

ПЕРАПРАЦОЎКА І ЗАХАВАННЕ СЕЛЬСКАГАСПАДАРЧАЙ ПРАДУКЦЫІ
PROCESSING AND STORAGE OF AGRICULTURAL PRODUCTION

УДК 664.692.5
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-1-111-121>

Поступила в редакцию 30.07.2020
Received 30.07.2020

В. Я. Груданов¹, А. Б. Торган¹, В. Г. Барсуков²

¹Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь,
²Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Гродно, Беларусь,

**РЕОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕЧЕНИЯ
МАКАРОННОГО ТЕСТА В КАНАЛАХ КОНФУЗОРНО-ДИФФУЗОРНЫХ ВСТАВОК
ФОРМУЮЩИХ МАТРИЦ**

Аннотация: Одним из эффективных направлений модернизации конструкций макаронных прессов является установка в 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. Макароны 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 матриц макаронных прессов.

Ключевые слова: макаронное тесто, реологические модели, макаронные прессы, формующие матрицы, течение, конфузор, диффузор, вставка

Для цитирования: Груданов, В. Я. Реологическое моделирование процессов течения макаронного теста в каналах конфузорно-диффузорных вставок формующих матриц / В. Я. Груданов, А. Б. Торган, В. Г. Барсуков // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2021. – Т. 59, № 1. – С. 111–121. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-1-111-121>

Vladimir Ya. Grudanov¹, Anna B. Torgan¹, Vladimir G. Barsukov²

*The Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus,
¹ The Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus,*

RHEOLOGICAL MODELING OF PASTA DOUGH FLOW PROCESSES IN CHANNELS OF CONVERGENT-DIVERGENT INSERTS OF MOLDING MATRIX

Abstract: One of efficient directions for pasta press designs modernization is installation of special conical-and-cylindrical inserts in the 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-Vila 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 matrices of pasta presses.

Keywords: pasta dough, rheological models, pasta presses, forming matrices, flow, convergent, divergent, insert

For citation: Grudanov V. Ya., Torgan A. B., Barsukov V. G. Rheological modeling of pasta dough flow processes in channels of convergent-divergent inserts of molding matrix. *Vestsi Natsyyanal'nyay akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2021, vol. 59, no 1, pp. 111-121 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2021-59-1-111-121>

Введение. Одним из эффективных направлений модернизации конструкций прессового оборудования для производства макаронных изделий является расширение функциональных возможностей недостаточно эффективно используемых конструктивных элементов [1–3]. 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.

На ОАО «Минский комбинат хлебопродуктов» эксплуатируется линия фирмы “BUHLERAG” (Швейцария), матрицы которой при наружном диаметре $D = 610$ мм имеют толщину $H = 140$ мм при высоте фильерных вставок 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.

К тому же существенным недостатком работы шнековых макаронных, обусловленным несовершенством конструкции матриц, является неравномерность выпрессовывания изделий по плоскости матрицы, приводящая к увеличению количества отходов в виде обрезков и, в конечном счете, к снижению производительности пресса. Количество отходов по указанной причине, например, на макаронных прессах ЛПЛ-2М достигало 20 % [4, с. 76].

С нашей точки зрения, расширение функциональных возможностей колодцев матриц можно обеспечить за счет установки перед фильерами специальных коническо-цилиндрических вставок, имеющих, подобно трубкам Вентури, зоны сужения (конфузор), расширения (диффузор) и расположенный между ними цилиндрический пояс. Изменяя размеры конических и цилиндрических элементов вставки, можно управлять величиной входного сопротивления перед фильерой, а вместе с ней полным сопротивлением течению макаронного теста, от которого зависит скорость выхода экструдата. При этом установка вкладышей позволяет осуществить: более плавный переход теста в формующие отверстия фильеры; провести дополнительное уплотнение, пластификацию, гомогенизацию (за счет сдвигового деформирования); дополнительный разогрев теста как за счет теплопередачи от стенок матрицы, так и за счет рассеивания энергии при сдвиговом деформировании, и тем самым снизить гидравлическое сопротивление при продавливании теста сквозь отверстия вкладышей, повысить качество макаронных изделий; увеличить производительность макаронного пресса; повысить долговечность работы фильер. Кроме того, установка таких вставок повышает изгибную прочность и жесткость матрицы, что также благоприятно сказывается на работе прессового оборудования.

Однако реологические аспекты такого метода регулирования скорости применительно к макаронному тесту 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.

Постановка задачи и методика исследования. 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, (конфузор), расширения (диффузор) и цилиндрического перехода (горловины) между ними (рис. 1). При этом в зависимости от соотношения длин конфузора и диффузора возможно несколько конструктивных исполнений, например, в виде симметричного вкладыша-вставки или несимметричных типа прямоточной или противоточной (обратной) трубки Вентури, применение которых, как известно, обеспечивает в гидросистемах минимально возможные гидравлические потери¹.

Вставка состоит из двух усеченных конусов различной длины – конфузора 1 и диффузора 2 с небольшой цилиндрической горловиной 3 между ними. Конфузор 1, обращенный большим основанием в сторону шнека, служит для плавного входа потока теста и постепенного его уплотнения. Средняя, цилиндрическая часть вставки – горловина 3 – предназначена стабилизировать поток теста и направить его в диффузор 2.

В диффузоре, конической части вставки, примыкающей расширенной частью к вкладышу 4 с формующими 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 формующие отверстия 5.

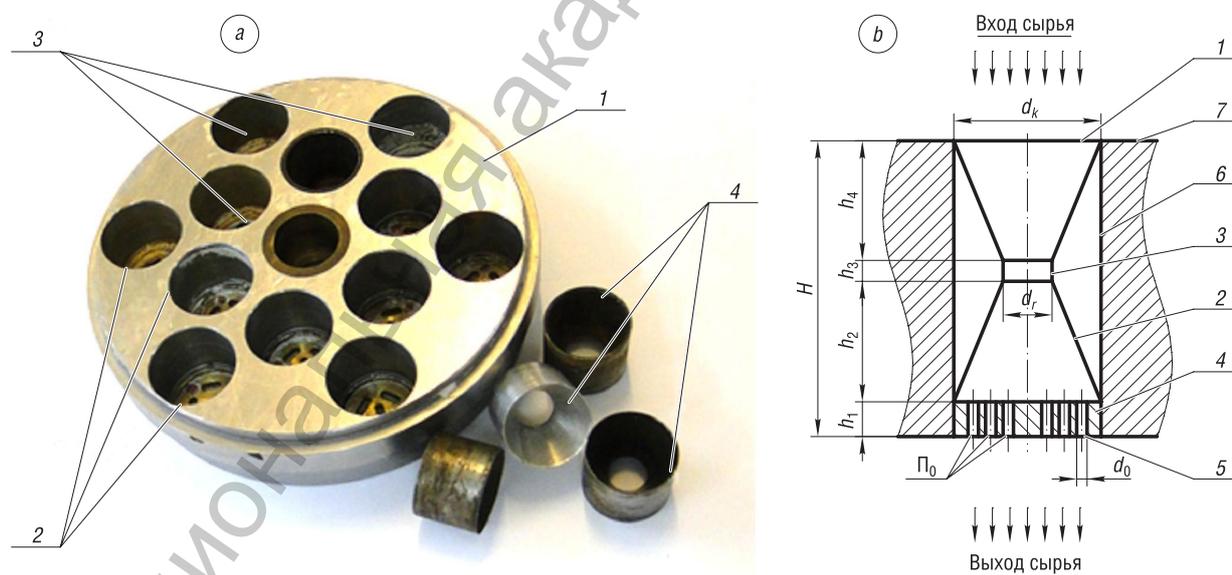


Рис. 1. Общий вид (а) и конструктивная схема (б) матрицы с конфузорно-диффузорными вставками к малому макаронному прессу МИТ-2: 1 – матрица; 2 – колодцы; 3 – вкладыши; 4 – вставки; d_k – диаметр конфузора; d_r – диаметр горловины; d_o – диаметр формующего отверстия; H – общая высота (толщина) корпуса матрицы; h – высота вкладыша; h_1 – высота диффузора; h_2 – высота (длина) горловины; h_3 – высота конфузора.

Fig. 1. General (a) and design layout (b) of matrix with convergent-divergent inserts for small macaroni press MIT-2: 1 - matrix; 2 - wells; 3 - inlays; 4 - inserts; d_k - convergent diameter; d_r - neck diameter; d_o - extrusion hole diameter; H - total height (thickness) of the matrix body; h - inlay height; h_1 - divergent height; h_2 - neck height (length); h_3 - convergent height

¹ Трубы Вентури. Технические условия : ГОСТ 23720–79 / Гос. комитет СССР по стандартам. М., 1979. 17 с.

Вставка установлена в колодце *b* 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 формирующие отверстия *5*. 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).

Разработка реологических моделей течения макаронного теста в коническо-цилиндрических каналах конфузорно-диффузорной вставки. Макаронное тесто представляет собой реологически сложную систему, деформирование которой связано с преодолением вязкого внутреннего и внешнего трения, а также обусловленных этим трением трибореологических эффектов [5–9]. Реологическое поведение пищевых смесей рассмотрено в работах [10–13], а применительно к течению при экструзионном формовании – в работах [14, 15]. Специфика макаронного теста при этом не учитывается [16, 17].

В научно-технической литературе течение высоконаполненных систем изучено только в общетеоретической постановке [11, 12], а также применительно к течению высоконаполненных полимерных композитов [18–20].

Анализ экспериментальных данных показал, что макаронное тесто подчиняется с достаточной для технических расчетов точностью закону вязкого течения Балкли–Гершеля [16, 17]:

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

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 [17]. Например, в табл. 1 приведены расчетные значения потерь давления на преодоление предельного сопротивления сдвигу τ_0 различных видов макаронного теста с содержанием влаги 30 % при давлении 4,9 МПа и температуре 40 °С в отверстиях матрицы ступенчато-переменного сечения [17].

Т а б л и ц а 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 ultimate shear resistance τ_0 of pasta dough with 30 % humidity in channels of step-variable cross-section at 40 °С temperature and 4.9 MPa pressure

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

П р и м е ч а н и е. 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.

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 [16, 20]:

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

С использованием методических подходов, изложенных в работах [15, 18–20], рассмотрим течение макаронного теста в отдельных зонах (участках) рассматриваемого конфузурно-диффузорного канала.

Цилиндрический участок. Зависимость объемной производительности Q от перепада давления $P_{ц}$, размеров канала (длины $L_{ц}$, радиуса R) и показателей реологических свойств k , n имеет следующий вид [20, с. 90]:

$$Q = \frac{\pi n}{3n+1} \left(\frac{P_{ц}}{2kL_{ц}} \right)^{\frac{1}{n}} R_{ц}^{\frac{3n+1}{n}}. \quad (3)$$

Откуда перепад давления $P_{ц}$, необходимый для обеспечения объемной производительности Q , может быть определен по такой формуле:

$$P_{ц} = \left(\frac{1+3n}{\pi n} \frac{Q}{R_{ц}^3} \right)^n \frac{2kL_{ц}}{R_{ц}}. \quad (3a)$$

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

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

(ρ – плотность макаронного теста, кг/м³).

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

$$V_{ср} = \frac{Q}{\pi R^2} = \frac{\pi n}{3n+1} \left(\frac{P_{ц}}{2kL_{ц}} \right)^{\frac{1}{n}} R_{ц}^{\frac{n+1}{n}}. \quad (4a)$$

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 приведена на рис. 2, а. Для элементарного объема длиной dx справедливы формулы течения как для элементарного 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 (3a), 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 .

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

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

и проведя преобразования

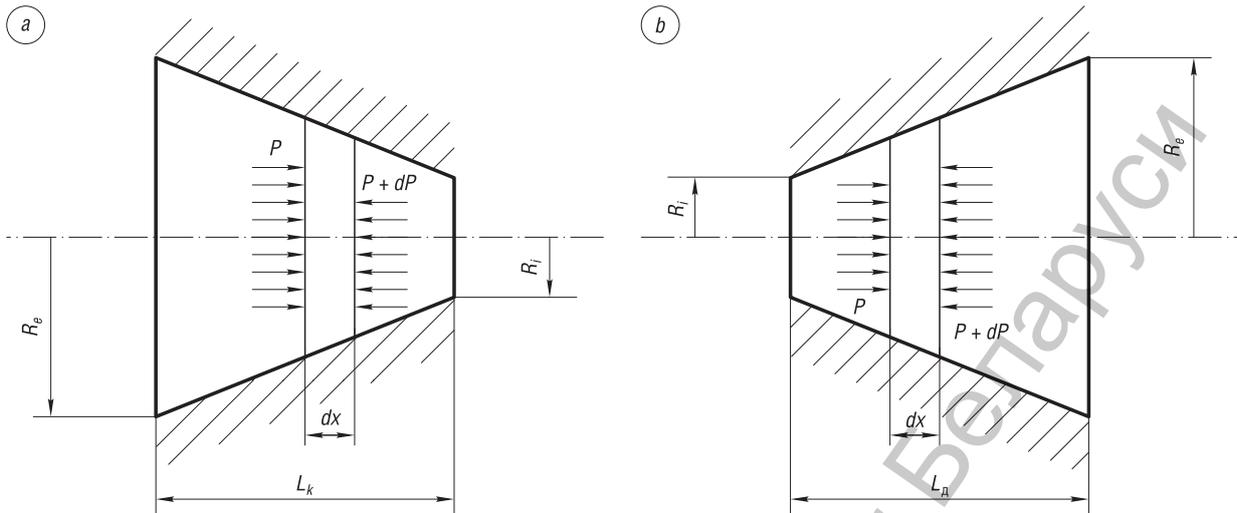


Рис. 2. Расчетная реологическая схема течения макаронного теста в коническом канале:
 а – сужающемся; б – расширяющемся

Fig. 2. Calculated rheological flow diagram of pasta dough in conical channel: a - narrowing; b - expanding

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

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 сужающегося канала (конфузора). Для элементарного объема длиной dx справедливы формулы течения, как для элементарного цилиндра такой же длины. Расчетная схема приведена на рис. 2, б. Дифференциальное уравнение равновесия элементарного участка совпадает с уравнением (5).

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

$$u = R = R_i + \frac{R_i - R_e}{L_d} x \quad (8)$$

и выполнив преобразование

$$dx = \frac{L_d}{R_e - R_i} du, \quad (8a)$$

в результате интегрирования получаем

$$P_d = \frac{2kL_d}{3n(R_e - R_i)} \left(\frac{1 + 3n}{\pi n} \frac{Q}{R_i^3} \right)^n \left(1 - \frac{R_i^{3n}}{R_e^{3n}} \right). \quad (9)$$

Анализ показывает, что аналитические зависимости (8) и (9) 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 конфузorno-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 давлений P_i на отдельных участках:

$$P_B = P_k + P_{\text{ц}} + P_{\text{д}}. \quad (10)$$

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

$$P_B = 2k \left(\frac{1+3n}{\pi n} \frac{Q}{R_i^3} \right)^n \left(\frac{L_{\text{ц}}}{R_i} + \frac{L_k + L_{\text{д}}}{3n(R_e - R_i)} \left(1 - \frac{R_i^{3n}}{R_e^{3n}} \right) \right). \quad (11)$$

Совместное решение (11) и (4) дает формулу для расчета взаимосвязи перепада давления на преодоление сопротивления вязкому течению макаронного теста в конфузorno-диффузорной вставке с массовой производительностью (расходом) в кг/ч:

$$P_B = 2k \left(\frac{1+3n}{3600\pi n} \frac{Q_m}{\rho R_i^3} \right)^n \left(\frac{L_{\text{ц}}}{R_i} + \frac{L_k + L_{\text{д}}}{3n(R_e - R_i)} \left(1 - \frac{R_i^{3n}}{R_e^{3n}} \right) \right). \quad (11a)$$

Выразив радиусы в формулах (11) и (11a) через соответствующие диаметры, можем записать, после несложных преобразований видоизмененные зависимости, связывающие перепад давления с размерами участков канала и показателями реологических свойств макаронного теста:

$$P_B = 4k \left(\frac{1+3n}{450\pi n} \frac{Q_m}{\rho D_i^3} \right)^n \left(\frac{L_{\text{ц}}}{D_i} + \frac{L_k + L_{\text{д}}}{3n(D_e - D_i)} \left(1 - \frac{D_i^{3n}}{D_e^{3n}} \right) \right). \quad (11б)$$

Полученные аналитические зависимости (11a) и (11б) 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. 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 конфузора 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.

Результаты и их обсуждение. Для осуществления численного моделирования влияния размеров конструктивных элементов канала и показателей реологических свойств макаронного теста, а также удельного расхода теста (производительность) на сопротивление вязкому течению, разработан ряд типоразмеров вставок, конструктивные размеры которых приведены в табл. 2.

При этом для удобства анализа авторами принята следующая система обозначения вставок конфузorno-диффузорных: ВКД $D \times d \times L$, где ВКД – вставка конфузorno-диффузорная; D , d , L – наружный диаметр вставки, внутренний диаметр полости вставки (диаметр проходного отверстия), длина (высота) вставки соответственно.

Значения реологических констант типового макаронного теста для различных скоростей сдвига, полученные в работе [16], приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 2. Характерные размеры вставок матрицы макаронного пресса для проведения численного моделирования

Table 2. Typical dimensions of matrix inserts in macaroni press for numerical modeling

Параметр	Типоразмер вставки			
	ВКД 23×10×48	ВКД 23×10×34	ВКД 23×10×18	ВКД 23×10×13
Диаметр, мм:				
наружный вставок	23	23	23	23
максимальный конфузора	22	22	22	22
цилиндрического пояска	10	10	10	10
Длина, мм:				
общая	48	34	18	13
конфузора	27,0	21,0	12,5	7,5
диффузора	13	8	5	5
цилиндрического пояска	8	5	0,5	0,5

Т а б л и ц а 3. Расчетные значения констант k и n для теста при температуре 40 °С

Table 3. Calculated values of the k and n constants for dough at 40 °С temperature

Скорость сдвига, $\dot{\gamma}$, рад/с	Значения реологических констант	
	n	k , кПа·с ^{1/n}
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

Т а б л и ц а 4. Взаимосвязь перепада давления на преодоление сопротивления вязкому течению с массовым расходом макаронного теста Q_m , проходящего через конфузурно-диффузорные вставки

Table 4. Correlation of pressure drop for overcoming resistance to viscous flow with the mass flow rate of pasta dough Q_m passing through the convergent-divergent inserts

Типоразмер вставки	Перепад давления (МПа) при массовом расходе Q_m макаронного теста через конфузурно-диффузорные вставки (кг/ч)					
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
ВКД 23×10×48	0,82	1,14	1,39	1,59	1,77	1,92
ВКД 23×10×34	0,57	0,79	0,96	1,10	1,22	1,33
ВКД 23×10×18	0,25	0,35	0,43	0,49	0,54	0,59
ВКД 23×10×13	0,18	0,25	0,31	0,35	0,39	0,43

Анализ данных табл. 3 показал хорошую воспроизводимость результатов. При этом среднее значение коэффициента k составляет 109,97 кПа·с^{1/n}, а коэффициента n – 0,473. Для выполнения оценочных технических расчетов взаимосвязи перепадов давления по длине участков канала и в целом по длине конфузурно-диффузорной вставки примем следующие значения констант степенного реологического уравнения Освальда-де-Вила $k = 0,11$ МПа·с^{1/n}; $n = 0,473$.

Произведено численное моделирование и получены расчетные данные по влиянию размеров конструктивных элементов вставки и реологических параметров макаронного теста на сопротивление его вязкому течению. В табл. 4 приведены рассчитанные значения перепадов давления, необходимого для преодоления сопротивления вязкому течению макаронного теста с массовым расходом Q_m , проходящего через конфузурно-диффузорные вставки, размерные параметры которых даны в табл. 2.

Данные по влиянию диаметра проходного отверстия рассмотренных конфузурно-диффузорных вставок на сопротивление вязкому течению макаронного теста с массовым расходом $Q_m = 1,25$ кг/ч приведены в табл. 5.

Для более широкого диапазона изменения размеров полости и удельного (на один канал) массового расхода макаронного теста взаимосвязь перепада давления на преодоление сопротивления вязкому течению приведена в табл. 6.

Т а б л и ц а 5. Взаимосвязь расчетного перепада давления на преодоление сопротивления вязкому течению макаронного теста с массовым расходом $Q_m = 1,25$ кг/ч, проходящего через конфузурно-диффузорные вставки

Table 5. Correlation of calculated pressure drop for overcoming resistance to viscous flow with the mass flow rate $Q_m = 1.25$ kg/h passing through the convergent-divergent inserts

Типоразмер вставки	Расчетный перепад давления (МПа) при течении теста через конфузурно-диффузорные вставки с диаметром d проходного отверстия, мм					
	4	6	8	10	12	14
ВКД 23× d ×48	9,45	4,34	2,59	1,77	1,31	1,02
ВКД 23× d ×34	6,29	2,94	1,77	1,22	0,91	0,72
ВКД 23× d ×18	2,03	1,11	0,74	0,54	0,42	0,35
ВКД 23× d ×13	1,54	0,83	0,55	0,40	0,31	0,25

Из табл. 5, 6 видно, что с уменьшением диаметра проходного отверстия полости расчетное значение давления, необходимого для преодоления сопротивления вязкому течению, возрастает для всех исследованных значений массовой производительности. При этом для всех исследованных типоразмеров вставок в широком диапазоне изменения значений расхода макаронного теста Q_m с изменением диаметра проходного отверстия зависимости имеют аналогичный характер.

Таким образом, результаты численного моделирования показывают, что сопротивление вязкому течению зависит от размеров участков канала, показателей реологических свойств и удельного расхода макаронного теста (производительность устройства на одну фильеру). К тому же при равных внешних и внутренних диаметрах полостей канала перепад давления на преодоление сопротивления вязкому течению зависит от суммы длин участков конфузора и диффузора, из чего следует, что изменение направления течения макаронного теста при неизменных значениях показателей реологических свойств не влияет на гидродинамическое сопротивление вставки. Увеличение длины каждого из участков приводит к линейному росту необходимого давления на преодоление вязкого сопротивления. Резкий рост давления наблюдается при уменьшении диаметра проходного отверстия цилиндра, равного внутреннему диаметру конфузора и диффузора. Полученные результаты, дополненные данными экспериментальной проверки, могут составить основу инженерно-технологических расчетов при проектировании конфузorno-диффузорных вставок для лабораторных и промышленных матриц макаронных прессов.

Вывод. Разработаны реологические модели течения макаронного теста в коническо-цилиндрических каналах конфузorno-диффузорных вставок. Получены аналитические зависимости, связывающие перепад давления на каждом из участков с конструктивными размерами канала и показателями реологических свойств. Произведено численное моделирование и получены расчетные данные по влиянию размеров конструктивных элементов вставки и реологических параметров макаронного теста на сопротивление его вязкому течению. Показано, что изменение направления движения теста путем установки вставки по форме прямой или обратной трубки

Таблица 6. Взаимосвязь перепада давления на преодоление сопротивления вязкому течению с массовым расходом макаронного теста, проходящего через конфузorno-диффузорные вставки для различных значений диаметра проходного отверстия полости

Table 6. Correlation of pressure drop to overcome for overcoming resistance to viscous flow with the mass flow rate of pasta dough passing through the convergent-divergent inserts for different values of diameter of the cavity extrusion hole

Диаметр d проходного отверстия, мм	Перепад давления (МПа) при массовом расходе Q_m макаронного теста через конфузorno-диффузорные вставки (кг/час)					
	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50
Вставка ВКД $23 \times d \times 48$						
5	2,86	3,97	4,81	5,51	6,12	6,67
6	2,03	2,82	3,41	3,91	4,34	4,73
7	1,53	2,13	2,58	2,95	3,28	3,57
8	1,21	1,68	2,03	2,33	2,59	2,82
9	0,99	1,37	1,66	1,90	2,11	2,30
10	0,82	1,14	1,39	1,59	1,77	1,92
11	0,70	0,98	1,18	1,36	1,51	1,64
12	0,61	0,85	1,03	1,18	1,31	1,43
Вставка ВКД $23 \times d \times 34$						
5	1,92	2,66	3,23	3,70	4,11	4,48
6	1,37	1,90	2,31	2,64	2,94	3,20
7	1,04	1,45	1,75	2,01	2,23	2,43
8	0,83	1,15	1,39	1,59	1,77	1,93
9	0,68	0,94	1,14	1,31	1,45	1,58
10	0,57	0,79	0,96	1,10	1,22	1,33
11	0,49	0,68	0,82	0,94	1,04	1,14
12	0,43	0,59	0,71	0,82	0,91	0,99
Вставка ВКД $23 \times 10 \times 18$						
5	0,68	0,94	1,14	1,303	1,45	1,58
6	0,52	0,72	0,87	1,00	1,11	1,21
7	0,42	0,58	0,70	0,80	0,89	0,97
8	0,34	0,48	0,58	0,66	0,74	0,80
9	0,29	0,41	0,49	0,56	0,63	0,68
10	0,25	0,35	0,43	0,49	0,54	0,59
11	0,22	0,31	0,37	0,43	0,48	0,52
12	0,20	0,28	0,33	0,38	0,42	0,46
Вставка ВКД $23 \times 12 \times 13$						
5	0,51	0,71	0,86	0,98	1,09	1,19
6	0,39	0,54	0,65	0,75	0,83	0,91
7	0,31	0,43	0,52	0,60	0,66	0,72
8	0,26	0,35	0,43	0,49	0,55	0,60
9	0,22	0,30	0,36	0,42	0,46	0,50
10	0,19	0,26	0,31	0,36	0,40	0,43
11	0,16	0,23	0,27	0,31	0,35	0,38
12	0,15	0,20	0,24	0,28	0,31	0,34

Вентури не влияет на величину сопротивления вязкому течению и перепад давлений. Увеличение длины каждого из участков приводит к росту необходимого давления на преодоление вязкого сопротивления. Более интенсивный рост давления наблюдается при уменьшении диаметра проходного отверстия цилиндра, равного внутреннему диаметру конфузора и диффузора. Полученные результаты, дополненные данными экспериментальной проверки, могут составить основу инженерно-технологических расчетов при проектировании конфузорно-диффузорных вставок для лабораторных и промышленных матриц макаронных прессов.

Список использованных источников

1. Чернов, М. С. Справочник по макаронному производству / М. С. Чернов, Г. М. Медведев, В. П. Негруб. – М. : Лег. и пищ. пром-сть, 1984. – 304 с.
2. Васин, М. И. Пути улучшения качества макаронных изделий / М. И. Васин, М. А. Калинина, С. А. Парфенова. – М. : ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, 1991. – 24 с. – (Обзорная информация. Серия «Хлебопекарная и макаронная промышленность» / ВНПО «Зернопродукт», ЦНИИ информ. и техн.-экон. исслед.).
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 // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. физ.-техн. наук. – 2013. – № 2. – С. 58–65.
5. 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.
6. 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, N3. – P. 165–178. [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(89\)90048-6](https://doi.org/10.1016/0021-8634(89)90048-6)
7. Hryniewicz, M. Zmienność tarcia zewnętrznego w procesie brykietowania / M. Hryniewicz // Zeszyty Nauk. Akad. Górniczo-Hutniczej. Mechanika. 1994. – T. 13, z.4. – S. 555–563.
8. Барсуков, В. Г. Технологическое трение при экструзии композитов / В. Г. Барсуков, А. И. Свириденко. – Гродно : ГрГУ, 1998. – 200 с.
9. Медведев, Г. М. Технология макаронного производства / Г. М. Медведев ; ред. Н. В. Куркина. – М. : Колос, 1998. – 271 с.
10. Назаров, Н. И. Технология макаронных изделий / Н. И. Назаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Пищ. пром-сть, 1978. – 287 с.
11. Мачихин, Ю. А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю. А. Мачихин, С. А. Мачихин. – М. : Лег. и пищ. пром-сть, 1981. – 215 с.
12. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов / А. В. Горбатов [и др.] ; под ред. А. В. Горбатова. – М. : Лег. и пищ. пром-сть, 1982. – 296 с.
13. Технология пищевых производств : учебник для вузов / Л. П. Ковальская [и др.] ; ред. Л. П. Ковальская. – М. : Колос, 1999. – 752 с.
14. Остриков, А. Н. Экструзия в пищевой технологии / А. Н. Остриков, О. В. Абрамов, А. С. Рудометкин. – СПб. : ГИОРД, 2004. – 281 с.
15. Гноевой, А. В. 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.
16. 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 технологии. – 2015. – № 3 (29). – С. 64–71.
17. Торган, А. Б. Методика оценки вклада пластичной и вязкой составляющих в сопротивление течению макаронного теста / А. Б. Торган // Весн. Гродз. дзярж. ун-та ім. Я. Купалы. Сер. 6, Тэхніка. – 2015. – № 1 (198). – С. 90–98.
18. 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.
19. 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.
20. Ставров, В. П. Технологические испытания реактопластов / В. П. Ставров, В. Г. Дедюхин, А. Д. Соколов. – М. : Химия, 1981. – 246 с.

References

1. Chernov M. S., Medvedev G. M., Negrub V.P. *Handbook of pasta production*. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1984. 304 p. (in Russian).
2. Vasin M. I., Kalinina M. A., Parfenova S. A. *Ways to improve the quality of pasta*. Moscow, TsNIITEIkhleboproduktov Publ., 1991. 24 p. (in Russian).

3. Machikhin Yu. A., Berman G. K., Klapovskii Yu. V. *Molding food masses*. Moscow, Kolos Publ., 1992. 272 p. (in Russian).
4. 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 Natsyonal'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).
5. Demianiuk L., Hejft R., Seweryn A. *Sily 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).
6. Faborode 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)
7. 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 University of Mining and Metallurgy. Hryniewicz, M. Variability of external friction in the briquetting process / M. Hryniewicz // Scientific journals of the AGH University of Science and Technology.
8. Barsukov V. G., Sviridenok A.I. *Technological friction during the extrusion of composites*. Grodno, Grodno State University, 1998. 200 p. (in Russian).
9. Medvedev G.M. *Technology of pasta production*. Moscow, Kolos Publ., 1998. 271 p. (in Russian).
10. Nazarov N.I. *Technology of pasta*. 2nd ed. Moscow, Pishchevaya promyshlennost' Publ., 1978. 287 p. (in Russian).
11. Machikhin Yu. A., Machikhin S.A. *Engineering rheology of food materials*. Moscow, Legkaya i pishchevaya promyshlennost' Publ., 1981. 215 p. (in Russian).
12. 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).
13. 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).
14. Ostrikov A. N., Abramov O. V., Rudometkin A. S. *Extrusion in food technology*. St. Petersburg, GIOR Publ., 2004. 281 p. (in Russian).
15. 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).
16. 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).
17. Torgan A.B. Method of assessing the contribution of plastic and viscous components in resistance to flow of pasta dough. *Vesnik Grodzenskaga dzjarzhaunaga 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).
18. Tadmor Z., Gogos C.G. *Principles of polymer processing*. New York etc., John Wiley & Sons, 1979. 736 p.
19. 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).
20. Stavrov V. P., Dedyukhin V. G., Sokolov A.D. *Technological tests of thermosets*. Moscow, Khimiya Publ., 1981. 246 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

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

Барсуков Владимир Георгиевич – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой технической механики, Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, (ул. Ожешко, 22, 230023, г. Гродно, Республика Беларусь). E-mail: v.g.barsukov@grsu.by

Information about authors

Vladimir Y. Grudanov - D.Sc. (Engineering), Professor. Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220124, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pererabotka.kafedra@mail.ru.

Anna B. Torhan - Ph.D. (Engineering). Belarusian State Agrarian Technical University (99, Nezavisimosti Ave., 220124, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: anechkat@tut.by

Vladimir G. Barsukov - D.Sc. (Engineering). The Yanka Kupala State University of Grodno". (22, Ozheshko Str., 230023, Grodno, Republic of Belarus). E-mail: v.g.barsukov@grsu.by.