

ISSN 1817-7204(Print)
ISSN 1817-7239(Online)

ПЕРАПРАЦОЎКА І ЗАХАВАННЕ СЕЛЬСКАГАСПАДАРЧАЙ ПРАДУКЦЫ *PROCESSING AND STORAGE OF AGRICULTURAL PRODUCTS*

УДК 664.692.5
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-1-115-128>

Поступила в редакцию 24.11.2021
Received 24.11.2021

В. Я. Груданов, А. Б. Торган, В. Г. Барсуков

Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМОВАНИЯ МАКАРОННЫХ ИЗДЕЛИЙ В УЗЛАХ ПРЕССОВАНИЯ С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ДВУХСТУПЕНЧАТЫМ УПЛОТНЕНИЕМ, ПЛАСТИФИКАЦИЕЙ И РАЗОГРЕВОМ ТЕСТА

Аннотация: Одним из эффективных направлений модернизации конструкций макаронных прессов является установка в предматричном пространстве и колодцах матрицы перед фильерами специальных коническо-цилиндрических вставок, имеющих, подобно трубкам Вентури, зоны сужения (конфузор), расширения (диффузор) и расположенный между ними цилиндрический пояс. Однако реологические аспекты такого метода модернизации формообразующей оснастки применительно к макаронным прессам не изучены, рекомендации по расчету и проектированию конструктивных элементов не разработаны. Все это является существенным препятствием для использования метода в инженерной и производственной практике. Цель работы – разработка реологических моделей течения макаронного теста в коническо-цилиндрических каналах конфузорно-диффузорных вставок и оценка с их помощью влияния конструктивных размеров и показателей реологических свойств на сопротивление течению макаронного теста. Макаронное тесто рассматривали как реологически сложный, нелинейно вязко-пластичный материал. При технических расчетах вкладом сдвиговой прочности пренебрегали и осуществляли реологический анализ с использованием степенного реологического уравнения Освальда-де-Вила. Получены аналитические зависимости, позволяющие производить расчет перепадов давления в конфузорно-диффузорной вставке и ее элементах. Произведено численное моделирование и получены расчетные данные по влиянию размеров конструктивных элементов вставки и расхода макаронного теста через вставку на сопротивление его вязкому течению. Полученные результаты могут составить основу инженерно-технологических расчетов при проектировании конфузорно-диффузорных вставок для лабораторных и промышленных макаронных прессов.

Ключевые слова: макаронное тесто, реологические модели, течение, конфузор, диффузор, вставка, трубы Вентури, колодцы предматричной камеры, объемный расход, уплотнение теста, пластификация теста, вязкость теста

Для цитирования: Груданов, В. Я. Технологические и реологические основы формования макаронных изделий в узлах прессования с предварительным двухступенчатым уплотнением, пластификацией и разогревом теста / В. Я. Груданов, А. Б. Торган, В. Г. Барсуков // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. аграр. наук. – 2022. – Т. 60, № 1. – С. 115–128. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-1-115-128>

Vladimir Ya. Grudanov, Anna B. Torgan, Vladimir G. Barsukov

Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus

TECHNOLOGICAL AND RHEOLOGICAL BASES FOR MOLDING PASTA IN PRESS HOUSES WITH PRELIMINARY TWO-STAGE COMPACTION, PLASTICIZATION AND WARMING OF DOUGH

Abstract: One of efficient directions for pasta press designs modernization is installation of special conical-and-cylindrical inserts in the pre-matrix space and matrix wells in front of the dies having, like Venturi tubes, narrowing zones (convergent), expansion (divergent) and a cylindrical path located between them. However, rheological aspects of such method of forming tool modernizing in relation to pasta presses have not been studied, recommendations for structural elements calculation and design have not been developed. All this is a significant obstacle for using the method in engineering and industrial practice. The research purpose is to develop rheological models the pasta dough flow in the conical-cylindrical

channels of convergent-divergent inserts and to evaluate with their help the impact of structural dimensions and rheological properties on resistance to pasta dough flow. Pasta dough was considered as a rheological complex nonlinearly viscous plastic material. In technical calculations contribution of shear strength was neglected and a rheological analysis was performed using the Oswald-de-Ville power law equation. Analytical dependences obtained make it possible to calculate the pressure drops in the convergent-divergent insert and its elements. Numerical modeling was performed and calculated data were obtained regarding the impact of dimensions of structural elements of the insert and rheological parameters of pasta dough on its resistance to viscous flow. The results obtained can form the basis of engineering and technological calculations in design of convergent-divergent inserts for laboratory and industrial pasta presses.

Keywords: pasta dough, rheological models, flow, confuser, diffuser, insert, Venturi pipes, pre-matrix chamber wells, volumetric flow rate, dough compaction, dough plasticization, dough viscosity

For citation: Grudanov V.Ya., Torgan A.B., Barsukov V.G. Technological and rheological bases for molding pasta in press houses with preliminary two-stage compaction, plasticization and warming of dough. *Vestsi Natsyyanal'ny akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2022, vol. 60, no 1, pp. 115-128 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2022-60-1-115-128>

Введение. Одним из эффективных направлений модернизации конструкций прессового оборудования для производства макаронных изделий является расширение функциональных возможностей недостаточно эффективно используемых конструктивных элементов¹. К числу таких малоэффективных элементов относятся колодцы матриц макаронных прессов, которые, занимая достаточно большой объем, не выполняют технологически важных функций.

Известно, что наибольшее распространение в макаронной промышленности получили матрицы толщиной 60–110 мм, и даже до 140 мм, при этом толщина (высота) фильерных вкладышей с формующими отверстиями составляет всего 10–21 мм. Так, например, на филиале «Боримак» УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» эксплуатируются автоматические линии по производству коротких макаронных изделий фирмы «FAVAS.p.A.» (Италия), оснащенные матрицами фирмы Landucci толщиной $H = 110$ мм, в колодцах которых установлены фильерные вкладыши высотой $h = 21$ мм.

Поперечное сечение колодцев значительно больше суммарной площади формующих отверстий вставок, что обуславливает неравномерность движения теста из колодцев в формующие отверстия. При этом в колодцах практически не происходит предварительного уплотнения и пластификации теста, т.е. отсутствует предварительная подготовка теста к процессу формования.

Важнейшим конструктивным элементом узлов прессования является предматричная камера.

Последним витком шнека тесто подается в предматричное пространство, закрученный поток теста здесь как бы втекает в полость матричной головки, встречая там тесто, ранее заполнившее эту полость.

Закрученный поток ввинчивается в тесто, находящееся в предматричном пространстве, и, встретив его сопротивление, замедляет свое вращение, постепенно переходя к поступательному движению. При таком сложном характере движения тесто приобретает структуру с ярко выраженной неоднородной слоистой массой, меняется форма слоев и уменьшается их толщина, а между слоями наблюдаются расщелины, т.е. структура теста ухудшается, а пластичность и эластичность снижаются. В предматричном пространстве поток теста фактически становится неуправляемым (неконтролируемым), движение потока носит хаотичный, ярко выраженный турбулентный характер, полностью отсутствует предварительное уплотнение, пластификация и разогрев теста перед входом его в колодцы матрицы. В этой связи одним из эффективных способов воздействия на структуру деформированного теста и управления тестовым потоком является выполнение внутренней конфигурации предматричной камеры в виде трубы Вентури.

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.

Аналогов предлагаемой технологии в настоящее время не установлено.

¹ Чернов М. С., Негруб В. П., Медведев Г. М. Справочник по макаронному производству. М.: Лег. и пищевая промышленность, 1984. 304 с. Пути улучшения качества макаронных изделий : обзор. информ. / М. И. Васин [и др.]. М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1991. 24 с. ; Мачихин Ю. А., Берман Г. К., Клаповский Ю. В. Формование пищевых масс. М. : Колос, 1992. 272 с.

Результаты проводимых нами 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 [1].

Обработка опытных данных показала, 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 конфузочно-диффузорной 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, достигается 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 энергоёмкости процесса.

Макаронное тесто в реологическом отношении принадлежит к разряду упруго-пластично-вязких тел, для которых характерно сочетание вязкого течения и упруго-пластичных деформаций. Основной недостаток в узлах прессования отечественных и зарубежных производителей проявляется в неконтрольном (не управляемом) движении тестового потока в предматричной камере и, как следствие, неравномерная скорость выпресовывания теста в поперечном сечении матрицы, при этом большое значение имеет конфигурация предматричного пространства. При проектировании предматричных камер следует также учитывать пульсацию давления в потоке тестовой массы, которая может составлять 20–25 % от максимального значения.

Конструкция трубы Вентури 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.

Цель настоящей работы – повышение качества формования макаронных изделий путем управления потоком теста в конфузочно-диффузорных вставках, установленных в предматричной камере узла прессования и в колодцах матрицы и осуществляющих предварительное двухступенчатое уплотнение, пластификацию и разогрев теста перед входом его в формирующий механизм.

Теоретическая часть. Практическая разработка. Для управления потоком теста в предматричном пространстве с целью оптимизации конфигурации предматричного пространства (канала) принята труба Вентури.

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

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 потрубка, 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 , конфузоре 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.

Устройство работает следующим образом. Макаронное тесто с помощью шнека нагнетающего типа 2, расположенного в шнековой камере 1, преодолевая сопротивление перфорированной

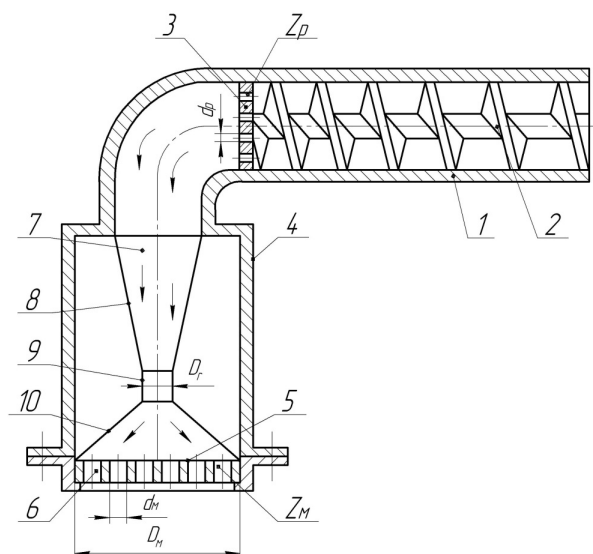


Рис. 1. Принципиально-конструктивная схема узла прессования с управлением потока теста в предматричном пространстве (по патенту на изобретение РБ № 23082). Стрелками показано направление движения теста

Fig. 1. Conceptual and structural diagram of the pressing unit with control of the dough flow in the pre-matrix space (according to the patent for the invention of the Republic of Belarus No. 23082). The arrows show the direction of dough movement

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 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).

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

1) осуществляется предварительное и равномерное уплотнение теста в конфузоре и горловине вставки при одновременной его пластификации;

2) 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;

3) форма вставки (труба Вентури) имеет минимальное гидравлическое сопротивление, это позволяет не только поддерживать необходимую величину давления, но и не снижать его уровень;

4) за счет предварительного уплотнения, дополнительной пластификации и стабилизации потока теста, а также за счет предварительного подогрева тестовой массы и снижения гидравлических потерь в формующих механизмах скорость выпрессовывания увеличивается, следовательно, повышается производительность устройства при явном улучшении качества полуфабрикатов.

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

$$F_r = \sum Z_m d_m,$$

где Z_m – количество формирующих отверстий в матрице; d_m – диаметр формирующего отверстия.

$$\text{С другой стороны, } F_r = \frac{D_r^2}{\sqrt{\Phi}} = \frac{D^2}{\sqrt{1,618}},$$

где D_r – диаметр горловины; $\Phi \approx 1,618...$ – значение золотого сечения.

Заметим, что $\sqrt{\Phi} = \sqrt{1,618} \approx 1,272$.

Отсюда можно определить диаметр горловины:

$$D_r^2 = \sqrt{\Phi} \Sigma Z_m d_m = 1,272 \Sigma Z_m d_m,$$

или

$$D_r = \sqrt{1,272 \Sigma Z_m d_m}.$$

Управление потоком теста в колодцах матрицы, как отмечалось во введении, одним из эффективных направлений модернизации конструкций прессового оборудования для производства макаронных изделий является установки перед фильерами специальных коническо-цилиндрических вставок, имеющих, подобно трубкам Вентури, сужения (конфузор), расширения (диффузор) и цилиндрического перехода (горловины) между ними (рис. 2). При этом, в зависимости от соотношения длин конфузора и диффузора, возможно несколько конструктивных исполнений, например, в виде симметричного вкладыша-вставки или несимметричных типа проточной или противоточной (обратной) трубки Вентури, применение которых, как известно, обеспечивает в гидросистемах минимально возможные гидравлические потери².

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 конфузоре, 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.

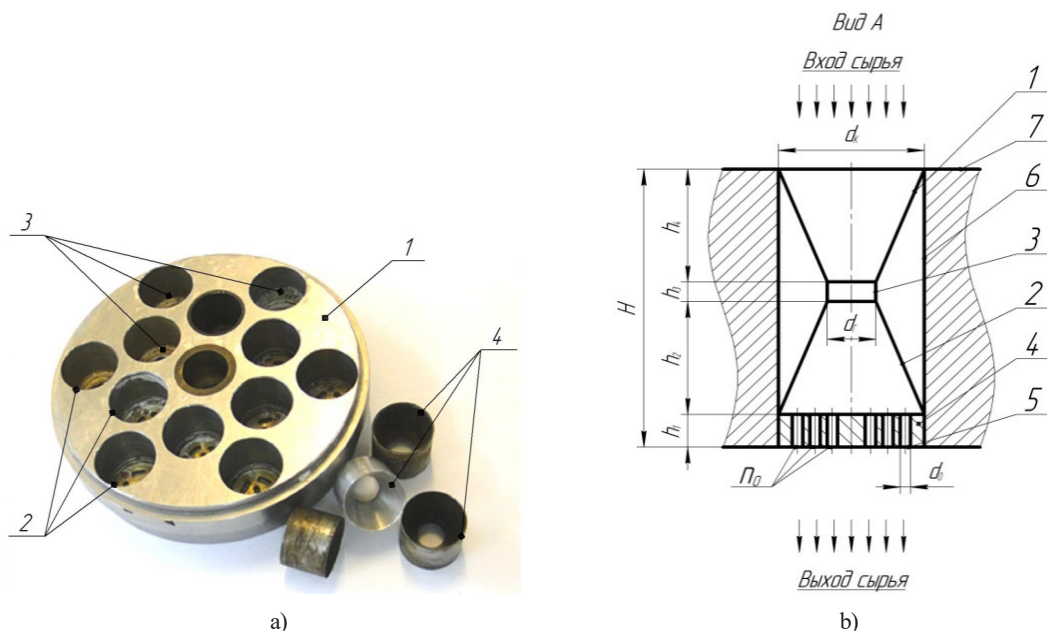


Рис. 2. Общий вид (а) и конструктивная схема (б) матрицы с конфузорно-диффузорными вставками к малому макаронному прессу МИТ-2: 1 – матрица; 2 – колодцы; 3 – вкладыши; 4 – вставки. Стрелками указано направление движения исходного сырья

Fig. 2. General view (a) and structural scheme (b) of the matrix with confuser-diffuser inserts for the small pasta press MIT-2: 1 - matrix; 2 - wells; 3 - liners; 4 - inserts. The arrows indicate the direction of movement of the feedstock

² Трубы Вентури. Технические условия : ГОСТ 23720–79 / Гос. ком. СССР по стандартам. М., 1979. 17 с.

Вставка установлена в колодце 6 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. Рабочее положение матрицы – горизонтальное. Под матрицей устанавливается вращающийся нож для отрезания отформованных изделий (не показан).

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 антикоррозионных и прочих материалов, таких как бронза Бр-АЖ9-4, латунь ЛС59-1, нержавеющая сталь 1Х18Н9Т. Внутренние поверхности вставки (конфузор, горловина и диффузор) желательно полировать или хромировать, но лучшее покрытие – тефлон (фторопласт).

Для нормальной и эффективной работы устройства необходимо, чтобы площадь поперечного сечения горловины вставки была равна суммарной площади формующих отверстий вкладыша, т.е.

$$F_r = \Sigma n_0 d_0 \text{ или } \frac{d_r^2}{\sqrt{\Phi}} = \Sigma n_0 d_0,$$

где d_0 – диаметр формующего отверстия; n_0 – количество формующих отверстий во вкладыше; $\Phi = 1,618$ (значение золотого сечения), а $\sqrt{\Phi} = 1,272$.

Отсюда можно найти диаметр горловины:

$$\begin{aligned} d_r^2 &= \sqrt{\Phi} \Sigma n_0 d_0 = 1,272 \Sigma n_0 d_0, \\ d_r &= \sqrt{1,272 \Sigma n_0 d_0}. \end{aligned}$$

Реологические основы течения макаронного теста в коническо-цилиндрических каналах конфузорно-диффузорной вставки. Построение математических моделей.

Макаронное тесто представляет собой реологически сложную систему, деформирование которой связано с преодолением вязкого внутреннего и внешнего трения, а также обусловлено этим трением триборологических эффектов [2–6]. Реологическое поведение пищевых смесей рассмотрено в работах [7–9], а применительно к течению при экструзивном формовании – в работах [10, 11]. Специфика макаронного теста при этом не учитывается [12, 13].

В научно-технической литературе течение высоконаполненных систем изучено только в общетеоретической постановке [7, 8], а также применительно к течению высоконаполненных полимерных композитов [2–6].

Анализ экспериментальных данных показал, что макаронное тесто подчиняется с достаточной для технических расчетов точностью закону вязкого течения Балкли–Гершеля [12, 13].

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

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.

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

Вместе с тем ранее выполненные исследования показали, что вклад сдвиговой прочности τ_0 в общее сопротивление течению мал [13]. Например, в табл. 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 давления 4,9 МПа.

Из табл. 1 видно, что вклад τ_0 в общий вклад давления мал (0,3 МПа) по сравнению с общим давлением формования (6,0–12,0 МПа), поскольку он не превышает 2,5–5,0 %. Основной вклад вносит вязкая составляющая сопротивлению течения, поэтому при технических расчетах можно осуществлять анализ на основе степенного реологического уравнения Освальда-де-Вила [12, 14].

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

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

Table 1. Calculated pressure losses for overcoming the maximum shear resistance τ_0 of pasta dough with a humidity of 30% in channels of step-variable cross-section at a temperature of 40 °C and pressure of 4.9 Мpa

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

Примечание. 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.

С использованием методических подходов, изложенных в работах [11, 14–16], рассмотрим течение макаронного теста в отдельных зонах (участках) рассматриваемого конфузочно-диффузорного канала.

Цилиндрический участок. Зависимость объемной производительности Q от перепада давления P_u , размеров канала (длины L_u , радиуса R) и показателей реологических свойств k , n имеет следующий вид [14, с. 90]:

$$Q = \frac{\pi n}{3n+1} \left(\frac{P_u}{2kL_u} \right)^{\frac{1}{n}} R_u^{\frac{3n+1}{n}}. \quad (3)$$

Откуда перепад давления P_u , необходимый для обеспечения объемной производительности Q , может быть определен по формуле

$$P_u = \left(\frac{1+3n}{\pi n} \frac{Q}{R_u^3} \right)^n \frac{2kL_u}{R_u}. \quad (3, a)$$

При этом массовая производительность Q_m (кг/ч) может быть выражена через объемную Q (м³/с) при помощи расчетной зависимости

$$Q = \frac{Q_m}{3600\rho}, \quad (4)$$

где ρ – плотность макаронного теста, кг/м³.

Средняя скорость V_{cp} течения теста может быть определена как отношение объемного расхода Q к площади сечения πR^2 :

$$V_{cp} = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{\pi n}{3n+1} \left(\frac{P_u}{2kL_u} \right)^{\frac{1}{n}} R_u^{\frac{3n+1}{n}}. \quad (4, a)$$

Реологические модели течения для конических участков вставки в зоне сужения сечения (конфузор) и зоне расширения сечения (диффузор) могут быть получены из зависимостей для цилиндрического канала с использованием метода предельного перехода к элементарному объему. При этом, принимая материал несжимаемым (пренебрегая упругими деформациями вследствие их малости), можно считать, что расход теста в любом сечении постоянен ($Q = \text{const}$). Кроме того, можно пренебречь инерционными силами, обусловленными ускорением или замедлением движения теста в связи с их малостью.

Сужающийся канал. Расчетная схема течения макаронного теста в коническом канале приведена на рис. 3, а. Для элементарного объема dx справедливы формулы течения как для элемен-

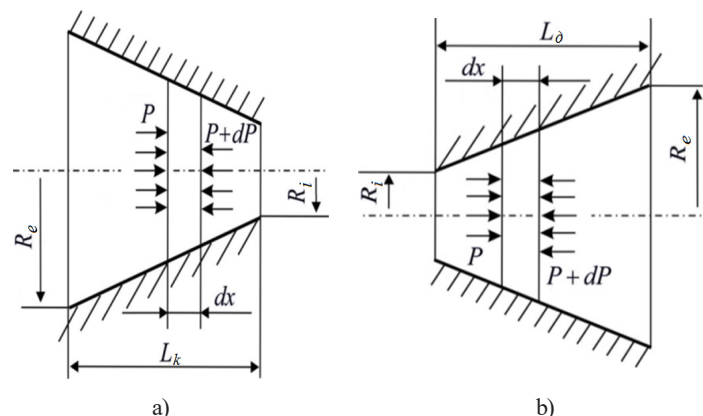


Рис. 3. Расчетная реологическая схема течения макаронного теста в коническом канале: а – сужающемся; б – расширяющемся

Fig. 3. Calculated rheological flow diagram of pasta dough in a conical narrowing (a) and expanding (b) channels

тарного цилиндра такой же длины. Сделав предельный переход от длины L к дифференциалу dx и заменив полный перепад давления P на элементарный перепад dp в формуле (3, а), получаем

$$\frac{dp}{dx} = \left(\frac{1+3n}{\pi n} \right)^n Q^n \frac{2K}{R^{1+3n}}. \quad (5)$$

При этом надо иметь в виду, что входящий в формулу (5) радиус R изменяется по длине, т.е. является функцией от координаты x .

Интегрирования уравнения (5) можно осуществить путем замены переменной. Так, введя переменную

$$u = R = R_e - \frac{R_e - R_i}{L_k} x \quad (6)$$

и проведя преобразования

$$du = -\frac{R_e - R_i}{L_k} dx, \quad (6, a)$$

после интегрирования и возвращения к исходным переменным получаем следующую формулу, связывающую перепад давления, необходимый для преодоления сопротивления вязкому течению макаронного теста в сужающемся канале (конфузоре) с размерами канала и показателями реологических свойств теста:

$$P_k = \frac{2kL_k}{3n(R_e - R_i)} \left(\frac{1+3n}{\pi n} \frac{Q}{R_i^3} \right)^n \left(1 - \frac{R_i^{3n}}{R_e^{3n}} \right). \quad (7)$$

Из формулы (7) видно, что это давление линейно зависит от длины конфузора L_k и коэффициента консистенции теста K . В то же время оно нелинейно зависит от удельного расхода теста Q через конфузор, а также от поперечных размеров (радиусов) канала.

Расширяющийся канал (диффузор). Исходные предпосылки те же, что и для формулы течения, как для элементарного цилиндра такой же длины. Расчетная схема приведена на рис. 3, в. Дифференциальное уравнение равновесия элементарного участка совпадает с уравнением (5).

Произведем интегрирование этого уравнения с использованием метода замены переменной. Введя переменную

$$u = R = R_i + \frac{R_e - R_i}{L_o} x$$

и выполнив преобразование

$$dx = \frac{L_{\partial}}{R_e - R_i} du \quad (7, a)$$

в результате интегрирования получаем

$$P_{\partial} = \frac{2kL_{\partial}}{3n(R_e - R_i)} \left(\frac{1+3n}{\pi n} \frac{Q}{R_i^3} \right)^n \left(1 - \frac{R_i^{3n}}{R_e^{3n}} \right). \quad (8)$$

Анализ показывает, что аналитические зависимости (7) и (8) совпадают по форме записи.

Поскольку расход теста через все участки вставки одинаков, то суммарный перепад давления, необходимый для преодоления сопротивления вязкому течению, может рассматриваться как сумма перепадов давления в конфузоре, цилиндре и диффузоре.

Приведенные выше формулы позволяют производить расчет перепадов давления в коффузорно-диффузорной вставке или ее элементах, а также осуществлять численное моделирование влияния размеров конструктивных элементов вставки и реологических параметров макаронного теста на сопротивление вязкому течению. Задаваясь реологическими характеристиками теста и размерами канала, можно определить расход (объемную производительность канала) и перепад давления на каждом участке. При этом давление формования будет равно сумме перепадов давления P_i на отдельных участках:

$$P_d = P_k + P_u + P_{\partial}. \quad (9)$$

Поскольку внутренний радиус конффузора и диффузора равны радиусу цилиндра, то для случая, когда внешние радиусы равны, можно записать

$$P_{\partial} = 2k \left(\frac{1+3n}{\pi n} \frac{Q}{R_i^3} \right)^n \left(\frac{L_u}{R_i} + \frac{L_k + L_{\partial}}{3n(R_e - R_i)} \left(1 - \frac{R_i^{3n}}{R_e^{3n}} \right) \right). \quad (10)$$

Совместное решение (10) и (4) дает формулу для расчета взаимосвязи перепада давления на преодоление сопротивления вязкому течению макаронного теста в коффузорно-диффузорной вставке с массовой производительностью (расходом) в кг/ч:

$$P_{\partial} = 2k \left(\frac{1+3n}{3600\pi n} \frac{Q}{R_i^3} \right)^n \left(\frac{L_u}{R_i} + \frac{L_k + L_{\partial}}{3n(R_e - R_i)} \left(1 - \frac{R_i^{3n}}{R_e^{3n}} \right) \right). \quad (10, a)$$

Выразив радиусы в формулах (10) и (10, а) через соответствующие диаметры, после несложных преобразований можем записать видоизмененные зависимости, связывающие перепад давления с размерами участков канала и показателями реологических свойств макаронного теста:

$$P_{\partial} = 4k \left(\frac{1+3n}{450\pi n} \frac{Q_m}{pD_i^3} \right)^n \left(\frac{L_u}{D_i} + \frac{L_k + L_{\partial}}{3n(D_e - D_i)} \left(1 - \frac{D_i^{3n}}{D_e^{3n}} \right) \right). \quad (10, б)$$

Полученные аналитические зависимости (10, а) и (10, б) показывают, что при равных внешних и внутренних диаметрах полостей канала перепад давления на преодоление сопротивления вязкому течению линейно зависит от длин каждого из участков, причем для конффузора и диффузора это сопротивление зависит от суммы соответствующих длин. Из этого следует, что изменение направления течения макаронного теста (установка вставки по схемам прямоточной или противоточной трубок Вентури) при неизменных значениях показателей реологических свойств не влияет на гидродинамическое сопротивление вставки, поскольку сумма длин участков остается неизменной. Увеличение длины каждого из участков приводит к росту необходимого давления на преодоление вязкого сопротивления. Нелинейный рост давления наблюдается при уменьшении размера радиуса цилиндра, равного внутреннему радиусу конффузора и диффузора (проходного отверстия канала).

Зависимости позволяют осуществлять численное моделирование влияния размеров конструктивных элементов канала и показателей реологических свойств теста, а также удельного расхода теста (производительность) через один канал на сопротивление вязкому течению.

Практическая часть. Экспериментальные исследования. Для экспериментального подтверждения теоретических предпосылок на заводе ОАО «Торгмаш» (г. Барановичи) был изготовлен промышленный образец предматричной камеры к пресс-автомату МИТ-2, конфигурация которой имеет вид трубы Вентури. На рис. 4 представлена фотография такой предматричной камеры. Конфузором вставка устанавливается в сторону шнека, а диффузором она опирается на матрицу, рабочее положение камеры – горизонтальное.

Выбор основных исследуемых параметров. Конструктивными и режимными входными регулируемыми параметрами макаронного пресса выбраны: температура матрицы (t , °C)*; частота вращения шнека ($n_{\text{вр}}$, об/мин); влажность теста (W_t); конструктивные особенности узла прессования (мм).

В качестве выходных параметров выбраны производительность макаронного пресса (Π , кг/ч), прирост температуры сырья (теста) во время формования (t , °C), давление в предматричном пространстве (P , МПа) и удельная энергоёмкость процесса ($n_{\text{уд}}$, Вт·ч/кг).

Методика подготовки сырья теста. Для проведения эксперимента была выбрана мука хлебопекарная высшего сорта М-54 (СТБ 1666-2066 «Мука пшеничная» ТУ), которую используют на филиале «Боримак» УП «Борисовский комбинат хлебопродуктов» ОАО «Минскхлебпродукт».

Для среднего замеса теста нужно 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:

- 1) определение влажности муки;
- 2) определение количества воды, необходимой для замеса теста;
- 3) составление рецептурной смеси заданной влажности;
- 4) проверка влажности теста.

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

Программа и методика проведения эксперимента. При проведении экспериментальных исследований использовали 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, погрешность измерения – 0,1 об/мин;
- электроизмерительные клещи-ваттметр А-КИП 4022 по требованиям стандарта МЭК 61010 с пределом измерений от 10 до 1000000 Вт, погрешность измерения – $\pm 3,5$ %;

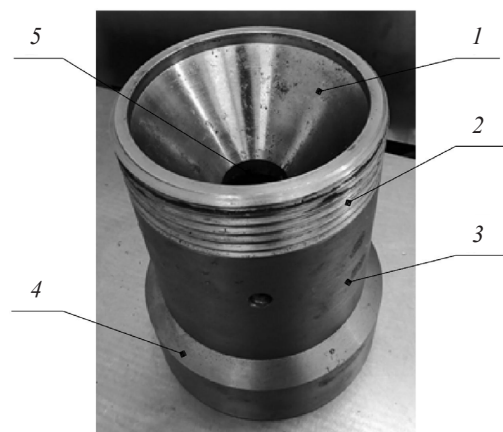


Рис. 4. Фотография предматричной камеры, внутренняя конфигурация которой выполнена в виде трубы Вентури:
1 – диффузор; 2 – резьба; 3 – корпус камеры; 4 – конфузор;
5 – горловина

Fig. 4. Picture of the pre-matrix camera, with internal configuration made in the form of a Venturi tube:
1 – diffuser; 2 – thread; 3 – camera body; 4 – confuser; 5 – neck

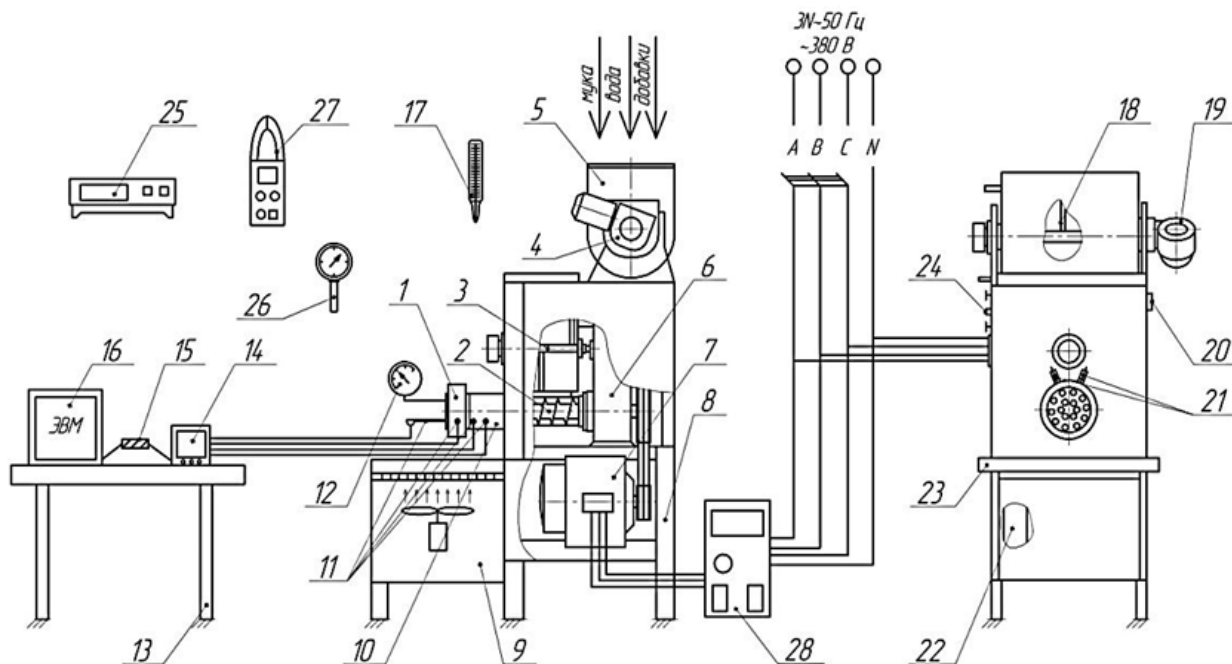


Рис. 5. Схема экспериментального стенда: 1 – матрица; 2 – шнек; 3 – подающий вал с лопатками; 4 – червячный редуктор; 5 – смесительный бункер; 6 – редуктор; 7 – привод прессующего корпуса; 8 – рама; 9 – узел обдува; 10 – корпус экструдера; 11 – преобразователи термоэлектрические ТКХ (L)-1199; 12 – датчик 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 – 8300–007 Н

Fig. 5. Layout of the experimental stand: 1 - matrix; 2 - auger; 3 - feed shaft with blades; 4 - worm gear; 5 - mixing hopper; 6 - reducer; 7 - pressing housing drive; 8 - frame; 9 - blowing unit; 10 - extruder housing; 11 - thermoelectric converters TKN (L)-1199; 12 - air pressure sensor AIR 10; 13 - table; 14 - microprocessor-based TRM-148 meter-controller; 15 - interface converter; 16 - personal computer; 17 - thermometer; 18 - mixing shaft of the mixing device; 19 - mixer drive; 20 - way switch; 21 - cooling jacket fitting; 22 - electrical equipment unit; 23 - tray; 24 - control panel; 25 - electronic scales; 26 - tachometer AKIP 9201; 27 - electric measuring tongs wattmeter A-KIP 4022; 28 - frequency converter E2 - 8300-007 N

– 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, диапазон регулирования частоты – от 0,1 до 650 Гц, точность регулирования – $\pm 0,5\%$, дискретность – 0,01 Гц;

– термометр лабораторный – по ГОСТ 28498–90, предел измерений – от 0 до 50 °С, цена деления – 0,5 °С;

– весы электронные портативные SC 4010 – по ГОСТ 29329–92, погрешность измерений – 0,01 г, диапазон – 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 компью-

тером 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 E2-8300-007H 26.

Разработка экспериментального 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 рис. 5.

Результаты эксперимента. В процессе испытаний проводили сравнительный анализ опытного образца узла прессования с заводским аналогом. На основании экспериментальных данных построены 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 проведен анализ полученных результатов.

В целом 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.

Установлено, что применение в колодцах матрицы спиральных вставок, подобным трубам Вентури, повышает производительность пресс-автомата МТ-2 на 25–26 % при заметном улучшении качества.

Были проведены комплексные испытания пресс-автомата МИТ-2 с использованием одновременно трубы Вентури в предматричном пространстве и труб Вентури в колодцах матрицы. В этом варианте производительность пресс-автомата МИТ-2 увеличивается на 40 %.

Таким образом, экспериментально подтверждено, что двухступенчатое управление потоком теста в предматричном пространстве и в колодцах матрицы дает явный положительный результат.

Выводы

1. Впервые изучены реологические закономерности течения теста в коническо-цилиндрических каналах конфузorno-диффузорной предматричной камеры узла прессования, построены математические модели для определения объемного расхода теста, скорости его выпрессовывания и суммарного перепада давления в конфузоре, цилиндре и диффузоре. Полученные теоретические формулы позволяют производить расчет перепадов давления в конфузorno-диффузорной предматричной камере и осуществлять численное моделирование влияния размеров конструктивных элементов трубы Вентури и реологических параметров макаронного теста на сопротивление вязкому течению.

Задавая реологические характеристики теста и размерного канала, можно определить расход (объемную производительность канала) и перепад давления на данном участке.

2. Полученные аналитические зависимости показывают, что при равных внешних и внутренних диаметрах полостей канала перепад давления на преодоление сопротивления вязкому течению линейно зависит от длин каждого из участков, причем для конфузора и диффузора это сопротивление зависит от суммы соответствующих длин. Увеличение длины каждого из участков приводит к росту необходимого давления на преодоление вязкого сопротивления.

Наименьший рост давления наблюдается при уменьшении размера радиуса цилиндра, равного внутреннему радиусу конфузора и диффузора (проходного отверстия канала). Таким об-

разом, изученные зависимости позволяют осуществлять численное моделирование влияния размеров конструктивных элементов канала и показателей реологических свойств теста, а также удельного расхода теста (производительность) через один канал на сопротивление вязкому течению.

3. Выполнение предматричного пространства (камеры) в виде трубы Вентури в сочетании с конфузно-диффузорными вставками, установленными в колодцах матрицы, позволяет управлять (контролировать) потоком теста от шнека до формирующих отверстий, при этом происходит предварительное его уплотнение, пластификация и разогрев, т.е. осуществляется предварительная подготовка теста перед входом теста в формирующие отверстия. 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 происходит постепенное взаимное смещение и трение слоев, что приводит к интенсивному выделению теплоты: тесто перестает закручиваться, 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.

Таким образом, под воздействием необратимых деформаций в результате многократных сдвигов элементарных слоев тесто уплотняется, приобретая оптимальные физико-механические свойства. Техническая новизна нового узла прессования подтверждается патентами на изобретения РБ № 23081 и № 23082.

Список использованных источников

1. 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 // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. физ.-техн. наук. – 2013. – № 2. – С. 58–65.
2. Demianiuk, L. Siły i odkształcenia występujące podczas brykietowania materiałów drobnoziarnistych w komorze otwartej – analiza doświadczalna / L. Demianiuk, R. Hejft, A. Seweryn // Zeszyty Nauk. Politechniki Białostockiej. Mechanika. – 1999. – Z. 21. – S. 95–107.
3. Faborode, M. O. A rheological model for the compaction of fibrous agricultural materials / M. O. Faborode, J. R. O'Callaghan // J. of Agr. Engineering Research. – 1989. – Vol. 42, N 3. – P. 165–178. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(89\)90048-6](https://doi.org/10.1016/0021-8634(89)90048-6)
4. Hryniewicz, M. Zmienność tarcia zewnętrznego w procesie brykietowania / M. Hryniewicz // Zeszyty Nauk. Akad. Górniczo-Hutniczej. Mechanika. 1994. – Z. 13, N 4. – S. 555–563.
5. Барсуков, В. Г. Технологическое трение при экструзии композитов / В. Г. Барсуков, А. И. Свириденко. – Гродно : ГрГУ, 1998. – 200 с.
6. Медведев, Г. М. Технология макаронного производства : учебник / Г. М. Медведев ; ред. Н. В. Куркина. – М. : Колос, 1998. – 271 с.
7. Мачихин, Ю. А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю. А. Мачихин, С. А. Мачихин. – М. : Лег. и пищевая пром-сть, 1981. – 215 с.
8. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов / А. В. Горбатов [и др.] ; под ред. А. В. Горбатова. – М. : Лег. и пищевая пром-сть, 1982. – 296 с.
9. Технология пищевых производств : учебник для вузов / Л. П. Ковальская [и др.] ; ред. Л. П. Ковальская. – М. : Колос, 1999. – 752 с.
10. Остриков, А. Н. Экструзия в пищевой технологии / А. Н. Остриков, О. В. Абрамов, А. С. Рудометкин. – СПб. : ГИОРД, 2004. – 281 с.
11. Гноевой, А. Д. Исследование течения вязкопластичных сред в каналах и полостях с изменяемыми формами их стенок : (элементы теории и техн. прил.) / А. В. Гноевой, Д. М. Климов, В. М. Чесноков. – М. : [б. и.], 1995. – 128 с.
12. Торган, А. Б. Анализ реологических аспектов течения макаронного теста в каналах ступенчато-переменного сечения с использованием нелинейной модели Балкли-Гершеля / А. Б. Торган // Пищевая пром-сть: наука и технология. – 2015. – № 3 (29). – С. 64–71.
13. Торган, А. Б. Методика оценки вклада пластичной и вязкой составляющих в сопротивление течению макаронного теста / А. Б. Торган // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та ім. Я. Купалы. Сер. 6, Тэхніка. – 2015. – № 1 (198). – С. 90–98.
14. Ставров, В. П. Технологические испытания реактопластов / В. П. Ставров, В. Г. Дедюхин, А. Д. Соколов. – М. : Химия, 1981. – 246 с.
15. Тадмор, З. Теоретические основы переработки полимеров : пер. с англ. / З. Тадмор, К. Гогос ; пер. с англ. под ред. Р. В. Торнера. – М. : Химия, 1984. – 632 с.
16. Смольский, Б. М. Реодинамика и теплообмен нелинейно вязкопластичных материалов / Б. М. Смольский, З. П. Шульман, В. М. Гориславец. – Минск : Наука и техника, 1970. – 447 с.

References

1. Grudanov V. Ya., Torgan A. B., Pozdnyakov V. M. A process of forming of pasta in pressing units with improved hydraulic and technological characteristics. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2013, no. 2, pp. 58-65 (in Russian).
2. Demianiuk L., Hejft R., Seweryn A. *Siły i odkształcenia występujące podczas brykietowania materiałów drobnoziarnistych w komorze otwartej - analiza doświadczalna* [Forces and deformations occurring during briquetting of fine-grained materials in an open chamber - experimental analysis]. *Zeszyty naukowe Politechniki Białostockiej. Mechanika* [Scientific Journals of the Białystok University of Technology. Mechanics], 1999, vol. 21, pp. 95-107 (in Polish).
3. Fabrode M. O., O'Callaghan J. R. A rheological model for the compaction of fibrous agricultural materials. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1989, vol. 42, no. 3, pp. 165-178. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(89\)90048-6](https://doi.org/10.1016/0021-8634(89)90048-6)
4. Hryniewicz M. *Zmienność tarcia zewnętrznego w procesie brykietowania* [Variability of external friction in the briquetting process]. *Zeszyty naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej. Mechanika = Scientific Bulletins of the Stanisław Staszic Academy of Mining and Metallurgy*, 1994, vol. 13, no. 4, pp. 555-563 (in Polish).
5. Barsukov V. G., Sviridenok A. I. *Technological friction during the extrusion of composites*. Grodno, Grodno State University, 1998. 200 p. (in Russian).
6. Medvedev G. M. *Technology of pasta production*. Moscow, Kolos Publ., 1998. 271 p. (in Russian).
7. Machikhin Yu. A., Machikhin S. A. *Engineering rheology of food materials*. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1981. 215 p. (in Russian).
8. Gorbato A. V., Maslov A. M., Machikhin Yu. A., Tabachnikov V. P., Kosoi V. D. *Structural and mechanical characteristics of food products*. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1982. 296 p. (in Russian).
9. Koval'skaya L. P., Shub I. S., Mel'kina G. M., Shebershneva N. N., Shikina V. S., Nechaev A. P. (et al.). *Technology of food production*. Moscow, Kolos Publ., 1999. 752 p. (in Russian).
10. Ostrikov A. N., Abramov O. V., Rudometkin A. S. *Extrusion in food technology*. St. Petersburg, GIORP Publ., 2004. 281 p. (in Russian).
11. Gnoevoi A. V., Klimov D. M., Chesnokov. V. M. *Investigation of the flow of visco-plastic media in channels and cavities with variable shapes of their walls (elements of the theory and technical applications)*. Moscow, 1995. 128 p. (in Russian).
12. Torgan A. B. Analysis of rheological aspects of pasta flow in step-variable cross-section channels with the use of nonlinear Herschel-Bulkley model. *Pishchevaya promyshlennost': nauka i tekhnologii = Food Industry: Science and Technology*, 2015, no. 3 (29), pp. 64-71 (in Russian).
13. Torgan A. B. Method of assessing the contribution of plastic and viscous components in resistance to flow of pasta dough. *Vesnik Grodzenskaga dzharzhavnaga universiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 6, Tekhnika = Vesnik of Yanka Kupala State University of Grodno. Series 6. Engineering Science*, 2015, no. 1 (198), pp. 90-98 (in Russian).
14. Stavrov V. P., Dedyukhin V. G., Sokolov A. D. *Technological tests of thermosets*. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 246 p. (in Russian).
15. Tadmor Z., Gogos C. G. *Principles of polymer processing*. New York etc., John Wiley & Sons, 1979. 736 p.
16. Smol'skii B. M., Shul'man Z. P., Gorislavets V. M. *Rheodynamics and heat transfer of nonlinear viscoplastic materials*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1970. 447 p. (in Russian).

Информация об авторах

Груданов Владимир Яковлевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр-т Независимости, 99, 220124 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: pererabotka.kafedra@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-1276-8001>

Торган Анна Борисовна – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий и технического обеспечения процессов переработки сельскохозяйственной продукции, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр-т Независимости, 99, 220124 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: anechkat@tut.by ; <https://orcid.org/0000-0002-8765-8096>

Барсуков Владимир Георгиевич – доктор технических наук, доцент, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр-т Независимости, 99, 220124 г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.g.barsukov@grsu.by

Information about the authors

Vladimir Ya. Grudanov - D. Sc. (Engineering), Professor. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Str., Minsk 220124, Republic of Belarus). E-mail: pererabotka.kafedra@mail.ru ; <https://orcid.org/0000-0003-1276-8001>

Anna B. Torhan - Ph. D. (Engineering), Assistant Professor. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Str., Minsk 220124, Republic of Belarus). E-mail: anechkat@tut.by ; <https://orcid.org/0000-0002-8765-8096>

Vladimir G. Barsukov - D. Sc. (Engineering), Associate Professor. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Str., Minsk 220124, Republic of Belarus). E-mail: v.g.barsukov@grsu.by