

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 678.027:532.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2026.3.2/01>**Подиман Г.С.**<https://orcid.org/0000-0002-4102-5656>

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЦИРКУЛЯЦІЯ ПОВІТРЯ ВСЕРЕДИНИ ПОЛІМЕРНОЇ ТРУБИ ПІД ЧАС КАЛІБРУВАННЯ

У роботі розглянуто процес циркуляції повітря всередині полімерної труби під час її проходження через вакуумно-калібрувальний пристрій екструзійної лінії, коли внутрішня поверхня труби здійснює поступальний рух відносно повітря в її об'ємі. На основі рівнянь нерозривності та руху сформульовано аналітичну модель усталеної ламінарної течії повітря, зумовленої поєднанням зсувного руху стінки труби та малої різниці тиску між вхідним і вихідним перерізами. Модель враховує суперпозицію двох зустрічних осесиметричних потоків, що дозволяє описати циркуляцію повітря та вплив градієнта тиску вздовж осі труби.

На основі розв'язання відповідних рівнянь визначено розподіли осьової швидкості повітря по радіусу, характерні значення швидкості в центральній і пристінковій зонах, а також залежності цих параметрів від числа Рейнольдса та геометричних характеристик системи. Обчислено об'ємні та масові витрати повітря у протилежно спрямованих потоках, що дозволило оцінити інтенсивність циркуляції при зміні швидкості витягування труби та розмірів калібрувальної ділянки. Показано, що для типових умов екструзії перепад тиску вздовж труби становить кілька паскалів, що свідчить про незначний вплив внутрішньої циркуляції на гідродинамічні втрати.

Оцінено вплив внутрішнього газового потоку на теплообмін між полімерною заготовкою та повітрям. Порівняння характерних швидкостей і коефіцієнтів тепловіддачі показує, що інтенсивність охолодження внутрішньої поверхні труби практично не змінюється, тоді як основний теплообмін визначається зовнішнім охолодженням. Отримані результати можуть бути використані для інженерної оцінки процесів калібрування та оптимізації режимів екструзії без застосування складного чисельного моделювання.

Ключові слова: екструзія полімерних труб, калібрування, циркуляція повітря, ламінарна течія, зсувна течія, перепад тиску, теплообмін.

Постановка проблеми. Процес калібрування полімерних труб є однією з ключових стадій екструзії при виробництві полімерних труб. Він безпосередньо визначає точність геометричних параметрів виробу, стабільність товщини стінки та якість поверхні готової продукції. У промислових умовах калібрування здійснюється за рахунок зовнішнього охолодження та вакуумування, тоді як внутрішній об'єм труби, як правило, заповнений повітрям і вважається таким, що не впливає істотно на перебіг процесу.

Під час руху трубної заготовки через калібратор внутрішня поверхня труби взаємодіє з газовим середовищем (повітрям), створюючи зсувні напруження, які можуть ініціювати осьову течію

повітря. Додатковим чинником є можливий перепад тиску між вхідною зоною, обмеженою дорном екструзійної головки, та вихідним перерізом труби, сполученим з навколишнім середовищем. Сукупна дія цих факторів здатна призводити до формування замкненої циркуляції повітря у внутрішньому об'ємі труби.

Наявність внутрішньої циркуляції повітря зумовлює виникнення зсувної течії вздовж внутрішньої поверхні трубної заготовки, що змінює локальні умови конвективного теплообміну між полімером і газовим середовищем. За певних геометричних і режимних параметрів це може призводити до відхилень у швидкості охолодження та релаксації напружень, що вимагає кількісної



оцінки впливу внутрішнього повітряного потоку на процес калібрування. У зв'язку з цим постає науково-практична проблема кількісної оцінки інтенсивності внутрішньої циркуляції повітря та визначення доцільності її врахування при розрахунках параметрів процесу калібрування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процеси екструзії та калібрування полімерних труб широко висвітлені у фундаментальних працях з технології переробки полімерів, де основну увагу приділено реологічним властивостям розплаву, механіці течії в формувальному інструменті та теплообміну на зовнішній поверхні виробу [1, с. 235-300; 2, с. 120-180; 3, с. 200-260; 5, с. 180-240]. У зазначених роботах внутрішній газовий об'єм труби зазвичай розглядається як пасивне середовище, що не чинить помітного впливу на теплові та гідродинамічні процеси.

У сучасних дослідженнях з моделювання процесів екструзії значна увага приділяється числовим методам аналізу течії полімерного розплаву та теплообміну, зокрема із застосуванням CFD-підходів [6]. Проте такі моделі орієнтовані переважно на опис поведінки в'язкопластичних матеріалів і не охоплюють детально газодинамічні процеси у внутрішніх порожнинах виробів.

Дослідження з механіки рідин і газів із рухомими межами описують ламінарні зсувні течії в каналах та трубах за наявності градієнта тиску [3, с. 200-260; 4, с. 100-160]. Водночас результати цих робіт мають узагальнений характер і не адаптовані безпосередньо до специфічних умов калібрування полімерних труб, де поєднуються малі швидкості, низькі перепади тиску та змінна температура поверхні.

Окремі сучасні публікації присвячені аналізу багатопарової коекструзії труб та особливостей формування їхньої структури [7, с. 64-72], однак внутрішня аеродинаміка виробу в них не розглядається.

Дослідження безпосередньо розвиває результати попередньої роботи [8, с. 75-77], присвяченої циркуляції повітря всередині труби під час калібрування, де показано що падіння тиску незначне і становить лише кілька Паскаль. У даній статті цей підхід узагальнено: уточнено постановку задачі, отримано повний аналітичний розв'язок для поля швидкостей, витрат повітря та перепаду тиску, а також проведено оцінку впливу внутрішнього потоку на теплові умови охолодження заготовки.

Таким чином, невирішеною частиною наукової проблеми залишалася побудова аналітичної моделі циркуляції повітря у внутрішньому об'ємі полімерної труби під час калібрування та кількісна оцінка впливу цієї циркуляції на технологічні параметри процесу.

Постановка завдання. Мета даного дослідження полягає у отриманні аналітичних залежностей для опису стаціонарної ламінарної циркуляції повітря у внутрішньому об'ємі полімерної труби під час калібрування, визначенні швидкісних профілів, витрат повітря та перепаду тиску, а також у кількісній оцінці впливу цих процесів на технологічні умови охолодження трубної заготовки.

Наукова новизна роботи полягає у вперше виконаному аналітичному описі циркуляційної течії повітря у внутрішньому об'ємі рухомої полімерної труби під час калібрування з урахуванням спільної дії зсувних напружень з боку внутрішньої поверхні труби за малих градієнтів тиску. Отримані результати дозволяють без застосування числового моделювання оцінити інтенсивність внутрішньої циркуляції та обґрунтувати умови, за яких вона потребує врахування при визначенні режимів калібрування.

Виклад основного матеріалу. Постановка задачі. Розглядається полімерна труба циліндричної форми, яка зі сталою швидкістю переміщується вздовж осі калібрування. Внутрішній об'єм труби збоку екструзійної головки обмежений торцевою поверхнею дорна, тоді як на виході труба сполучена з навколишнім середовищем. За таких умов тиск повітря на вихідному перерізі дорівнює атмосферному, тоді як у зоні контакту з дорном він може відрізнитися від нього.

Унаслідок руху труби шар повітря, що безпосередньо прилягає до її внутрішньої поверхні, втягується у рух за рахунок в'язкого зчеплення зі стінкою та переміщується у напрямку виходу з калібрування. Для забезпечення балансу маси в центральній частині труби формується зустрічний потік холоднішого повітря, спрямований у бік дорна. Таким чином, у внутрішньому об'ємі труби виникає замкнена циркуляційна течія. Розрахункова схема циркуляції повітря у внутрішньому об'ємі труби, що рухається зі сталою швидкістю під час калібрування, наведена на рис. 1.

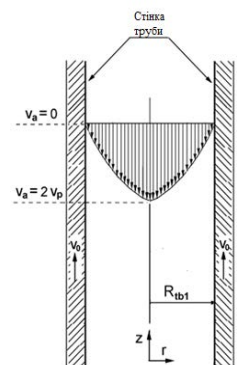


Рис. 1. Розрахункова схема циркуляції повітря відносно рухомої полімерної труби

Конструктивні обмеження та їх опис. Розглядається типова конструкція вакуумно-калібрувального пристрою для екструзії полімерних труб із внутрішнім діаметром порядку десятків міліметрів, де довжина калібрувальної ділянки порядку десятків діаметрів труби. Припускається, що геометричні параметри калібратора залишаються сталими вздовж осі, а довжина зони циркуляції достатньо велика, порівняно з діаметром, щоб знехтувати входними ефектами та вважати течію квазірозвиненою.

Математична модель. Аналіз циркуляції повітря проводиться в циліндричній системі координат, вісь якої співпадає з віссю труби. Рух повітря вважається стаціонарним, ламінарним і вісесиметричним. Повітря розглядається як ньютонівське в'язке середовище з нехтвною стисливістю; густина та динамічна в'язкість вважаються сталими в межах досліджуваного інтервалу температур і тисків.

Унаслідок руху труби зі швидкістю v_{mp} у пристінковій зоні формується зсувна течія, спрямована до вихідного перерізу. Для забезпечення балансу маси в центральній частині труби виникає зустрічний потік повітря, зумовлений різницею тисків Δp між вхідним і вихідним перерізами.

Оскільки рух відбувається лише вздовж осі труби, рівняння балансу сил для осьової складової швидкості $v_z(r)$ має вигляд, що відповідає осьовій компоненті рівняння Нав'є-Стокса для стаціонарної осесиметричної течії в циліндричних координатах:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{d}{dr}(r \cdot \tau_{rz}) = \frac{dp}{dz}; \quad (1)$$

де τ_{rz} – дотичне напруження зсуву.

З урахуванням ньютонівського закону в'язкості

$$\tau_{rz} = \mu \cdot \frac{dv_z}{dr}; \quad (2)$$

одержуємо диференціальне рівняння

$$\left(\frac{dv_z}{dr}\right) = \frac{1}{\mu} \frac{dp}{dz}; \quad (3)$$

Інтегрування цього рівняння з урахуванням прийнятих граничних умов дає загальний вигляд розподілу осьової швидкості. При цьому використовуються такі граничні умови:

– на осі труби виконується умова обмеженості швидкості:

$$\left.\frac{dv_z}{dr}\right|_{r=0} = 0; \quad (4)$$

– на внутрішній поверхні труби задається умова прилипання:

$$v(R) = v_T; \quad (5)$$

– на границі центрального і пристінкового потоків забезпечується неперервність швидкості та зсувних напружень.

Інтегрування отриманого диференціального рівняння з урахуванням наведених граничних умов дає аналітичний вираз для розподілу осьової швидкості повітря по радіусу труби. У загальному вигляді профіль швидкості може бути поданий як суперпозиція зсувної та напірної складових:

$$\vartheta_z(r) = \vartheta_{mp} \left(1 - \frac{r}{R_T}\right) - \frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dz} (R_T^2 - r^2); \quad (6)$$

де ϑ_{mp} – швидкість поступального руху труби, R_T – внутрішній радіус труби, μ – динамічна в'язкість повітря, $\frac{dp}{dz}$ – осьовий градієнт тиску.

Отриманий вираз описує розподіл швидкості повітря в радіальному напрямку та дозволяє визначити об'ємні і масові витрати повітря в центральній і пристінковій зонах течії.

Середня об'ємна витрата повітря в центральній частині потоку визначається за рівнянням Пуазейля, яке в даному випадку використовується як аналітична оцінка для ламінарної осьової течії в циліндричному каналі та дозволяє встановити порядок величини витрати і перепаду тиску:

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\mu} \cdot \frac{\Delta p}{L}; \quad (7)$$

де R – характерний радіус зони течії, L – довжина труби.

Аналогічні залежності справедливі й для пристінкового потоку з урахуванням руху обмежувальної поверхні.

Оцінка характеру режиму течії. Для підтвердження припущення про ламінарний режим течії виконано оцінку числа Рейнольдса, визначеного за характерною швидкістю повітря та внутрішнім діаметром труби. За умов, характерних для промислової екструзії полімерних труб середніх діаметрів, швидкість витягування трубної заготовки становить 0,1–0,5 м/с, внутрішній радіус труби – 10–50 мм, а довжина калібрувальної ділянки – 0,3–1,0 м [1–3].

Число Рейнольдса не перевищує значень $Re \approx 10^2$, що значно нижче критичних значень для переходу до турбулентного режиму.

Таким чином, прийнята модель ламінарної течії фізично обґрунтована. Це дозволяє використовувати аналітичний підхід без залучення складних числових методів.

Отримана аналітична модель використовується для послідовного розрахунку поля осьо-

вих швидкостей повітря, об'ємних і масових витрат у зустрічно спрямованих потоках, а також перепаду тиску вздовж калібрувальної ділянки. Подальша оцінка числа Рейнольдса та питомих теплових потоків дозволяє встановити режим течії та кількісно визначити внесок внутрішньої циркуляції у загальний тепловий баланс процесу калібрування.

Межі застосовності моделі. Побудована аналітична модель внутрішньої циркуляції повітря базується на низці фізичних припущень, які визначають межі її коректного застосування. Насамперед модель справедлива для ламінарного режиму течії, що реалізується за малих значень числа Рейнольдса, характерних для процесів калібрування полімерних труб при промислових швидкостях витягування.

Зі збільшенням швидкості руху труби або внутрішнього діаметра можливе зростання числа Рейнольдса до значень, за яких ламінарний режим може порушуватися. У таких випадках для адекватного опису течії необхідно враховувати турбулентні ефекти.

Також у моделі знехтувано стисливість повітря, що допустимо за умови малих швидкостей газового потоку та незначних перепадів тиску. За наявності значних осьових градієнтів тиску або за високих швидкостей руху труби може виникати потреба в урахуванні змін густини газу.

Запропонована аналітична модель описує динаміку газового середовища у внутрішньому об'ємі труби, а тому є не залежною від конкретного типу термопласту. Разом з тим вона орієнтована на типові температурні та швидкісні режими екструзії труб з поліетилену, поліпропілену та інших поширених термопластів, за яких реалізується ламінарний режим течії повітря, малі перепади тиску та відсутні значні осьові варіації геометрії калібрувальної ділянки.

Слід підкреслити, що запропонована модель не призначена для прямого заміщення детальних числових розрахунків або експериментальних досліджень у всьому діапазоні можливих режимів. Її основне призначення полягає у встановленні кількісних критеріїв, за яких вплив внутрішньої циркуляції повітря на гідродинамічні та теплові умови калібрування можна вважати несуттєвим, а також у визначенні граничних режимів, за яких це припущення може бути порушене і потребує більш детального аналізу.

Виклад основного матеріалу. Отримані аналітичні залежності для розподілу осьової швидкості повітря в радіальному напрямку дозволяють

детально охарактеризувати структуру внутрішньої циркуляційної течії. У пристінковій зоні формується потік, спрямований у бік виходу з калібруатора, інтенсивність якого визначається швидкістю поступального руху труби. У центральній частині внутрішнього об'єму при цьому виникає зустрічний потік, зумовлений забезпеченням балансу маси.

На основі інтегрування функцій, які описують профілі швидкостей, визначено об'ємні та масові витрати повітря для обох потоків. З умови рівності масових витрат встановлено положення межі між центральною та пристінковою зонами течії. Показано, що зі збільшенням швидкості руху труби межа потоків зміщується в осьовому напрямку, що свідчить про зростання ролі зсувної течії у формуванні загальної циркуляції.

Границю між центральним та пристінковим потоками визначено з умови балансу масових витрат у протилежних напрямках. Сумарна масова витрата повітря, що переноситься пристінковим потоком у напрямку вихідного перерізу труби, дорівнює масовій витраті центрального потоку, спрямованого у бік дорна, що забезпечує відсутність накопичення повітря в будь-якій ділянці внутрішнього об'єму труби.

$$m_{\text{центр}} + m_{\text{прист}} = 0, \quad (8)$$

де $m_{\text{центр}}$ – масова витрата центрального потоку, $m_{\text{прист}}$ – масова витрата пристінкового потоку.

Оцінка перепаду тиску вздовж труби показує, що його величина не перевищує одиниць Паскаль навіть за відносно високих швидкостей витягування. Це узгоджується з малими значеннями числа Рейнольдса та підтверджує ламінарний характер течії повітря. Збільшення довжини калібрувальної ділянки призводить до пропорційного зростання витрат тиску, однак і в цьому випадку їх абсолютні значення залишаються незначними.

Окрім газодинамічних характеристик, важливе питання можливого впливу внутрішньої циркуляції повітря на теплові умови охолодження трубної заготовки. Для цього доцільно виконати масштабну оцінку теплового потоку, що передається від внутрішньої поверхні труби до повітря.

За ламінарного режиму течії та малих швидкостей руху повітря коефіцієнт тепловіддачі з боку газового середовища має невеликі значення, характерні для природної або слабкої примусової конвекції. Відповідний питомий тепловий потік від внутрішньої поверхні труби до повітря на кілька порядків менший, порівняно з тепловіддачею до охолоджувального середовища з зовнішнього боку труби. Наприклад, для швидкостей

повітря порядку 0,01–0,1 м/с коефіцієнт тепловіддачі становить приблизно 5–10 Вт/(м²·К)

Таким чином, навіть за наявності циркуляційної течії повітря її внесок у загальний тепловий баланс процесу калібрування незначний. Основний вплив на інтенсивність охолодження трубної заготовки визначається умовами зовнішнього теплообміну, тоді як внутрішнє газове середовище відіграє другорядну роль.

Отриманий результат узгоджується з практичними спостереженнями стабільності процесу калібрування та підтверджує можливість ігнорування внутрішньої циркуляції повітря при інженерних теплових розрахунках.

Для ілюстрації впливу основних технологічних параметрів у табл. 1 наведено розрахункові оціночні значення швидкостей руху труби, числа Рейнольдса, перепаду тиску та об'ємної витрати повітря.

Таблиця 1

Оціночні параметри внутрішньої циркуляції повітря

Швидкість труби, м/с	Діаметр труби, мм	Re	Δp , Па	Q, м ³ /с
0,05	50	35	0,3	$5 \cdot 10^{-4}$
0,10	50	70	0,6	$9 \cdot 10^{-4}$
0,15	50	105	0,9	$1,3 \cdot 10^{-3}$

Як видно з наведених у табл. 1 даних, зі збільшенням швидкості руху труби число Рейнольдса зростає пропорційно, однак залишається на рівні, який істотно нижчий за критичні значення для переходу до турбулентного режиму.

Перепад тиску вздовж труби також зростає зі збільшенням швидкості, проте навіть за максимальних розглянутих режимів його величина не перевищує одиниць Паскаль. Відповідні об'ємні витрати повітря залишаються малими порівняно з витратами охолоджувальної води, що забезпечує відсутність помітного впливу внутрішньої циркуляції на гідравлічні характеристики калібрувальної системи загалом.

Порівняльний аналіз отриманих результатів із характерними тепловими потоками під час охолодження трубної заготовки, наведеними у [4], дозволяє зробити висновок, що внутрішня циркуляція повітря практично не впливає на інтенсивність тепловідведення. Таким чином, у більшості інженерних розрахунків процесу калібрування вплив внутрішнього газового середовища може бути знехтуваний без істотної втрати точності.

Для наочного порівняння інтенсивності теплообміну в табл. 2 наведено орієнтовні значення

питомих теплових потоків для внутрішньої та зовнішньої поверхонь трубної заготовки під час калібрування.

Оцінки питомих теплових потоків від внутрішньої поверхні труби до повітря та до зовнішнього охолоджувального середовища наведено для характерних температурних. При цьому передбачається ламінарний режим руху повітря, малі осьові градієнти тиску та типові різниці температур між розплавом і охолоджувальною водою, що відповідають рекомендованим технологічним режимам для термопластичних матеріалів. За таких умов питомий тепловий потік до повітря виявляється на два–три порядки меншим порівняно з тепловіддачею до води, що й обґрунтовує другорядну роль внутрішньої циркуляції у загальному тепловому балансі процесу калібрування.

Для кількісної оцінки виконано масштабну оцінку питомих теплових потоків від внутрішньої поверхні труби до повітря та до зовнішнього водяного середовища.

Таблиця 2

Порівняння питомих теплових потоків під час калібрування труби

Джерело теплообміну	Орієнтовний питомий тепловий потік, Вт/м ²
Повітря всередині труби	10^1
Охолоджувальна вода в калібраторі	$10^3\text{--}10^4$

Наведені дані свідчать, що тепловий потік від внутрішньої поверхні труби до повітря на два–три порядки менший, ніж тепловіддача до охолоджувальної води з зовнішнього боку. Це підтверджує зроблений висновок про незначний вплив внутрішньої циркуляції повітря на загальну інтенсивність охолодження трубної заготовки.

Таким чином, запропонована аналітична модель може бути використана на етапі інженерного аналізу для швидкої оцінки доцільності врахування внутрішньої циркуляції повітря в розрахунках процесу калібрування. У випадках, коли розрахункові значення числа Рейнольдса та питомих теплових потоків відповідають наведеним у роботі оцінкам, вплив внутрішнього газового потоку може бути обґрунтовано знехтуваний. За виходу параметрів за ці межі модель слугує базою для постановки розширених числових або експериментальних досліджень.

Практичні рекомендації. Отримані результати дозволяють сформулювати прості критерії практичного застосування аналітичної моделі. Встановлення умов, за яких внутрішня циркуля-

ція повітря не чинить суттєвого впливу на тепловий стан трубної заготовки, є необхідним етапом обґрунтування застосовності спрощених інженерних моделей. Отримані оцінки числа Рейнольдса та перепаду тиску не зменшують актуальності дослідження, а, навпаки, дозволяють кількісно окреслити межі режимів, у яких вплив газового середовища може бути обґрунтовано знехтуваним. У такому разі при інженерних розрахунках процесу охолодження доцільно зосередитися на зовнішньому водяному теплообміні, використовуючи внутрішню циркуляцію лише для перевірки коректності прийнятих спрощень. Для попередніх оцінок рекомендується орієнтуватися на наведені в роботі таблиці, які задають типові рівні швидкостей, чисел Рейнольдса, перепадів тиску та об'ємних витрат повітря для реальних промислових режимів екструзії полімерних труб.

Висновки

1. У процесі калібрування полімерних труб у їхньому внутрішньому об'ємі формується стаціонарна ламінарна циркуляційна течія повітря, зумовлена рухом труби та наявністю малого перепаду тиску між вхідним і вихідним перерізами.

2. Аналітичні розрахунки показали, що за характерних геометричних і режимних параметрів вакуумного калібрування полімерних труб перепад тиску повітря вздовж внутрішнього об'єму становить лише кілька Паскаль, а об'єми циркулюючого повітря порівняно малі.

3. Розрахунковий перепад тиску вздовж труби не перевищує одиниць Паскаль, що свідчить про низьку інтенсивність газодинамічних процесів у внутрішньому об'ємі виробу.

4. Встановлено, що за наведених умов внесок внутрішньої конвекції повітря у загальний процес відведення теплоти від полімерної заготовки незначний, тому інтенсивність охолодження визначається переважно зовнішнім водяним охолодженням і параметрами контакту труби з калібратором.

5. Отримані аналітичні вирази для розподілу швидкостей, витрат і перепаду тиску можуть бути використані як спрощений інженерний інструмент для попереднього проектування калібрувальних ділянок без залучення повномасштабного комп'ютерного моделювання.

Перспективи подальших досліджень.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення моделі з урахуванням теплопереносу між внутрішньою поверхнею труби та газовим середовищем, а також нестационарних режимів роботи екструзійної лінії. Окремий інтерес становить числова валідація отриманих аналітичних залежностей із використанням комп'ютерного моделювання та їх експериментальна перевірка на промисловому обладнанні, зокрема для труб великого діаметра та підвищених швидкостей калібрування.

Перспективний напрям полягає у розширенні моделі на випадки нестационарних режимів витягування труби, коли швидкість руху може мати пульсації або повільні коливання в часі. Це дозволить оцінити вплив динамічних змін режиму на структуру внутрішньої циркуляції та на стійкість процесу калібрування. Окремий інтерес становить адаптація підходу до коекструзії багатошарових труб, у яких внутрішній діаметр та теплові умови можуть істотно відрізнятися від одношарових систем, а також аналіз впливу змінної товщини стінки уздовж довжини виробу.

Список літератури:

1. Tadmor Z., Gogos C.G. *Principles of Polymer Processing*. Wiley, 2006. 984 p.
2. White J.L. *Polymer Extrusion*. Hanser, 1990. 456 p.
3. Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N. *Transport Phenomena*. Wiley, 2002. 905p.
4. Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavine A.S. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley, 2011. 1072 p.
5. Osswald T.A., Hernández-Ortiz J.P. *Polymer Processing*. Hanser, 2006. 338 p.
6. Hyvärinen M., Jabeen R., Kärki T. The modelling of extrusion processes for polymers: A review. *Polymers*. 2020. Vol. 12, No. 6. Article 1306. <https://doi.org/10.3390/polym12061306>
7. Hurin R., Gondliakh A., Sokolskyi O. Research of double-layer polymer pipes coextrusion process. *Mech. Adv. Technol.* 2025. Vol. 9, No. 1(104). Pp. 64–72. [https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.1\(104\).313378](https://doi.org/10.20535/2521-1943.2025.9.1(104).313378)
8. Подиман Г.С. Циркуляція повітря всередині труби під час калібрування. *Збірник тез доповідей XXII міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання»* (24–26 травня 2022 р., м. Київ). К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. С. 75–77.

Podyman H.S. AIR CIRCULATION INSIDE A POLYMER PIPE DURING CALIBRATION

The paper considers the process of air circulation inside a polymer pipe during its passage through a vacuum calibration unit of an extrusion line, where the inner surface of the pipe moves translationally relative

to the air within its volume. Based on the continuity and momentum equations, an analytical model of steady laminar airflow is formulated, caused by the combined effect of wall shear due to pipe motion and a small pressure difference between the inlet and outlet sections. The model accounts for the superposition of two oppositely directed axisymmetric flows, allowing the description of air circulation and the influence of the axial pressure gradient.

Based on the solution of the governing equations, the radial distribution of axial air velocity, characteristic velocity values in the core and near-wall regions, and their dependence on the Reynolds number and geometric parameters are determined. The volumetric and mass flow rates of air in the oppositely directed streams are calculated, enabling the evaluation of circulation intensity under varying pipe drawing speeds and calibration zone dimensions. It is shown that under typical extrusion conditions, the pressure drop along the pipe is only a few pascals, indicating a negligible effect of internal circulation on hydraulic losses.

The influence of internal airflow on heat transfer between the polymer melt and the air is also evaluated. A comparison of characteristic velocities and heat transfer coefficients shows that the cooling intensity of the inner pipe surface remains practically unchanged, while the main heat removal is governed by external cooling. The obtained results can be used for engineering assessment of calibration processes and optimization of extrusion regimes without the need for detailed numerical simulations.

Keywords: polymer pipe extrusion, calibration, air circulation, laminar flow, shear-driven flow, pressure drop, heat transfer.

Дата першого надходження статті до видання: 23.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 20.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 19.05.2026