

УДК 686.12.056

© А. І. Іванко, канд. техн. наук, доц., В. П. Пасічник, магістр,
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ВИТРАТ ПОВІТРЯ У КАМЕРІ ПНЕВМОМАРЗАНА РОТАЦІЙНОГО ВИСІКАЛЬНОГО МОДУЛЯ

У статті проведено комп'ютерне моделювання в середовищі SolidWorks процесу витрати повітря в камері модуля пневмомарзана ротаційної висічки.

Ключові слова: картонна розгортка; аркушевий матеріал; стрічковий транспортер; стиснуте повітря; струмінь повітря; повітряний потік.

Постановка проблеми

Обладнання для виготовлення картонного пакування постійно удосконалюється [1–3]. Проектуються нові секції та пристрої для здійснення найбільш відповідальних машинних технологічних процесів прорізування, висікання, вирубування та інших [4, 5]. Збільшується тенденція до удосконалення ротаційного способу обрізування та висікання аркушевих матеріалів (обертовий рух виконавчих елементів відносно своїх центральних осей) [6–8] так і висікання матеріалів в удосконалених класичних способах плоскими елементами (плоска штанцювальна форма та протиніж) [9–11].

Головною проблемою при проектуванні характерного різально-го та висікально-оздоблювального обладнання є якість виконаних процесів на завершальному етапі [12, 13].

Аналіз попередніх досліджень

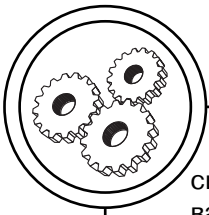
Ротаційні висікальні секції широко використовуються в полі-

графічній та пакувальній галузі. До переваг однозначно слід віднести велику продуктивність роботи, тому удосконалення даного процесу є дуже важливим. На даний час проектування, модернізація та удосконалення ротаційного обладнання вимагає оригінальних технічних рішень, особливо для виробництва різнопрофільних картонних пакувань. Мова іде про якісний технологічний процес висікання у зоні «ніж—контрніж» та загалом про виконану завершальну роботу.

Проблема стосується різальних та оздоблювальних виконавчих механізмів. Так використання пневматичних систем може суттєво спростити процес висікання [14–21]. Однак висвітлення даної проблеми потребує більш ґрунтовного дослідження.

Мета роботи

Попередній розрахунок та моделювання технологічних параметрів процесу висікання картонних розгорток у пневматичній



системі засобами автоматизованого проектування SolidWorks.

Результати проведених досліджень

Розроблений на кафедрі МАПВ ВПІ висікальний модуль може бути вмонтованим у транспортувальну систему. Таке комбінування транспортера та ротаційного висікального модуля потребує додаткових теоретичних та експериментальних досліджень.

Гвинтові ножі ротаційного висікального модуля дозволяють здійснювати криволінійне розділення картонної розгортки. Геометрія кожного леза залежить від кута підйому гвинтової лінії, осьового кроку H_k та довжини висікальної лінії (довжину зрізу) $L_{вл}$.

Зусилля висікання F_B криволінійної розгортки (КР) висікальними інструментами на обертовому барабані теоретично може дорівнювати зусиллям опору τ (Па).

$$\tau = \frac{F}{P}, \quad (1)$$

де F — зусилля висікання (Н), P — умовна площа контакту КР з висікальними інструментами (m^2).

Оскільки розрахунок опору висікання КР в реальних робочих умовах є складною функцією, яка враховує багато технологічних параметрів, для спрощення розрахунків використовують емпіричні залежності, які дозволяють отримати результат з достатньою точністю:

$$\tau = \frac{B \cdot C_1}{S}, \quad (2)$$

або

$$\tau = C_2 \cdot H, \quad (3)$$

де B — відносний абсолютний опір прорізуванню КР (Н); C_1 і C_2 — емпіричні коефіцієнти; S — товщина матеріалу КР (м); H — твердість матеріалу КР (Па).

Значення коефіцієнтів для розрахунку вищевказаних залежностей приймаються відповідно до матеріалу $C_1 = 15-30$; $C_2 = 1,0-1,5$.

Оскільки тиск повітря в зоні висікання повинен дорівнювати зусиллю різання, ми можемо задатися цим параметром як вихідними. Відповідно розраховуємо швидкість повітряного потоку на виході з сопла пневмомарзана. А також визначаємо швидкість потоку повітря:

$$v = \sqrt{\frac{2 \frac{F_B}{S}}{\rho}}, \quad (4)$$

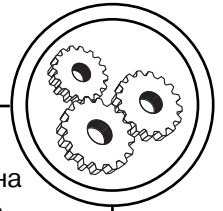
де v — швидкість потоку повітря при виході з сопла ($\frac{M}{C}$); s — площа перерізу сопла, (m^2); ρ — густина повітря ($\frac{kg}{m^3}$).

Для розрахунку густини повітря скористаємось рівнянням Менделєєва-Клайперона:

$$pV = \nu RT. \quad (5)$$

Знаючи базове рівняння для густини, ми приводимо рівняння до наступного вигляду.

$$\rho = k \frac{p}{T}. \quad (6)$$



Отримане рівняння слід використовувати для розрахунку швидкості потоку повітря через переріз сопла пневмомарзана, виконавши ряд перетворень:

$$v = \sqrt{\frac{2 \frac{F_B}{S}}{k \frac{p}{T}}} \quad (7)$$

Оскільки в робочій зоні пневмомарзана тиск повітря суттєво змінюється, важливо розуміти вплив цих змін на температурні показники, оскільки температура повітря теоретично впливатиме на працездатність ротаційного висікального модуля загалом.

Використавши рівняння об'ємного стану газу отримаємо:

$$T_2 = \frac{P_2 V_2 T_1}{P_1 V_1}, \quad (8)$$

де T_2 — температура повітря на виході з сопла пневмомарзана.

Підставивши отриману залежність у формулу для розрахунку об'ємної витрати повітря, отримуємо наступні графічні залежності витрат повітря від товщини КР:

$$Q = \sqrt{2} \cdot L \cdot H \cdot \sqrt{\frac{F_B \cdot T_1 \cdot D}{k \cdot P_1 \cdot V_1}} \quad (9)$$

Послідовність та отримані залежності використовуємо для побудови графіків витрат повітря від його температурних режимів роботи в робочій зоні висікання для $t_1 = 20^\circ$; $t_2 = 35^\circ$; $t_3 = 50^\circ$ (рис. 1).

Як помітно на графіку, зі збільшенням температури зростає необхідна швидкість повітряного потоку для підтримання необхідного робочого тиску. Це напряму

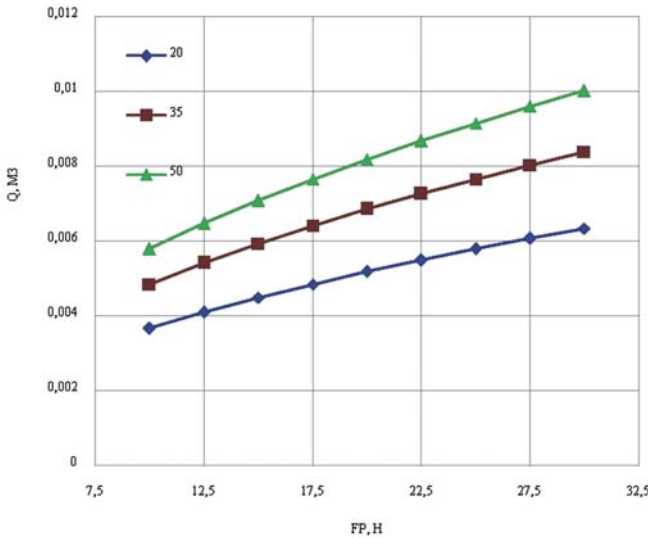
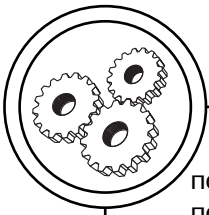


Рис. 1. Теоретична залежність витрат повітря від температурних режимів роботи для $t_1 = 20^\circ$; $t_2 = 35^\circ$; $t_3 = 50^\circ$ в робочій зоні



пов'язано зі зменшенням густини повітря при збільшенні його температури.

При збільшенні товщини аркушевого матеріалу в межах 32...45 %, продуктивність може бути збільшена шляхом зміни геометричних характеристик сопла пневмомарзана в межах від 2,5...5 мм відповідно до робочої зони перекриття (контакту) гвинтового ножа і оброблюваного аркуша (рис. 2).

На графіках (рис. 3, а, б) можна бачити обернену пропорційність між температурою повітря і його щільністю у одних і тих самих зонах висікальної секції та умовної геометрії розрізу гвинтовим ножом аркушевого матеріалу $L_p = 0...1,4$ м.

Результати моделювання даного процесу в середовищі автоматизованого проектування SolidWorks вказують, що пікові значення температури досягають 310°K (37°C), що більше початкового значення 293°K (20°C) на 85 %.

В свою чергу це призводить до зменшення щільності повітря на 5,8 %. Такий результат призводить до коливань тиску в зоні висікання (рис. 3, в) і потребує корекції за допомогою зміни об'єму повітря, що подається до робочої зони висікальної секції, або варіативної геометрії сопла задля оптимізації напрямку повітряного потоку.

Окремо слід зауважити, що вдосконалення геометрії сопла є важливим напрямком подальшого дослідження. Як помітно з графіка (рис. 3, в) спостерігається частковий спад тиску в робочих зонах висікання. Теоретично це може призводити до зниження якості обробки картонних розгорток.

Визначення оптимального способу процесу висікання, мінімізації впливу температурних параметрів та витрат повітря в пневматичній системі є актуальним питанням при розробці високошвидкісних висікальних секцій.

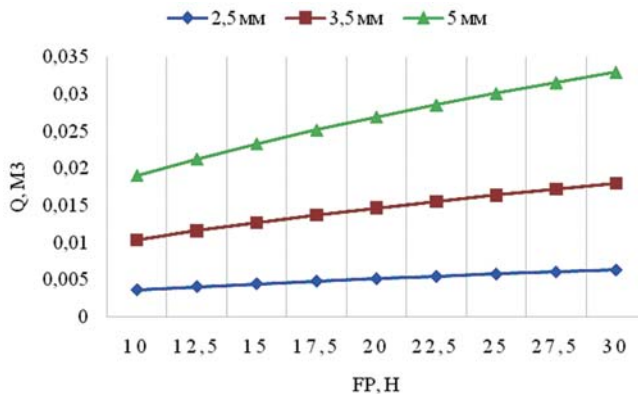
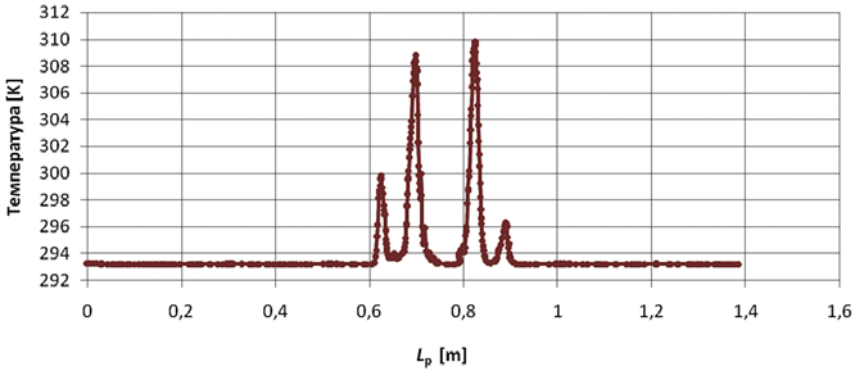
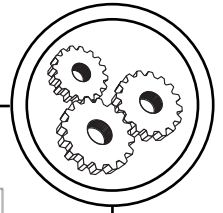
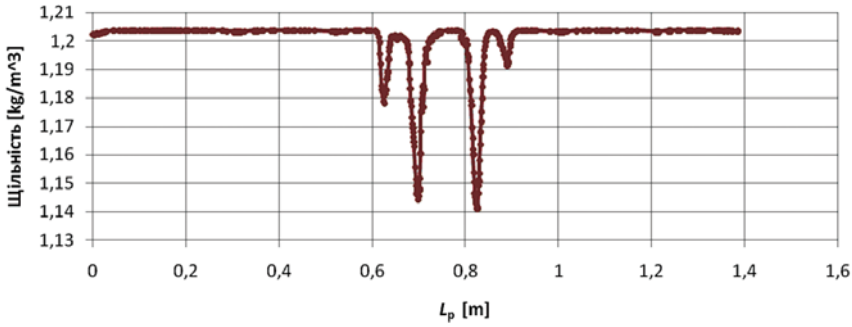


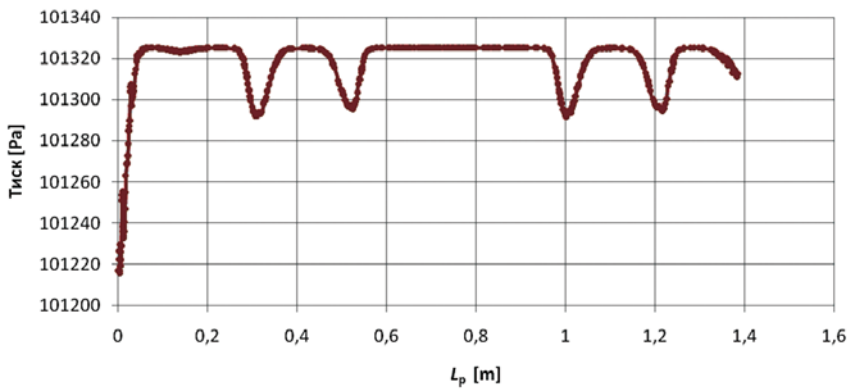
Рис. 2. Залежність витрат повітря від геометричних характеристик сопла пневмомарзана для робочої зони контакту гвинтового ножа і аркушевого матеріалу для 2,5 мм, 3,5 мм та 5 мм відповідно



а

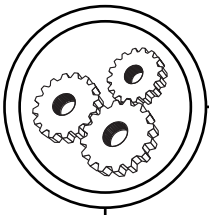


б



в

Рис. 3. Приклад моделювання процесу висікання в середовищі SolidWorks для умовної геометрії розрізу матеріалу гвинтовим ножом в межах $L_p = 0 \dots 1,4$ м для: а — температури повітря в зоні висікання; б — щільності повітря; в — тиску повітря



Висновки

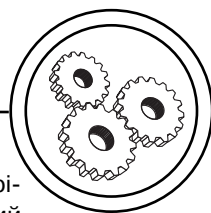
В основу проведеної роботи покладено дослідження щодо суттєвого впливу витрат повітря та його температурних змінних показників як характерного робочого тіла в робочій зоні пневматичної ротаційної висікальної секції. Представлені графічні залежності наглядно ілюструють залежність об'ємної витрати по-

вітря від його змінної температури. Відповідно пікові витрати повітря досягали 38 %.

Проведені за допомогою системи автоматизованого проектування SolidWorks додаткові дослідження показали характерну залежність витрат повітря у зоні висікання картонних розгортки від його температури.

Список використаної літератури

1. Регей І. І. Наукові основи розроблення енергоощадної технології і засобів виготовлення розгортки картонного пакування [Текст]: дис. д-ра техн. наук: 05.05.01 / І. І. Регей. Львів, 2007. 269 с.
2. Банах Ю. О. Удосконалення плоского висікального преса шляхом нівелювання впливу пружних деформацій привода [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.05.01 / Ю. О. Банах. Львів, 2004. 172 с.
3. Задра В. М. Комплексна оптимізація засобів для прорізування різнопрофільних отворів у паперово-картонних виробках [Текст]: дис. канд. техн. наук: 05.05.01 / В. М. Задра. Львів, 2003. 177 с.
4. Пат. 5113731A US Patent, MKE B 26 D 1/22, B 26 D 9/00. Method and apparatus for cutting printed products / Reist Walter; Ferag AG. № US19910790026 19911106; заявл. 06.11.1991; опубл. 19.05.1992, Appl. No.: 790,026. 14 с.
5. Іванко А. І. Ротаційне обрізування аркушевого матеріалу у вкладально-швейно-різальних агрегатах / А. І. Іванко, С. О. Семеняга // Технологія і техніка друкарства. 2012. Вип. 1(35). С. 107–112. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(35\).2012.32751](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(35).2012.32751).
6. Пат. України № 103976. В26D1/09//В31В1/14. Спосіб підготовки покривного матеріалу для фігурної палітурки та пристрій для його реалізації / А. І. Іванко, К. О. Чепурна, К. О. Махинич. Заявл. 18.12.2012; Опубл. 10.12.2013. Бюл. № 23, 2013. 4 с.
7. Пат. України на кор. мод. № 98846. МПК В31В 1/14, В26D 1/00, В26D 1/10. Пристрій для підготовки картонних боковинок фігурної палітурки / А. І. Іванко, Ю. О. Шостачук. Заявл. 19.11.2014; Опубл. 12.05.2015. Бюл. № 9, 2015. 4 с.
8. Іванко А. І. Пристрій для фігурного обрізування аркушевих матеріалів в потокових лініях / А. І. Іванко, С. Л. Панов // Технологія і техніка друкарства. 2015. Вип. 4(50). С. 105–110. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(50\).2015.54334](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(50).2015.54334).
9. Іванко А. І. Конструкція пристрою для безупинного обрізування аркушевого матеріалу в потокових лініях / А. І. Іванко, Р. В. Маржієвський // Технологія і техніка друкарства. 2012. Вип. 3(37). С. 109–113. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(37\).2012.32406](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(37).2012.32406).
10. Пат. України на кор. мод. № 80303. В26D 1/00. Пристрій для безупинного обрізування аркушевого матеріалу в потокових лініях / А. І. Іванко, Р. В. Маржієвський. Заявл. 12.11.2012; Опубл. 27.05.2013. Бюл. № 10, 2013. 4 с.



11. Іванко А. І. Кінематичні та динамічні параметри пристрою для обрізування аркушевого матеріалу / А. І. Іванко, С. Л. Панов, Р. В. Маржієвський // Технологія і техніка друкарства. 2014. № 2(44). С. 103–111. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(44\).2014.31834](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(44).2014.31834).

12. Гавенко С. Ф. Оцінювання якості виконання операції різання при виготовленні картонних виробів / С. Ф. Гавенко, В. М. Задра // Поліграфія і видавнича справа. 2002. № 38. С. 25–28.

13. Іванко А. І. Вплив технологічних процесів різання аркушевих матеріалів на якісні характеристики продукції / А. І. Іванко, К. О. Чепурна, К. О. Махинич // Технологія і техніка друкарства. 2013. Вип. 1(39). С. 28–39. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(39\).2013.31041](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(39).2013.31041).

14. Іванко А. І. Обрізування аркушевих матеріалів у пневматичних транспортувальних системах / А. І. Іванко, О. С. Марченко // Технологія і техніка друкарства. 2016. Вип. 2(52). С. 72–78. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(52\).2016.71012](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(52).2016.71012).

15. Ivanko A. I. Method of sheet material trimming without using counter-knife / A. I. Ivanko, O. S. Marchenko // Технологія і техніка друкарства. 2017. Вип. 3(57). С. 36–42. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(57\).2017.115462](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(57).2017.115462).

16. Ivanko A. Cardboard sheet cutting with air-operated conveying devices using / A. Ivanko // International research and practice conference 'Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences'. Radom Academy of Economics. Radom, Republic of Poland; 27.12.2017. P. 116–119.

17. Іванко А. І. Безмарзанний спосіб обрізування аркушевих матеріалів у потокових лініях / А. І. Іванко // XXV Міжнарод. наук.-практ. конф. з пробл. вид.-полігр. галузі: тези доп., Київ 16 листоп. 2017 р. «УкрНДІСВД». К., 2017. С. 40–41.

18. Пат. України на кор. мод. № 123600. В42С 5/04. Пристрій для обрізування аркушевого матеріалу / А. І. Іванко. Заявл. 23.11.2017; Опубл. 26.02.2018. Бюл. № 4, 2018. 4 с.

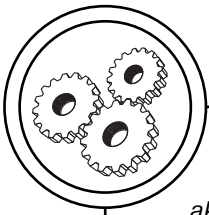
19. Ivanko A. Pneumatic transportation systems of sheet material / A. Ivanko, O. Marchenko // VII International scientific conference 'Advanced technologies in mechanical engineering', Institute of Engineering Mechanics and Transport / Lviv Polytechnic National University. Lviv–Zveniv, 5–9 February 2018. P. 15–17.

20. Ivanko A. I. Use of pneumatic devices for manufacturing cardboard reamers / A. I. Ivanko, O.V. Pidvyshenna // International scientific and practical conference 'Science, engineering and technology: global and current trends' / Czech technical university in Prague, Czech Republic. December 27–28, 2019. P. 120–122.

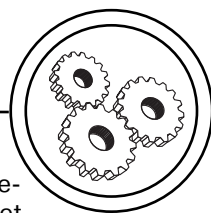
21. Ivanko A. Rotary die cutting of cardboard sweep by using pneumatics / A. Ivanko // Принттехнологии и медиакоммуникации: материалы 84-й науч.-техн. конф. профессорско-препод. состава, научн. сотр. и асп. Минск: БГТУ, 3–14 февраля 2020. С. 59–61.

References

1. Rehei, I. I. (2007). *Naukovi osnovy rozroblennia enerhooshchadnoi tekhnologii i zasobiv vyhotovlennia rozghortok kartonnoho pakovannia [Scientific bases of development of energy-saving technology and means of manufacturing of scans of cardboard packing]*. Lviv, 269 p. [in Ukrainian].



2. Banakh, Yu. O. (2004). *Udoskonalennia ploskoho vysikalnogo presa shliakhom niveliuvannia vplyvu pruzhnykh deformatsii pryvoda [Improvement of flat die-cutting press by leveling the influence of elastic deformations of the drive]*. Lviv, 172 p. [in Ukrainian].
3. Zadra, V. M. (2003). *Kompleksna optymizatsiia zasobiv dlia prorizuvannia riznoprofilnykh otvoriv u paperovo-kartonnykh vyrobakh [Complex optimization of means for eruption of various openings in paper and cardboard products]*. Lviv, 177 p. [in Ukrainian].
4. Reist Walter; Ferag AG. *Method and apparatus for cutting printed products* // Patent № US19910790026 19911106. Publish 19.05.1992 [in English].
5. Ivanko, A. I. & Semeniah, S. O. (2012). Rotatsiine obrizuvannia arkushevoho materialu u vkladalno-shveino-rizalnykh ahrehatakh [Rotary trimming of sheet material in inserting-sewing-cuttings aggregates]. *Journal of Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, 1(35), 107–112. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(35\).2012.32751](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(35).2012.32751) [in Ukrainian].
6. Ivanko, A. I. & Chepurna, K. O & Makhynych, K. O. *Sposib pidhotovky pokryvnoho materialu dlia fihurnoi paliturky ta prystrii dlia yoho realizatsii [Method of preparing cover material for figured binding and device for its implementation]* // Patent № 103976. Publish 10.12.2013 [in Ukrainian].
7. Ivanko, A. I. & Shostachuk, Yu. O. *Prystrii dlia pidhotovky kartonnykh bokovynok fihurnoi paliturky [Device for preparation of cardboard sides of a figured cover]* // Patent № 98846. Publish 12.05.2015. [in Ukrainian].
8. Ivanko, A. I. & Panov, S. L. (2015). Prystrii dlia fihurnoho obrizuvannia arkushevykh materialiv v potokovykh liniiah [Mechanism for curvilinear cut sheet material in the production line]. *Journal of Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, 4(50), 105–110. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.4\(50\).2015.54334](https://doi.org/10.20535/2077-7264.4(50).2015.54334) [in Ukrainian].
9. Ivanko, A. I. & Marzhiievskiy, R. V. (2012). Konstruktsiia prystroiu dlia bezupynnoho obrizuvannia arkushevoho materialu v potokovykh liniiah [The design of a device for nonstop trimming of sheet material in production lines]. *Journal of Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, 3(37), 109–113. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(37\).2012.32406](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(37).2012.32406) [in Ukrainian].
10. Ivanko, A. I. & Marzhiievskiy, R. V. *Prystrii dlia bezupynnoho obrizuvannia arkushevoho materialu v potokovykh liniiah [Device for continuous cutting of sheet material in production lines]* // Patent № 80303. Publish 27.05.2013 [in Ukrainian].
11. Ivanko, A. I. & Panov, S. L. & Marzhiievskiy, R. V. (2014). Kinematychni ta dynamichni parametry prystroiu dlia obrizuvannia arkushevoho materialu [Kinematic and dynamic parameters of the device for trimming sheet material]. *Journal of Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, 2(44), 103–111. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(44\).2014.31834](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(44).2014.31834) [in Ukrainian].
12. Havenko, S. F. & Zadra, V. M. (2002). Otsiniuvannia yakosti vykonannia operatsii rizannia pry vyhotovlenni kartonnykh vyrobiv [Evaluation of the quality of the cutting operation in the manufacture of cardboard products]. *Journal of Polihrafiia i vydavnycha sprava*, 38, 25–28 [in Ukrainian].
13. Ivanko, A. I. & Chepurna, K. O. & Makhynych, K. O. (2013). Vplyv tekhnolohichnykh protsesiv rizannia arkushevykh materialiv na yakisni kharakterystyky produktsii [Influence of technological processes of cutting sheet materials on high-quality descriptions of products]. *Journal of Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, 1(39), 28–39. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(39\).2013.31041](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(39).2013.31041) [in Ukrainian].



14. Ivanko, A. I. & Marchenko, O. S. (2016). Obrizuvannia arkushevykh materialiv u pnevmatychnykh transportovalnykh systemakh [Cutting of Sheet Materials in Pneumatic Conveying Systems]. *Journal of Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, 2(52), 72–78. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(52\).2016.71012](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(52).2016.71012) [in Ukrainian].

15. Ivanko, A. I. & Marchenko, O. S. (2017). Method of sheet material trimming without using counter-knife. *Journal of Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, 3(57), 36–42. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.3\(57\).2017.115462](https://doi.org/10.20535/2077-7264.3(57).2017.115462) [in English].

16. Ivanko, A. (2017). Cardboard sheet cutting with air-operated conveying devices using. *Journal of International research and practice conference 'Modern methods, innovations, and experience of practical application in the field of technical sciences'*, 116–119 [in English].

17. Ivanko, A. I. (2017). Bezmarzanniy sposib obrizuvannia arkushevykh materialiv u potokovykh liniakh [Non-freezing method of cutting sheet materials in production lines]. *Journal of XXV Mizhnarod. nauk.-prakt. konf. z probl. vyd.-polih. haluzi*, 40–41 [in Ukrainian].

18. Ivanko, A. I. *Prystrii dlia obrizuvannia arkushevoho materialu [Device for trimming sheet material]*. Patent № 123600. Publish 26.02.2018 [in Ukrainian].

19. Ivanko, A. & Marchenko, O. (2018). Pneumatic transportation systems of sheet material. *Journal of VII International scientific conference 'Advanced technologies in mechanical engineering'*, 5–17 [in English].

20. Ivanko, A. I. & Pidvyshenna, O.V. (2019). Use of pneumatic devices for manufacturing cardboard reamers. *Journal of International scientific and practical conference 'Science, engineering and technology: global and current trends'*, 120–122 [in English].

21. Ivanko, A. Rotary die cutting of cardboard sweep by using pneumatics. *Journal of Printtekhologii i mediakommunikatsii: materialy 84-y nauch.-tekh. konf. professorsko-prepod. sostava, nauchn. sotr. i asp.*, 59–61 [in English].

The article conducted a computer simulation in SolidWorks environment of the air flow process in the chamber of a rotary die cutting module.

Keywords: cardboard blank; sheet material; conveyor belt; compressed air; air stream; air flow.

Рецензент — Я. В. Зоренко, канд. техн. наук,
доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції 19.06.20