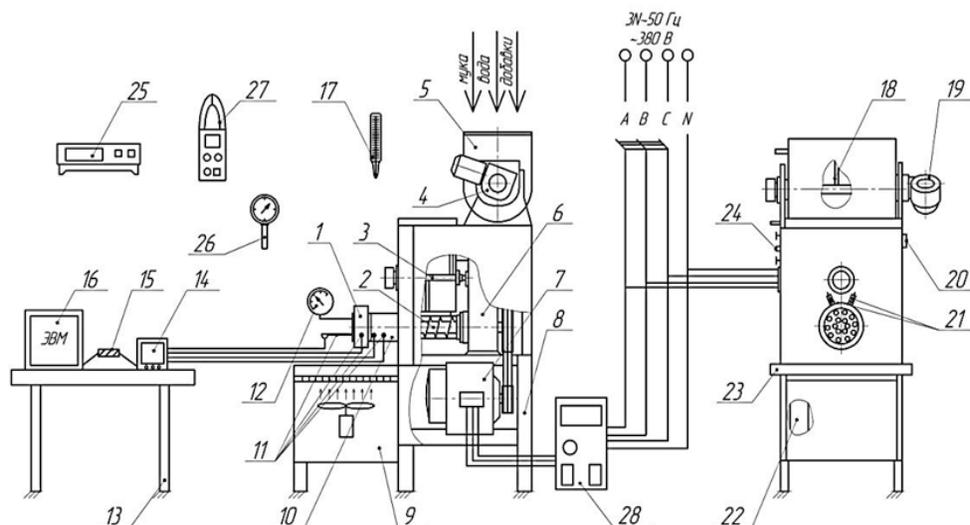
Вместе с тем представляет интерес изучение изменения этих процессов в присутствии, например, в предматричном пространстве трубы Вентури и создание узлов прессования с предварительным уплотнением, пластификацией и разогревом теста. Проведенный анализ показал, что предварительное уплотнение, пластификация и разогрев теста в предматричном пространстве перспективны в технологических процессах производства макаронных изделий. Аналогов предлагаемой технологии в настоящее время не установлено.

Результаты проводимых нами предварительных экспериментов показывают, что управление тестовым потоком в предматричном пространстве с помощью труб Вентури является эффективным способом воздействия на структуру деформированного теста с целью улучшения его свойств [19]. Посредством обработки опытных данных установлено, что применение труб Вентури существенно снижает затраты энергии и необходимое давление при формовании вязко-пластичных материалов, повышает производительность оборудования и улучшает качество изделий. Выявлено, что при использовании конфузorno-диффузornoй вставки в предматричном пространстве имеет место управление тестовым потоком при отсутствии турбулентных завихрений, снижение сил трения при прессовании теста в матрице и, соответственно, снижении давлений, выделения теплоты в очаге деформации непосредственно на поверхности вставки, достигаются значительное увеличение пластичности и снижение внутренних напряжений при уменьшении вязкости и повышении температуры, способствует увеличению ресурса пресс-формы. Здесь же наблюдается интенсификация процесса ползучести и релаксации в уплотняемом материале, уменьшение сил сцепления и трения между частицами, вследствие чего набухшие частицы получают дополнительную возможность проскальзывания и укладываются более плотно, что приводит к увеличению доли направленных и ориентированных по ходу движения теста структурных деформаций, уменьшению необходимых давлений и энергоемкости процесса.

Устройство и принцип действия испытательного стенда. Для проведения экспериментальных исследований был разработан, изготовлен, смонтирован и налажен стенд, который основывается на базе пресс-автомата для производства макаронных изделий МИТ-2 ТУ РБ 200167377,002-2001 и контрольно-измерительной аппаратуры для измерения основных параметров процесса формирования макаронных изделий, соединенные с компьютерной системой контроля параметров процесса формирования. Схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1.

Конфигурация предматричного пространства. Анализ современных технологических решений показывает, что для регулирования (управления) движения тестового потока в предматричной камере наилучшим образом подходит конфигурация камеры, выполненная в виде трубы Вентури. Такая конструкция позволяет не только поддерживать

необходимую величину давления, но и не снижает его уровень существенно, что в целом обеспечивает минимальные гидравлические потери, сглаживание пульсации и снижение амплитуды колебаний давления.



Пояснения: 1 – матрица, 2 – шнек, 3 – подающий вал с лопатками, 4 – червячный редуктор, 5 – смесительный бункер, 6 – редуктор, 7 – привод прессующего корпуса, 8 – рама, 9 – узел обдува, 10 – корпус экструдера, 11 – преобразователи термоэлектрические ТКХ (L)-1199, 12 – датчик давления АИР 10, 13 – стол, 14 – измеритель-регулятор микропроцессорный ТРМ-148, 15 – преобразователь интерфейса, 16 – персональный компьютер, 17 – термометр, 18 – перемешивающий вал смесительного устройства, 19 – привод смесителя, 20 – путевой выключатель, 21 – штуцер охлаждающей рубашки, 22 – блок электрооборудования, 23 – лоток, 24 – пульт управления, 25 – весы электронные, 26 – тахометр – АКИП 9201, 27 – электроизмерительные клещи-ваттметр А-КИП 4022, 28 – преобразователь частоты Е2 – 8300-007Н.

Рисунок 1 – Схема экспериментального стенда

На рисунке 2 представлена принципиальная конструктивная схема узла прессования с управляемым потоком теста в предматричном пространстве с помощью трубы Вентури.

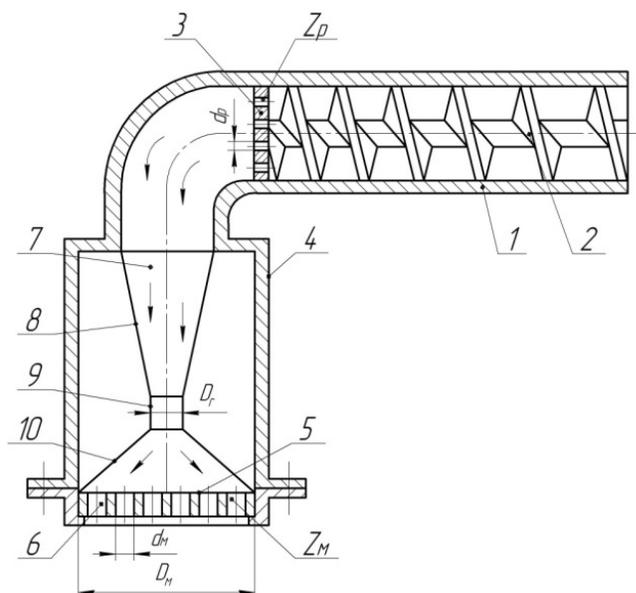


Рисунок 2 – Принципиальная конструктивная схема узла прессования с управлением потока теста в предматричном пространстве (по патенту на изобретение РБ № 23082)

Узел прессования макаронного пресса содержит шнековую камеру 1, шнек нагнетающего типа 2, переформированную направляющую решетку 3 для выравнивания скоростей окончательного перемещения теста с диаметром отверстий d_p и количеством отверстий z_p , прессовую головку 4, выполненную с внутренней камерой в виде цилиндрического патрубка, в нижней части которого расположена матрица 5 с формирующими отверстиями b диаметром d_m и количеством отверстий z_m .

Внутри прессовой головки 4 на матрице 5 установлена вставка 7, состоящая из конфузора 8, горловины 9 и диффузора 10, при этом диаметр диффузора равен диаметру матрицы D_m , конфузуром вставка направлена в сторону шнека, а диффузором она опирается на матрицу 5, т.е. вставка 7 выполнена в виде трубы Вентури. Горловина 9 имеет диаметр D_r . Здесь весьма важно, что поперечное сечение горловины 9 равно суммарной площади поперечных сечений формирующих отверстий b – формирующих механизмов. Стрелками показано направление движения теста.

Устройство работает следующим образом. Макаaronное 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 конфузор 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 b , а теплота трения из механической энергии движения повышает температуру теста и уменьшает его динамическую вязкость.

Выполнение предматричного пространства (камеры) в виде трубы Вентури позволяет управлять (контролировать) потоком теста от шнека до матрицы, при этом происходит предварительное его уплотнение, пластификация и разогрев, т.е. осуществляется предварительная подготовка теста перед входом теста в колдцы матрицы. В этом случае тесто представляет собой более однородную слоистую массу, слои имеют одинаковую форму и толщину, происходит их слипание, между слоями отсутствуют расщелины, они становятся малозаметными, при этом осуществляется постепенное взаимное смещение и трение слоев, что приводит к интенсивному выделению теплоты: тесто перестает закручиваться и в дальнейшем слои лишь расплющиваются с изменением их формы и толщины, однако самое главное достижение – ликвидируются застойные зоны, наблюдается стабилизация потока и понижение его вязкости.

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

Вставка, выполненная в виде трубы Вентури, играет основную роль в подготовке тестовой массы и оказывает решающее влияние на полноту процесса формирования макаронных изделий в формирующих механизмах, а именно;

- осуществляется предварительное и равномерное уплотнение теста в конфузуре и горловине вставки при одновременной его пластификации;
- имеет место предварительный подогрев (разогрев) теста за счет теплоты трения при его движении через конфузор и горловину вставки, вязкость его уменьшается, что обеспечивает более плавный проход теста через формирующие отверстия;
- форма вставки (труба Вентури) имеет минимальное гидравлическое сопротивление, что позволяет не только поддерживать необходимую величину давления, но и не снижать его уровень;
- за счет предварительного уплотнения, дополнительной пластификации и стабилизации потока теста, а также за счет предварительного подогрева тестовой массы и снижения гидравлических потерь в формирующих механизмах скорость выпрессовывания увеличивается, а следовательно, повышается производительность устройства при явном улучшении качества полуфабрикатов.

Для нормальной и эффективной работы узла прессования необходимо, чтобы площадь поперечного сечения горловины F_z была равна суммарной площади формирующих отверстий матрицы, т.е.

$$F_z = Z_m f_m = Z_k N_k \frac{\pi d_m^2}{4}, \quad (4)$$

где Z_m, Z_k – количество формирующих отверстий в матрице и колодце соответственно; f_m, d_m – площадь поперечного сечения и диаметр формирующего отверстия соответственно; N_k – количество колодцев в матрице.

С другой стороны, площадь поперечного сечения горловины связана с ее диаметром при помощи следующей зависимости:

$$F_z = \frac{\pi D_z^2}{4}, \quad (5)$$

где D_z – диаметр горловины.

Отсюда можно определить диаметр горловины:

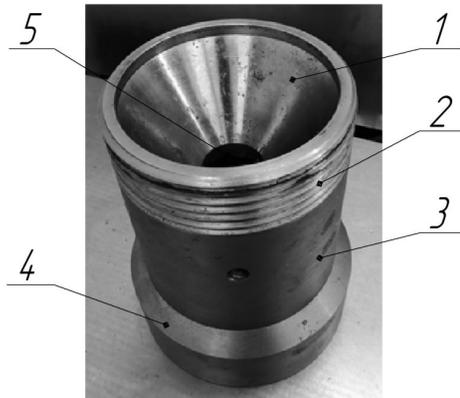
$$D_z = \sqrt{\frac{4Z_m f_m}{\pi}} = d_m \sqrt{Z_m} = d_m \sqrt{Z_k N_k}, \quad (6)$$

Вставку целесообразно изготавливать из того же материала, что и саму матрицу, предпочтительные материалы – бронза БрАЖ9-4, латунь ЛС59-1, нержавеющая сталь ТХ18Н9Т и др. Внутренние поверхности вставки желательно полировать или хромировать, но лучшее покрытие – тефлон (фторопласт). Конструкция вставки должна быть прочной и жесткой, так как она работает под сравнительно высоким избыточным давлением. Главный геометрический параметр вставки – диаметр горловины D_z .

Для разрабатываемого стенда использована установленная в нижней части цилиндрического патрубка стандартная матрица для производства вермишели обыкновенной. Матрица изготовлена из латуни ЛС59-1, имеет наружный диаметр $D_m = 298$ мм. В корпусе матрицы высверлены 102 колодца, внутри которых установлены вкладыши с формирующими отверстиями. В каждом вкладыше просверлено 19 отверстий диаметром 2,3 мм, т.е. $Z = 19$, $d_m = 2,3$ мм. Перед матрицей плотно и неподвижно установлена вставка в виде трубы Вентури, диффузором опирающаяся на матрицу, при этом диаметр диффузора равен диаметру корпуса матрицы D_m . Определяем диаметр цилиндрической горловины вставки D_z :

$$D_z = d_m \sqrt{Z_k N_k} = 2,3 \sqrt{19 \cdot 102} = 101,25 \text{ мм.}$$

Можно оставить вычисленное значение или в соответствии с ГОСТ 8032-84 «Предпочтительные числа и ряды чисел» рекомендуется принять $D_z = 100$ мм, что обеспечивает равенство основных проходных поперечных сечений в горловины и формирующих отверстий матрицы.



Пояснени: 1 – диффузор, 2 – резьба, 3 – корпус камеры, 4 – конфузор, 5 – горловина.

Рисунок 3 – Фотография предматричной камеры, внутренняя конфигурация которой выполнена в виде трубы Вентури

Для экспериментальной проверки теоретических предпосылок на заводе ОАО «Торгмаш» (г. Барановичи) был изготовлен опытно-промышленный образец предматричной камеры к пресс-автомату МИТ-2, конфигурация которой имеет вид трубы Вентури. На рисунке 3 представлена фотография такой предматричной камеры. Конфузором вставка устанавливается в сторону шнека, а диффузором она опирается на матрицу, рабочее положение камеры – горизонтальное.

Методика проведения испытаний. Конструктивными и режимными входными регулируемые параметрами макаронного пресса выбраны: температура матрицы (t , °C), частота вращения шнека ($n_{вр}$, об/мин), влажность теста (W_T), конструктивные особенности матрицы (мм). В качестве выходных параметров выбраны: производительность макаронного пресса (P , кг/ч), прирост температуры сырья (теста) во время формования (t , °C), давление в предматричном пространстве (P , МПа) и удельная энергоёмкость процесса ($n_{уд}$, Вт·ч/кг).

Методика подготовки сырья теста. Для проведения сравнительного эксперимента в качестве базовой выбирают муку хлебопекарную высшего сорта М-54 (СТБ 1666-2066 «Мука пшеничная» ТУ).

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 (теста) включает следующие этапы:

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

Влажность муки определяется по ГОСТ 9404-60. Данный метод предусматривает высушивание навесок муки в электрических сушильных шкафах типа СЭШ. При расчете влажности учитывается, что удаление влаги проводится в два приема, поэтому для вычисления влажности (%) используется формула

$$W_T = [1 - (b_1 \cdot b_2) / (a_1 \cdot a_2)] \cdot 100, \quad (7)$$

где b_1 – масса первой навески после подсушки, г; b_2 – масса второй навески после подсушки, г; a_1 – масса первой навески до подсушки, г; a_2 – масса второй навески до сушки, г.

Программа и методика проведения эксперимента. При проведении экспериментальных исследований используются следующие контрольно-измерительные приборы:

- термопары ТХК (L)-1199/15/2/180/6(3)/-40...400 °C по ГОСТ 8.338-2002;
- преобразователь давления измерительный АИР-10/М1 ДИ, модель 1172 Е по НКГЖ.406233.005ПС с диапазоном измерений 0...10 МПа, класс точности С;
- тахометр АКИП-9202 с пределом измерений от 6,0 до 100,000 об/мин, погрешностью измерения 0,1 об/мин;
- электроизмерительные клещи-ваттметр А-КИП 4022 по требованиям стандарта МЭК 61010 с пределом измерений от 10 до 1 000 000 Вт, с погрешностью измерения $\pm 3,5$ %;
- векторный преобразователь частоты со встроенным PLC-контроллером Е2-8300-007Н № 0316011095120 по ВАЮУ.435Х21.006ТУ с номинальной мощностью электродвигателя для трехфазной сети от 0,75 до 5,5 кВт, с диапазоном регулирования частоты от 0,1 до 650 Гц, точностью регулирования $\pm 0,5$ % и дискретностью 0,01 Гц;
- термометр лабораторный по ГОСТ 28498-90 с пределом измерений от 0 до 50 °C и ценой деления 0,5 °C;
- весы электронные портативные SC 4010 по ГОСТ 29329-92 с погрешностью измерений 0,01 г в диапазоне от 0,01 до 400 г.

Компьютерная система контроля включает:

- измеритель-регулятор микропроцессорный ТРМ-148 ТУ 4217-004-46526536-2006;
- преобразователь интерфейсов АС4 ТУ 4218-003-46526536-2006 (сертификат соответствия № 03.009.0331);
- персональный переносной компьютер Extensa 5630EZ.

Температура теста во время процесса формования контролируется с помощью хромель-капельных термопар 11, подключенных к измерителю-регулятору микропроцессорному ТРМ-148, который через преобразователь интерфейсов соединяется с персональным переносным компьютером 16. Давление, создаваемое тестом в предматричной камере, измеряется преобразователем давления АИР-10/М1 ДИ 12, который также подключается к измерителю-регулятору микропроцессорному ТРМ-148 14. Контроль температуры полуфабриката осуществляется термометром 17. Удельная энергоёмкость макаронного пресса во время процесса формования контролируется электроизмерительными клещами-ваттметром 27. Частота вращения шнека макаронного пресса регулируется векторным преобразователем частоты со встроенным PLC-контроллером Е2-8300-007Н 26.

Результаты эксперимента. На основании экспериментальных данных строятся зависимости производительности пресса от частоты вращения шнека, давления в предматричном пространстве, номинальной мощности от частоты вращения шнека, производительности пресса от давления в предматричном пространстве и проводится анализ полученных результатов. Для новых составов муки или новых режимов формования сравниваются полученные данные с аналогичными данными для базового состава муки хлебопекарной высшего сорта М-54 (СТБ 1666-2066 «Мука пшеничная» ТУ).

Предварительные испытания показали, что новая конструкция предматричной камеры на 15–20 % увеличивает производительность пресса, на 5–7 % снижает давление теста и повышает его температуру за счет предварительного уплотнения и уменьшения вязкости, а дополнительная пластификация теста улучшает его характеристики, повышает качество готовых изделий при этом увеличивается скорость выпрессовывания теста, а удельные энергозатраты снижаются.

Заключение. Разработана конструкция испытательного стенда на базе пресс-автомата МИТ-2, снабженного системой управления движением потока теста в предматричной камере. Модернизация конструкции позволяет расширить технические возможности за счет двух следующих особенностей. Первая особенность состоит в наличии системы изменения направления движения макаронного теста с только горизонтального у традиционной конструкции на вертикальное, или наклонное, или горизонтальное, что обеспечивается применением поворотного углового адаптера. Второй особенностью стенда является включение в состав его конструкции специальных элементов (конического, коническо-цилиндрического и/или конфузорно-диффузорного типа, например трубки Вентури) для регулирования гидродинамического сопротивления. Элементы предназначены для установки как в колодцах матрицы, так и в предматричной зоне.

Произведенные усовершенствования направлены на изучение процессов формования макаронных изделий в узлах прессования с целью снижения энергетических затрат, повышения их прочности и качества, увеличения срока хранения. Предложен и реализован механизм использования предматричного пространства для предварительного уплотнения, пластификации и разогрева теста, повышения плотности макаронных изделий, увеличения производительности пресса и снижения удельных энергозатрат.

Техническая новизна нового узла прессования подтверждается патентом на изобретение РБ № 23082.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернов, М. С. Справочник по макаронному производству / М. С. Чернов, Г. М. Медведев, В. П. Негруб. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 280 с.
2. Пути улучшения качества макаронных изделий / М. И. Васин, М. А. Калинина, С. А. Парфенова. – М. : ЦНИИТЭИхлебопродуктов, 1991. – 24 с. – (Обзорная информация / Серия: Хлебопекарная и макаронная промышленность).
3. Мачихин, Ю. А. Формование пищевых масс / Ю. А. Мачихин, Г. К. Берман, Ю. В. Клаповский. – М. : Колос, 1992. – 272 с.
4. Груданов, В. Я. Процесс формования макаронных изделий в узлах прессования с улучшенными гидравлическими и технологическими характеристиками / В. Я. Груданов, А. Б. Торган, В. М. Поздняков // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Серыя фіз.-тэх. навук. – 2013. – № 2. – С. 58–65.
5. Трубы Вентури. Технические условия : ГОСТ 23720-79. – М. : Гос. комитет СССР по стандартам, 1979. – 17 с.

6. Demianiuk, L. Siły i odkształcenia występujące podczas brykietowania materiałów drobnoziarnistych w komorze orwartej-analiza doświadczalna / L. Demianiuk, R. Hejft, A. Seweryn // Zeszyty naukowe Politechniki Białostockiej. Nauki Techniczne. Mechanika. – 1999. – Nr. 130. – S. 95–107.
7. Fabrode, M. O. Archeological model for the compaction of fibrous agricultural materials / M. O. Fabrode, J. R. Callaghan // J. Agric. Eng. Res. – 1989. – Vol. 42, No. 5. – P. 165–178.
8. Hryniewicz, M. Zmienność tarcia zewnętrznego w procesie brykietowania / M. Hryniewicz // Zeszyty naukowe AGH. Mechanika. – 1994. – T. 13, z. 4. – S. 555–563.
9. Барсуков, В. Г. Технологическое трение при экструзии композитов / В. Г. Барсуков, А. И. Свириденко. – Гродно : ГрГУ, 1998. – 201 с.
10. Медведев, Г. М. Технология макаронного производства : учебник для вузов / Г. М. Медведев. – М. : Колос, 1998. – 272 с.
11. Назаров, Н. И. Технология макаронных изделий : учебник для вузов / Н. И. Назаров. – 2-е изд., перераб и доп. – М. : Пищевая промышленность, 1978. – 286 с.
12. Мачихин, Ю. А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю. А. Мачихин, С. А. Мачихин. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с.
13. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов / А. В. Горбатов [и др.] ; под ред. А. В. Горбатова. – М. : Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 296 с.
14. Ковальская, Л. П. Технология пищевых производств / Л. П. Ковальская. – М. : Колос, 1999. – 752 с.
15. Остриков, А. Н. Экструзия в пищевой технологии / А. Н. Остриков, О. В. Абрамов, А. С. Рудометкин. – СПб. : ГИОРД, 2004. – 288 с.
16. Гаевой, А. Д. Исследование течения вязкопластичных сред в каналах и полостях с изменяемыми формами их стенок (Элементы теории и технические приложения) / А. Д. Гаевой, А. Д. Климов, В. М. Ченоков. – М. : Агропромиздат, 1995. – 112 с.
17. Торган, А. Б. Анализ реологических аспектов течения макаронного теста в каналах ступенчато-переменного сечения с использованием нелинейной модели Балкли–Гершеля / А. Б. Торган // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2015. – № 3. – С. 64–71.
18. Торган, А. Б. Методика оценки вклада пластичной и вязкой составляющих в сопротивление течения макаронного теста / А. Б. Торган // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка. – 2015. – № 1 (198). – С. 90–98.
19. Торган, А. Б. Управление течением макаронного теста в формирующих матрицах прессы с помощью конфузorno-диффузорных вставок / А. Б. Торган, В. Я. Груданов, В. Г. Барсуков // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка. – 2020. – Т. 10, № 1. – С. 87–96.
20. Тадмор, З. Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос ; пер. с англ. ; под ред. Р. В. Торнера. – М. : Химия, 1984. – 632 с.
21. Смольский, Б. М. Реодинамика и теплообмен нелинейно вязкопластичных материалов / Б. М. Смольский, З. П. Шульман, В. М. Гориславец. – Минск : Наука и техника, 1970. – 448 с.

Поступила в редакцию 09.02.2021.

“Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science”

Vol. 11, No. 1, 2021, pp. 75–85

© Yanka Kupala State University of Grodno, 2021

Test equipment and equipment for studying the processes of forming pasta with a controlled flow of dough in the pre-matrix chamber

V. Ya. Grudanov¹, A. B. Torgan²

¹ Belarusian State Agrarian Technical University (Belarus)

Nezavisimosti Ave., 99, 220023, Minsk, Belarus; e-mail: pererabotka.kafedra@mail.ru

² Belarusian State Agrarian Technical University (Belarus)

Nezavisimosti Ave., 99, 220023, Minsk, Belarus; e-mail: anechkat@tut.by

Abstract. In the introduction, it is noted that the process of pressing pasta is characterized by high specific energy costs and uneven output of the extruded dough from the forming holes of the matrix. Along with the theoretical analysis of the problem complex experimental studies of the rheological aspects of forming such products are necessary. The test equipment and equipment currently used do not allow modeling and studying the flow of pasta dough in various channels including channels of variable cross-section. The purpose of the work is to create a design an experimental equipment and devices with advanced technical capabilities that allow controlling the flow of dough movement including by changing the direction of movement of this flow as well as the intensity of its shear deformation. In the theoretical part, the rationale of the rheological aspects for design modernization of test equipment and devices is given. The main part describes the developed design of the test bench based on the MIT-2 automatic press, equipped with a control system for the movement of the test flow in the pre-matrix chamber. Upgrading allows you to expand the technical capabilities due to the system changes the movement direction of pasta dough with only horizontal traditional design on a vertical, or sloping, or horizontal, which

is achieved by using turning the corner of the adapter. The second feature of the stand is the inclusion in its design of special elements (conical, conical-cylindrical and/or confusor-diffuser type, for example, Venturi tubes) to regulate the hydrodynamic resistance. The elements are designed for installation both in the matrix wells and in the pre-matrix zone. The method of conducting experiments with the use of upgraded equipment is given. In conclusion, it is noted that the improvements made are aimed at studying the processes of forming pasta in pressing units in order to reduce energy costs increase their strength and quality and increase the shelf life.

Keywords: pasta dough, rheological models, flow, confusor, diffuser, insert.

References

1. Chernov M. S., Medvedev G. M., Negrub V. P. Handbook of pasta production [*Spravochnik po makaronnomu proizvodstvu*]. Moscow, 1984, 280 p.
2. Vasin M. I., Kalinina M. A., Parfenova S. A. Ways to improve the quality of pasta [*Puti uluchsheniia kachestva makaronnykh izdelii*]. Moscow, 1991, 24 p.
3. Machikhin Yu. A., Berman G. K., Klapovski Yu. V. Formation of food masses [*Formovanie pishchevykh mass*]. Moscow, 1992, 272 p.
4. Grudanov V. Ya., Torgan A. B., Pozdniakov V. M. The process of forming pasta in pressing units with improved hydraulic and technological characteristics [*Protsess formovaniia makaronnykh izdelii v uzlakh pressovaniia s uluchshennymi gidravlicheskimi i tekhnologicheskimi kharakteristikami*]. *Vesti of Nat. Acad. Sciences of Belarus. Series physical and technical sciences*, 2013, No. 2, pp. 58-65.
5. Venturi pipes. Technical conditions [*Truby Venturi. Tekhnicheskie usloviia*]: GOST 23720-79. Moscow, 1979, 17 p.
6. Demianiuk L., Hejft R., Seweryn A. Forces and deformations occurring during briquetting of fine-grained materials in an orthopedic chamber - experimental analysis [*Sily i odkształcenia występujące podczas brykietowania materiałów drobnoziarnistych w komorze ortopedycznej - analiza doświadczalna*]. *Scientific notebooks of the Białystok University of Technology. Technical studies. Mechanics*, 1999, No. 130, pp. 95-107.
7. Fabrode M. O., Callaghan J. R. Archeological model for the compaction of fibrous agricultural materials. *J. Agric. Eng. Res.*, 1989, vol. 42, No. 5, pp. 165-178.
8. Hryniewicz M. Variability of external friction in the briquetting process [*Zmienność tarcia zewnętrznej w procesie brykietowania*]. *AGH scientific notebooks. Mechanics*, 1994, vol. 13, issue 4, pp. 555-563.
9. Barsukov V. G., Sviridenok A. I. Technological friction during the extrusion of composites [*Tekhnologicheskoe trenie pri ekstruzii kompozitov*]. Grodno, 1998, 201 p.
10. Medvedev G. M. Technology of pasta production [*Tekhnologiia makaronnogo proizvodstva : uchebnik dlia vuzov*]. Moscow, 1998, 227 p.
11. Nazarov N. I. Technology of pasta [*Tekhnologiia makaronnykh izdelii : uchebnik dlia vuzov*]. 2nd ed. Moscow, 1978, 286 p.
12. Machikhin Yu. A., Machikhin S. A. Engineering rheology of food materials [*Inzhenernaia reologiia pishchevykh materialov*]. Moscow, 1981, 216 p.
13. Gorbatov A. V. [et al.]. Structural and mechanical characteristics of food products [*Strukturno-mekhanicheskie kharakteristiki pishchevykh produktov*]; Ed. by A. V. Gorbatov. Moscow, 1982, 296 p.
14. Kovalskaya L. P. Technology of food production [*Tekhnologiia pishchevykh proizvodstv*]. Moscow, 1999, 752 p.
15. Ostrikov A. N., Abramov O. V., Rudometkin A. S. Extrusion in food technology [*Ekstruziia v pishchevoi tekhnologii*]. St. Petersburg, 2004, 288 p.
16. Gaevoi A. D., Klimov A. D., Chenokov V. M. Investigation of the flow of visco-plastic media in channels and cavities with variable shapes of their walls (Elements of theory and technical applications) [*Issledovanie techeniia viazkoplachichnykh sred v kanalakh i polosniakh s izmeniaemyimi formami ih stenok (Elementy teorii i tekhnicheskie prilozheniia)*]. Moscow, 1995, 112 p.
17. Torgan A. B. Analysis of the rheological aspects of the course of pasta dough in the channels of stepwise variable section using the non-linear Balkley-Herschel model [*Analiz reologicheskikh aspektov techeniia makaronnogo testa v kanalakh stupenchato-peremennogo secheniia s ispol'zovaniem nelineinnoi modeli Balkli-Gershelia*]. *Food industry: science and technology*, 2015, No. 3, pp. 64-71.
18. Torgan A. B. Methodology for assessing the contribution of plastic and viscous components to resistance to the flow of pasta dough [*Metodika otsenki vklada plastichnoi i vyazkoi sostavliushchikh v soprotivlenie techeniiu makaronnogo testa*]. *Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science*, 2015, No. 1 (198), pp. 90-98.
19. Torgan A. B., Grudanov V. Ya., Barsukov V. G. Control of the flow of pasta dough in the forming matrices of the press with the help of confusor-diffuser inserts [*Upravlenie techeniem makaronnogo testa v formuiushchikh matritsakh pressa s pomoshch'iu konfuzorno-diffuzornykh vstavok*]. *Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science*, 2020, vol. 10, No. 1, pp. 87-96.
20. Tadmor Z., Gogos K. Theoretical foundations of polymer processing [*Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov*]; transl. from Engl.; Ed. by R. V. Thorner. Moscow, 1984, 632 p.
21. Smolski B. M., Shulman Z. P., Gorislavets V. M. Rheodynamics and heat transfer of nonlinear viscous-plastic materials [*Reodinamika i teploobmen nelineino viazkoplachichnykh materialov*]. Minsk, 1970, 448 p.