

УДК 623.4

<https://elibrary.ru/pwrrnc>

pwrrnc



МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ПОРОХА НА КОЛЬЦЕВОМ ТАБЛЕТИРУЮЩЕМ ПРЕССЕ

Федченко В. Н.¹, Ихтисанов И. И.¹, Бажутин А. А.¹

¹ФГКВОУ ВО «Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации», г. Пермь.

В статье рассматриваются некоторые аспекты математического моделирования процесса переработки пороха на кольцевом таблетующем прессе. Технология производства баллистических порохов является особо опасным процессом. Для минимизации риска взрывоопасных процессов производства пороха предложены способы уплотнения порохового полуфабриката, в частности, использование кольцевого таблетующего пресса. Приведены подробные описания конструкции кольцевого таблетующего пресса, включая расчёты сил давления, трения и других параметров, влияющих на качество обработки пороховой массы. Использование кольцевого таблетующего пресса позволит достичь равномерного распределения давления и плотности в полуфабрикате, что критически важно для обеспечения безопасности технологического процесса производства пороха.

Ключевые слова: моделирование процесса уплотнения порохового полуфабриката; кольцевой таблетующий пресс; свойства полуфабриката пороха; валцы периодического действия; изготовления пороховых таблеток; модернизация технологических процессов.

Для цитирования: Федченко В. Н., Ихтисанов И. И., Бажутин А. А. Моделирование процесса переработки пороха на кольцевом таблетующем прессе // Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии Российской Федерации. Выпуск 3(19) (сентябрь 2025). С. 49–59.

MODELING OF THE POWDER PROCESSING PROCESS ON AN ANNULAR TABLETING PRESS

Fedchenko V. N.¹, Ihtisanov I. I.¹, Bazhtin A. A.¹

¹Federal State Military Educational Institution of Higher Education «Perm Military Institute of the National Guard of the Russian Federation», Perm.

The article discusses some aspects of mathematical modeling of the powder processing process on an annular tableting press. The production technology of ballistic powders is a particularly dangerous process. To minimize the risk of explosive processes in the production of gunpowder, methods for compacting semi-finished powder products have been proposed, in particular, the use of an annular tableting press. Detailed descriptions of the PC design are given, including calculations of pressure, friction, and other parameters affecting the quality of powder processing. The use of annular tableting press will make it possible to achieve a uniform distribution of pressure and density in the semi-finished product, which is critically important for ensuring the safety of the technological process of gunpowder production.

Keywords: modeling of the process of compaction of semi-finished powder products; ring tableting press; properties of semi-finished powder; batch rollers; manufacture of powder tablets; modernization of technological processes.

Введение

Технология производства баллиститных порохов является особо опасным процессом. На предприятиях, выпускающих пороховые заряды и в настоящее время создаются аварийные ситуации. Изучение причин возгорания пороха на технологических операциях, анализ безопасности используемого оборудования остается необходимым требованием для обеспечения безопасности всего технологического процесса производства баллиститных порохов. Перерабатываемый на технологическом оборудовании пороховой полуфабрикат испытывает большие нагрузки при высоких температурах с изменением плотности. При этих условиях всегда возможно его возгорание, приводящее к разрушению производственных зданий, сооружений и технологического оборудования. Создание модели по оценке изменения плотности при его переработке позволит внести необходимые изменения в конструкторскую технологическую документацию и повысить безопасность технологии получения пороховых зарядов для различных артиллерийских систем и ракетных комплексов.

Основная часть

Порох, как метательное взрывчатое вещество, в идеальных условиях должен сгорать по геометрическому закону. Однако, в ряде случаев, таких как замкнутый объём, пористая и рыхлая структура материала при превышении критической скорости нарастания давления газообразных продуктов горения $(dP/dt)_{кр}$, его горение может переходить во взрыв [3]. Особое внимание в этом плане представляет зона уплотнения материала в прессе, где происходят значительные изменения плотности пороха.

Сокращение размеров зоны сильного уплотнения и уменьшение скорости уплотнения позволяет уменьшить вероятность таких переходов. Этого можно достичь за счет повышения диаметров валков и особой конструкции, при которой один валок находится внутри другого валка, при такой конструкции правильнее всего называть валок с внутренней рабочей зоной – барабаном.

Свойства полуфабриката пороха так же оказывают значительное влияние на риск возникновения подобных нежелательных процессов (возгорание и взрыв). Например, рецептурные особенности, такие как наличие тяжёлых твёрдых добавок, взрывчатых веществ или металлов, могут усиливать опасность. Также риск возрастает при высокой доле мелких частиц и пороховой пыли, недостаточной плотности и гомогенности таблеток после сушильных операций.

Для минимизации таких рисков и повышения безопасности процесса рекомендуется предварительное уплотнение и укрупнение порохового полуфабриката перед его подачей в формирующий пресс. Это позволяет улучшить качество материала, сделать его более однородным и снизить вероятность переходных процессов [4].

Одним из аппаратов, эффективно выполняющих эту задачу, является кольцевой таблетирующий пресс (далее – ПКТ) (рисунок 1). Такой пресс обеспечивает равномерное уплотнение и формирование порохового материала, что снижает риски взрывоопасных ситуаций на этапах последующей обработки.

Кольцевой таблетирующий пресс представляет собой устройство, состоящее из станины (позиция 1), на которой установлены вращающийся барабан (позиция 5) и рифлёный ролик (позиция 6). Пороховая крошка из загрузочного бункера (позиция 4) поступает во внутреннюю полость барабана. Вдоль цилиндрической поверхности барабана равномерно расположены радиальные отверстия диаметром 10 мм.

Во время работы прессы ролик и барабан вращаются синхронно. Пороховая крошка захватывается рифлёным роликом (позиция 6) и внутренней поверхностью барабана (позиция 5), формируя пороховой «чулок» (позиция 8) на его внутренней стенке.

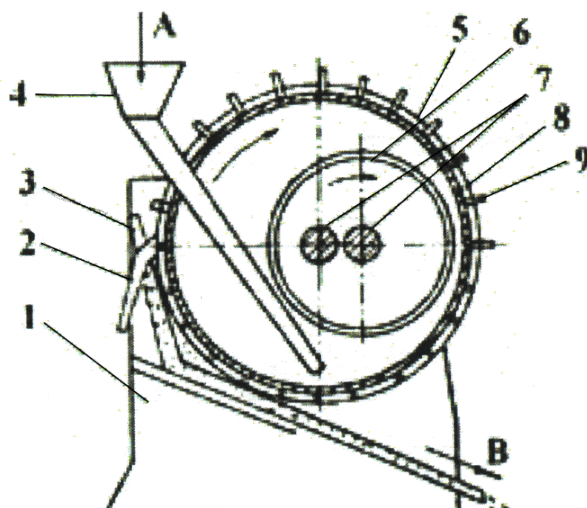


Рисунок 1 – Кольцевой таблетирующий пресс ПКТ:

1 – станина; 2 – нож; 3 – лоток; 4 – загрузочный бункер; 5 – барабан; 6 – ролик;
7 – валы, имеющие общий привод; 8 – пороховой «чулок»; 9 – пороховые шнуры; А –
загрузка пороховой таблетки со стадии сушки; В – выгрузка уплотненной таблетки после ПКТ на
стадию формирования изделий

Под действием ролика и барабана материал уплотняется и продавливается через калибрующие отверстия, превращаясь в пороховые шнуры (позиция 9). Эти шнуры срезаются ножом (позиция 2) на выходе, образуя компактные таблетки.

Готовые таблетки ссыпаются через лоток (позиция 3) в приёмный бункер, откуда они транспортируются в формующий шнек-пресс для дальнейшей обработки.

Ролик и барабан обогриваются до 75–95°C. Перемешивание материала осуществляется в зазоре между параллельно расположенными вращающимися навстречу друг другу роликом и барабаном. Они вращаются с разными окружными скоростями. Отношение окружной скорости ролика к окружной скорости барабана v_n называется фрикцией f , вычислить величину фрикции можно по следующей формуле [1]:

$$f = \frac{v_p}{v_b} = \frac{D_p n_p}{D_b n_b}, \quad (1)$$

где D_p и D_b – диаметры ролика и внутренний диаметр барабана, мм;

n_p и n_b – число оборотов ролика и барабана, об/мин.

Обработка пороховой массы в основном происходит в области деформации, обозначенной точками АБСД (рисунок 2).

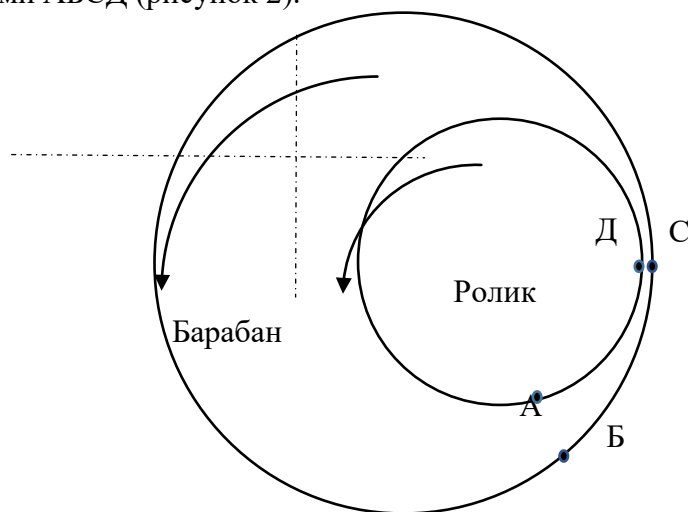


Рисунок 2 – Схема пресса кольцевого таблетирующего ПКТ

В этой области обработка материала производится под действием сил, возникающих от соприкосновения обрабатываемого материала с поверхностью ролика и барабана.

Пороховая масса выдавливается с объёмным расходом Q ($\text{м}^3/\text{сек}$), который зависит от перепада давления (ΔP) и вязкости пороховой смеси (η):

$$Q = N \times C \times \frac{\Delta P}{\eta(T)}, \quad (2)$$

где $\Delta P = P_{\text{внут}} - P_{\text{внеш}}$ – разница давлений, создаваемая барабаном-вальцом и давлением снаружи барабана.

Так как ролик нагревается с помощью подачи в его полость нагретой циркулирующей жидкости (рисунок 3), необходимо учитывать его температуру для расчета вязкости пороховой смеси $\eta(T)$:

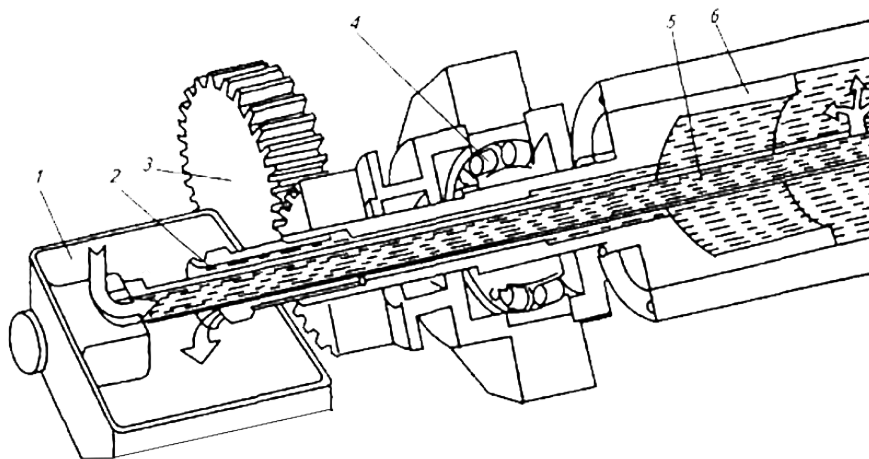


Рисунок 3 – Устройство для нагревания ролика
1 – корпус; 2 – втулка; 3 – шестерни передачи; 4 – подшипник; 5 – трубка;
6 – цапфа; 7 – ролик

$$\eta(T) = \eta_0 \times e^{-\beta(T-T_0)}, \quad (3)$$

где $\eta(T)$ – вязкость пороховой смеси при температуре T ;

η_0 – вязкость при начальной температуре T_0 ;

β – температурный коэффициент;

C – калибровочный коэффициент, зависящий от геометрии отверстия.

Калибровочный коэффициент (C) используется для описания расхода массы через отверстия барабана в условиях вязкого или вязко-пластического течения материала:

$$C = \frac{\pi d_{\text{от}}^4}{128l}, \quad (4)$$

где $d_{\text{от}}$ – диаметр отверстия на барабане;

l – длина отверстия, равное толщине стенки барабана;

N – среднее количество отверстий, через которые пороховая масса одновременно выходит из барабана.

Внутреннее давление можно вычислить, как:

$$P_{\text{внут}} = k_{\text{упр}} \times \Delta \rho, \quad (5)$$

где

$$\Delta \rho = \rho_0 - \rho, \quad (6)$$

$k_{\text{упр}}$ – коэффициент упругости массы (зависит от материала);

ρ_0 – начальная плотность пороховой массы;

ρ – конечная плотность после уплотнения.

Массовый расход пороховой массы (кг/с) можно посчитать по следующей формуле:

$$(\dot{m}) = \rho \times Q_{\text{выход}}, \quad (7)$$

где $Q_{\text{выход}}$ – объёмный расход массы на выходе ($\text{м}^3/\text{с}$);

$$Q = v \times A \times N, \quad (8)$$

где v – средняя скорость потока пороховой массы ($\text{м}/\text{сек}$);

N – количество отверстий, через которые одновременно выходит пороховая масса, шт.;

A – площадь отверстий барабана, через которые одновременно выходит пороховая масса, м^2 ;

Масса пороховой смеси, выходящей из ПКТ, должно быть равно массе входящей смеси, иначе цикл не будет непрерывным, смесь либо закончится, либо барабан переполнится.

Из формулы (7):

$$\rho = \frac{\dot{m}}{Q}. \quad (9)$$

Плотность пороховой массы на выходе из барабана зависит от разности давлений, создаваемой барабаном, валиком и давлением наружи барабана:

$$(\Delta P: \rho = \rho_0 \times (1 + \beta \times \Delta P)), \quad (10)$$

где β – коэффициент сжимаемости массы ($1/\text{Па}$).

Давление на пороховую массу меняется в зависимости от места взаимного расположения пороховой массы, барабана и ролика. Если ролик имеет радиус R_p , а барабан R_b , то зазор между ними меняется в зависимости от угла θ относительно минимального зазора ($h_{\text{мин}}$):

$$h(\theta) = h_{(\text{мин})} + R_{(\text{сред})} \times \theta, \quad (11)$$

где:

$$R_{(\text{сред})} = \frac{R_p + R_b}{2}. \quad (12)$$

Общая сила давления ($F_{\text{об}}$), создаваемая роликом и барабаном будет равна:

$$F_{\text{об}} = l \times R_{(\text{сред})} \times \int_{-\theta_{\text{макс}}}^{\theta_{\text{макс}}} P_{h_g} d\theta \quad (13)$$

Для упрощения формулы (12), можно аппроксимировать распределенное давление линейной функцией:

$$P_{(\text{внут})} = P_{\text{макс}} \times \left(\frac{h_{\text{мин}}}{h_g} \right)^n, \quad (14)$$

где $P_{\text{макс}}$ – давление в минимальном сечении;

h_g – зазор как функция угла θ .

Сила давления будет равна:

$$F_{\text{об}} = \frac{2P_{\text{макс}} \times l \times R_{\text{сред}} \times h_{\text{мин}}}{1 + \cos \theta_{\text{макс}}}. \quad (15)$$

Сила давления ($F_{\text{об}}$) – эта сила действует перпендикулярно поверхности контакта и отвечает за уплотнение массы. Она определяется геометрией зазора между роликом и барабаном, а также свойствами массы (вязкость, предел текучести) и фрикцией [5].

$$P_{\text{внут}} = \frac{F_{\text{об}}}{l \times R_{\text{сред}} \times l}, \quad (16)$$

где l – нормирующий множитель, связанный с распределением давления в зависимости от геометрии системы.

$$I = \int_{-\theta_{\max}}^{\theta_{\max}} \left(\frac{h_{\min}}{h_{\min} + R_{\text{сред}} \times (1 - \cos \theta)} \right)^n d\theta, \quad (17)$$

где h_{\min} — минимальный зазор между роликом и барабаном до линии симметрии;
 θ_{\max} — максимальный угол контакта, в пределах которого ролик воздействует на массу;

n — показатель степени, описывающий как давление изменяется с зазором.

$$F_p = \frac{M_p}{R_p}, \quad (18)$$

$$F_b = \frac{M_b}{R_b}, \quad (19)$$

где F_p и F_b — силы от ролика и барабана (Н);

M_p и M_b — моменты вращения ролика и барабана (Н·м);

R_p и R_b — радиусы ролика и барабана (м).

Результирующая сила: поскольку ролик и барабан вращаются в одну сторону, результирующая сила втягивания пороховой массы ($F_{\text{рез}}$) рассчитывается:

$$F_{\text{рез}} = F_p + F_b - F_{\text{тр}}, \quad (20)$$

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{рез}} \times s, \quad (21)$$

где $F_{\text{тр}}$ — сила трения.

На пороховую массу также влияет трение, вызванное контактами с роликом и барабаном.

Сила втягивания ($F_{\text{рез}}$): эта сила направлена вдоль движения массы и отвечает за подачу пороховой массы в зону контакта. Она создаётся за счёт вращения ролика и барабана и зависит от момента двигателей, радиусов ролика и барабана, а также коэффициента трения. Сила давления вызывает сопротивление потоку: давление уплотнения создаёт сопротивление потоку массы, так как пороховая масса должна пройти через узкий зазор, увеличивая её плотность. Это сопротивление замедляет поток, влияя на эффективность втягивания. Сила втягивания обеспечивает подачу массы в зазор, а сила давления формирует необходимое уплотнение. Их взаимодействие определяется следующими ключевыми факторами:

- свойствами массы (вязкость, плотность, предел текучести);
- трением;
- геометрией системы;
- балансом моментов двигателей.

Если известна мощность двигателей P_p и P_b (ролика и барабана), моменты рассчитываются как:

$$M_p = \frac{P_p}{\omega_p}, \quad (22)$$

$$M_b = \frac{P_b}{\omega_b}, \quad (23)$$

где ω_p и ω_b — угловые скорости ролика и барабана (рад/с).

$$\omega_p = \frac{\pi n_p}{30}, \quad (24)$$

$$\omega_b = \frac{\pi n_b}{30}, \quad (25)$$

где n_p и n_b — частоты вращения ролика и барабана (об/мин).

Исходя из этого сила втягивания пороховой массы от ролика и барабана ($F_{\text{рез}}$):

$$F_{\text{рез}} = (1 - \mu) \times \left(\frac{P_p}{\omega_p \times R_p} + \frac{P_b}{\omega_b \times R_b} \right). \quad (26)$$

Общее внутреннее усилие (распорное давление ролика и барабана) без учета отверстий на барабане можно посчитать по формуле:

$$F_{\text{внут}} = 2\mu URl \left(\frac{1}{h_0} - \frac{1}{h} \right). \quad (27)$$

Максимальное давление в пороховой массе без учёта отверстий на барабане можно посчитать по формуле [2]:

$$P_{\text{макс}} = 4\mu U \sqrt{\frac{R(h-h_0)}{h^2}}. \quad (28)$$

Указанная математическая модель относится к группе описания процесса вальцевания, основанного на предположении, что полимерные материалы в процессе переработки ведут себя как жидкости, процесс течения которых можно описать с использованием уравнений гидромеханики [2]. К другим методам относятся – метод эмпирической зависимости, требующий проведение практического эксперимента и метод, основанный на предположении, что полимерные материалы имеют ярко выраженный предел текучести и ведут себя при обработке давлением как металлы.

Скорость выдавливания пороховой массы через отверстие можно вычислить из закона Бернулли:

$$v = \sqrt{\frac{2P}{\rho_{\text{выход}}}}. \quad (29)$$

Если давление (P) внутри системы уменьшается из-за выдавливания пороховой массы через отверстия и выдавливанием в сторону, противоположную направлению движения ролика и барабана (рисунок 4), дифференциальное уравнение описывает его изменение со временем:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{-\zeta PA}{V} \sqrt{\frac{2}{\rho}}. \quad (30)$$

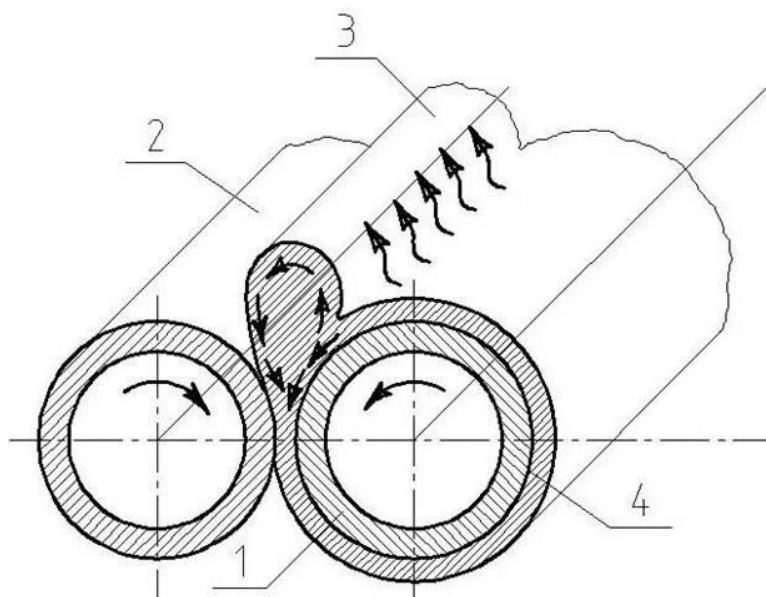


Рисунок 4 – Смешивальные валцы периодического действия:

1 – валок несущий; 2 – валок смешивающий; 3 – масса в запасе; 4 – «чулок»

Формула по определению внутреннего усилия (распорное давление ролика и барабана) без учета отверстий на барабане можно посчитать по формуле через коэффициент (n), учитывающий параметры пороховой смеси:

$$F_{\text{внут}} = 2\mu Rl \left(\frac{U}{h_0} \right)^n P_{\text{вн}}. \quad (31)$$

Суммарное давление ($P_{\text{сум}}$) внутри системы можно определить по формуле:

$$P_{\text{сум}} = P_{\text{макс}} - P_{\text{утеч.}} \quad (32)$$

Так как процесс изготовления пороховых таблеток непрерывный, это означает, что весь объёмный расход массы на входе ($Q_{\text{вход}}$) равен объёмному расходу через отверстия ($Q_{\text{выход}}$):

$$Q_{\text{вход}} = Q_{\text{выход}} \quad (33)$$

Объединив формулу (30) с формулой (27) мы получим выражение, связывающее максимальное давление в барабане (выраженное через параметры движения ролика и зазора) с его изменением из-за утечки через отверстия барабана:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{-\zeta 4\mu U \sqrt{\frac{R(h-h_0)}{h^2}} A}{V} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (34)$$

Подставив в формулу (32) выражения (34) и (27) мы получим формулу:

$$P_{\text{сум}} = 4\mu U \sqrt{\frac{R(h-h_0)}{h^2}} - \frac{\zeta 4\mu U \sqrt{\frac{R(h-h_0)}{h^2}} A}{V} \sqrt{\frac{2}{\rho}}, \quad (35)$$

где R_p – радиус ролика, м;

R_6 – радиус внутреннего диаметра барабана, м;

P_p – мощность двигателя, вращающего ролик, Вт;

P_6 – мощность двигателя, вращающего барабан, Вт;

ω_p – угловая скорость ролика, рад/с;

ω_6 – угловая скорость барабана, рад/с;

n_p – частота вращения ролика, об/мин;

n_6 – частоты вращения барабана, об/мин;

l – ширина ролика и барабана, м;

$h_{\text{мин}}$ – минимальный зазор между роликом и барабаном до линии симметрии, м;

h – зазор между роликом и барабаном до линии симметрии, соответствующий максимальному углу контакта, м;

$\theta_{\text{макс}}$ – максимальный угол контакта, в пределах которого ролик воздействует на массу, рад;

$d_{\text{от}}$ – диаметр отверстия на барабане, м;

L – длина отверстия, равное толщине стенки барабана, м;

N – среднее количество отверстий, через которые пороховая масса одновременно выходит из барабана;

ρ_0 – плотность пороховой массы на входе, кг/м³;

$\rho_{\text{выход}}$ – плотность пороховой массы на выходе, кг/м³;

β – коэффициент сжимаемости пороховой массы, 1/Па;

η_t – вязкость пороховой массы при определенной температуре Т(1/Па);

s – коэффициент трения массы о ролик и барабан;

μ – эффективная вязкость, Н·с/м²;

$Q_{\text{вход}}$ – объёмный расход массы на входе, м³/с;

$Q_{\text{выход}}$ – объёмный расход массы на выходе, м³/с;

$F_{\text{рез}}$ – сила втягивания пороховой массы, Н;

C – калибровочный коэффициент, зависящий от геометрии отверстия;

$P_{\text{внут}}$ – внутреннее давление в пороховой массе между роликом и барабаном, Па;

U – средняя скорость ролика и барабана, м/с;

A – площадь отверстий барабана, через которые одновременно выходит пороховая масса, м²;

ζ – коэффициент расхода (учитывает потери на трение и форму отверстий, выталкивание пороховой массы в направлении, противоположное движению барабана и ролика);

V – объём псевдо-замкнутого пространства (получаемый стенками ролика и барабана с одной стороны и втягиваемой пороховой массой с другой стороны).

Полученная модель позволяет рассмотреть зависимости, влияющие на внутреннее давление пороховой массы (рисунки 5, 6, 7).

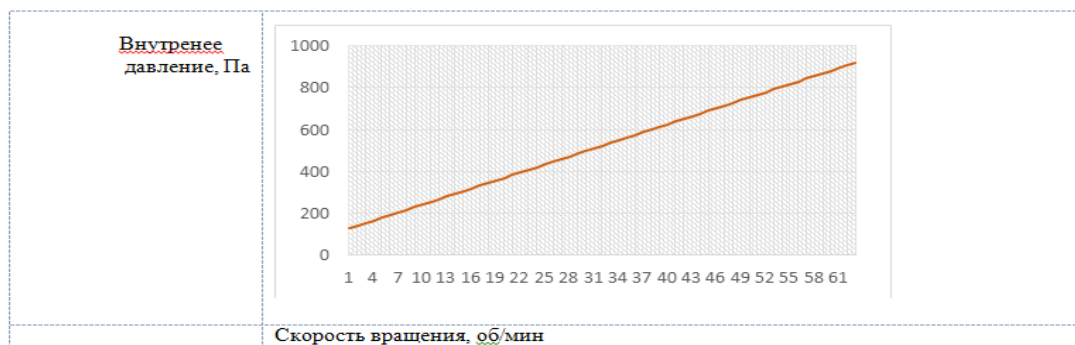


Рисунок 5 – Зависимость внутреннего давления от скорости вращения ролика и барабана

На рисунке 5 прослеживается прямая зависимость внутреннего давления от изменения скорости вращения ролика и барабана. Уменьшив скорость вращения, но при этом увеличив длину барабана, не изменяя уровень производительности установки можно уменьшить давление на пороховую массу, что скажется на безопасности производства порохового полуфабриката.

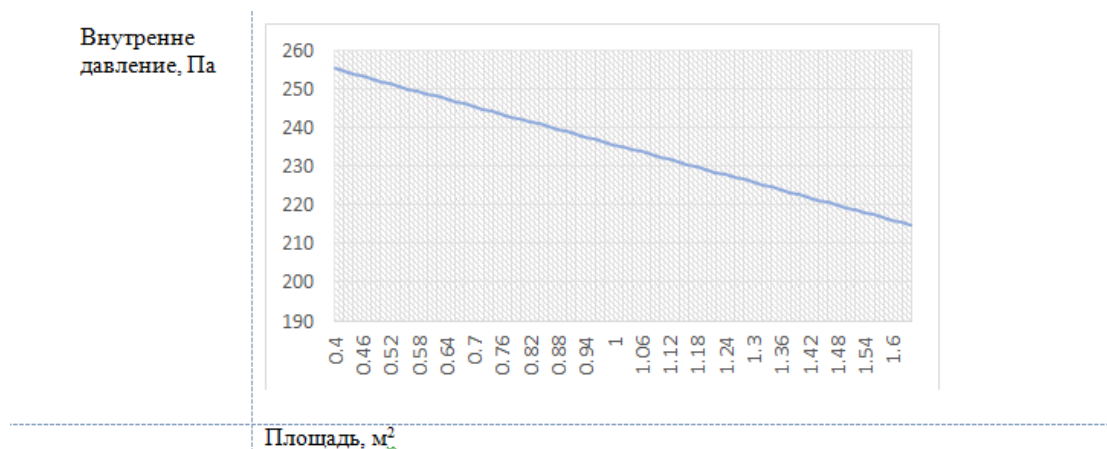


Рисунок 6 – Зависимость внутреннего давления и падения давления от суммарной площади задействованных отверстий барабана (m^2)

На рисунке 6 прослеживается падение внутреннего давления порохового полуфабриката $P_{\text{макс}}$ внутри ПКТ с увеличением площади выходных отверстий барабана по причине увеличения объёмного расхода массы на выходе (m^3/c) и соответственно увеличения падения давления dP .

На рисунке 7 прослеживается падение внутреннего давления порохового полуфабриката $P_{\text{макс}}$ внутри ПКТ с уменьшением объёма псевдо-замкнутого пространства (получаемого стенками ролика и барабана с одной стороны и втягиваемой пороховой массой с другой стороны) и резкого увеличения объёмного расхода массы на выходе (m^3/c).

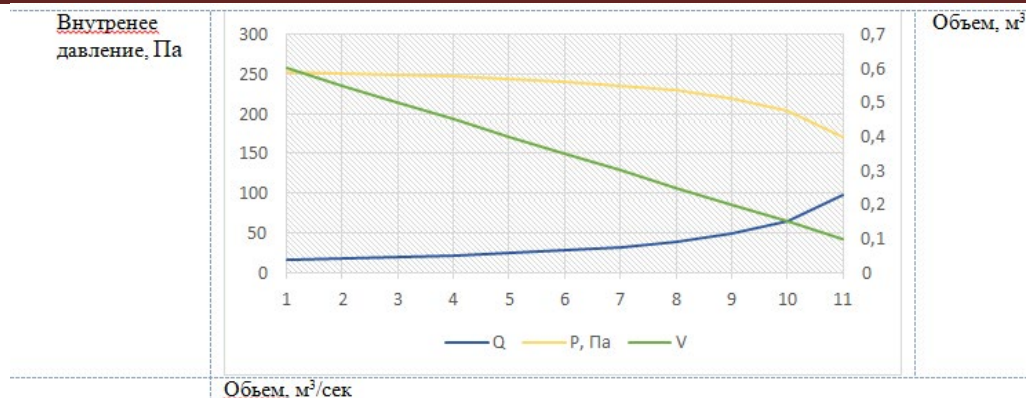


Рисунок 7 – Зависимость внутреннего давления и объемного расхода от изменения объема псевдо-замкнутого пространства (получаемого стенками ролика и барабана с одной стороны и втягиваемой пороховой массой с другой стороны)

Заключение

Практическая реализация описанной модели может быть полезной не только в производстве пороха, но и в обработке других взрывоопасных материалов. Кроме того, предложенные подходы закладывают основу для разработки новых стандартов безопасности и модернизации технологических процессов. Данная математическая оценка изменения плотности перерабатываемого пороха в различных зонах кольцевого таблетирующего пресса позволит внести соответствующие изменения в работу этого аппарата (изменение числа оборотов, зазоров, диаметров барабанов и их технологических отверстий и т. д.). По данной методике можно изучить степень опасности процесса по изменению плотности пороха $\rho_{\text{выход}}$. Разрабатываемая методика может быть применена для оценки безопасности всего технологического оборудования, используемого в производстве баллистического пороха.

Библиографический список

1. Николаева, О. И. Валковые машины в процессах переработки полимерных материалов: учебное пособие / О. И. Николаева, В. А. Бурмистров; М-во образования и науки Российской Федерации, Ивановский гос. химико-технологический ун-т. – Иваново: ИГХТУ, 2010. – 83 с.
2. Проектирование и расчет валковых машин для полимерных материалов / А. С. Клинков, В. И. Кочетов, М. В. Соколов [и др.]; Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2005.
3. Федченко, В. Н. К вопросу моделирования процесса нитрования целлюлозы с использованием сред динамического моделирования SIMINTECH и Simulink / В. Н. Федченко, А. А. Бажутин // Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии. – 2024. – № 4(16). – С. 86–97.
4. Введение в технологию энергонасыщенных материалов: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки дипломированных специалистов «Химическая технология энергонасыщенных материалов и изделий» / Д. И. Дементьева [и др.]; Федеральное агентство по образованию, Бийский технологический ин-т (фил.) гос. образовательного учреждения высш. проф. образования «Алтайский гос. технический ун-т им. И. И. Ползунова». – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Бийск: Изд-во Алтайского гос. технического университета им. И. И. Ползунова, 2009. – 253 с.
5. Варава, М. А. Исследование динамического нагружения на прочность и деформацию валков станов продольной прокатки / М. А. Варава, Ю. А. Морозов // XXVII Международная инновационно-ориентированная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС–2015): Труды конференции, Москва, 02–04 декабря 2015 года. – Москва:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, 2015. – С. 60–63.

Контактная информация:

Федченко Валерий Николаевич – 1vn52@mail.ru

Ихтисанов Ильнар Ильдарович – alfione83@mail.ru

Бажутин Андрей Александрович – bazhutin@rambler.ru

References

1. Nikolaeva, O. I. Roller Machines in Polymer Processing: A Study Guide / O. I. Nikolaeva, V. A. Burmistrov; Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Ivanovo State University of Chemical Technology. – Ivanovo: IGTU, 2010. – 83 p.

2. Design and Calculation of Roll Machines for Polymer Materials / A. S. Klinkov, V. I. Kochetov, M. V. Sokolov [et al.]; Tambov State Technical University. – Tambov: Tambov State Technical University, 2005.

3. Fedchenko, V. N. On the Modeling of the Cellulose Nitration Process Using the SIMINTECH and Simulink Dynamic Modeling Environments / V. N. Fedchenko, A. A. Bazhtin // Almanac of the Perm Military Institute of the National Guard. – 2024. – No. 4(16). – Pp. 86–97.

4. Introduction to the technology of energy-saturated materials: a textbook for students of higher educational institutions studying in the field of graduate training «Chemical technology of energy-saturated materials and products» / D. I. Dementieva [et al.]; Federal Agency for Education, Biysk Institute of Technology (phil.) of the state educational institution of higher Education. Prof. Education «Altai State Technical University named after I. I. Polzunov». – 2nd ed., revised. and add. – Biysk: Publishing House of the Polzunov Altai State Technical University, 2009. – 253 p.

5. Varava, M. A. Study of Dynamic Loading on the Strength and Deformation of Rolls in Longitudinal Rolling Mills / M. A. Varava, Yu. A. Morozov // XXVII International Innovative Conference of Young Scientists and Students (MIKMS-2015): Proceedings of the Conference, Moscow, December 02-04, 2015. – Moscow: Federal State Budgetary Institution of Science Institute of Mechanical Engineering named after A. A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences, 2015. – Pp. 60–63.

Contact information:

Fedchenko Valery Nikolaevich – 1vn52@mail.ru

Ihtisanov Ilnar Ildarovich – alfione83@mail.ru

Bazhutin Andrey Alexandrovich – bazhutin@rambler.ru