

УДК [678.057.3:621.774.38]-027.28(048.83)

МІКУЛЬОНОК І. О., КАРВАЦЬКИЙ А. Я., ІВАНЕНКО О. І.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕКСТРУЗІЙНІ ГОЛОВКИ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ОДНОКАНАЛЬНИХ ГЛАДКИХ ПОЛІМЕРНИХ ТРУБ (Огляд конструкцій)

Проведені дослідження стану питання й тенденцій розвитку конструктивно-технологічного оформлення екструзійних головок для формування одноканальних гладких полімерних труб ґрунтуються на критичному аналізі науково-технічних джерел інформації й передусім – патентної інформації провідних країн світу. Систематизовано конструкції екструзійних головок для формування гладких полімерних труб різного призначення. Для кожного виду головок розроблено ґрунтовну класифікацію, на основі якої докладно розглянуто найбільш цікаві конструкції, запропоновані науковцями, конструкторами й винахідниками провідних країн світу. Надано критичну оцінку більшості наведених конструкцій, обговорено їхні переваги й недоліки. Показано, що, незважаючи на значну різноманітність конструкцій трубних екструзійних головок, найбільш затребуваними промисловістю залишаються апробовані впродовж тривалого часу достатньо прості у виготовленні та експлуатації прямі трубні головки з робочим каналом фіксованої геометрії. Проте завдяки успіхам матеріалознавства та комп'ютерного моделювання пошуку нових конструкцій трубних екструзійних головок тривають.

Ключові слова: полімерні труби, екструзія, формувальні головки, класифікація, конструкція.

DOI: 10.20535/2617-9741.4.2023.294324

*Corresponding author: i.mikulionok@kpi.ua

Received 07 January 2023; Accepted 15 February 2023

Постановка проблеми

На початку третього тисячоліття намітилася стійка тенденція до широкого впровадження в хімічній, харчовій, нафтохімічній, нафтопереробній, теплоенергетичній та інших галузях промисловості й побуті полімерних труб і поступової заміни ними в багатьох випадках металевих і залізобетонних труб. Серед полімерних труб найбільшого поширення набули одержувані екструзією одноканальні гладкі труби діаметром до 1200 мм і з товщиною стінки до 70 мм з таких термопластичних полімерів як поліетилен, поліпропілен і полівінілхлорид, які характеризуються високими експлуатаційними характеристиками [1–3]. При цьому зазначені полімери можуть використовуватися як у чистому вигляді, так і в складі полімерних композиційних матеріалів [4–10].

Під час виготовлення полімерних труб екструзійним методом (як й інших профільних виробів і матеріалів [11]) особлива увага приділяється екструзійним головкам для формування труб [12–14]. Від конструкції головки значною мірою залежать форма, розмірна точність, фізико-механічні властивості одержуваних труб, а також продуктивність технологічної лінії [15–19].

Також потрібно зазначити, що ефективну експлуатацію екструзійної головки не можна розглядати у відриві від іншого обладнання та пристроїв трубної технологічної лінії, зокрема екструдера, а також калібрувального та охолоджувальних пристроїв, які безпосередньо впливають на продуктивність лінії, якість підготовки розплаву, а також наявність і величину пульсації потоку [20–22].

Метою статті є розроблення розгорнутої класифікації екструзійних головок для формування одноканальних гладких полімерних труб і надання рекомендацій стосовно доцільності застосування наявних конструкцій головок або того чи іншого підходу під час проектування головок нових типів.

Аналіз попередніх досліджень

Основним призначенням трубних головок є забезпечення потрібного розподілу розплаву в робочому каналі та його рівномірного виходу з формувальної щілини для надання трубчастій заготовці визначених форми й розмірів, а також температурної однорідності розплаву. При цьому головка має характеризуватися

як можна меншим гідравлічним опором для зниження енергоємності процесу екструзії, відсутністю застійних зон, забезпечувати рівномірний (за швидкістю, температурою тощо) вихід розплаву вздовж формувальної щілини (фільтри), допустимі температури, швидкість та швидкість зсуву розплаву, зручність обслуговування та ремонту [13, 23].

Аналіз конструктивного виконання екструзійних головок для формування одноканальних гладких полімерних труб дає змогу запропонувати їхню класифікацію, наведену на рис. 1.

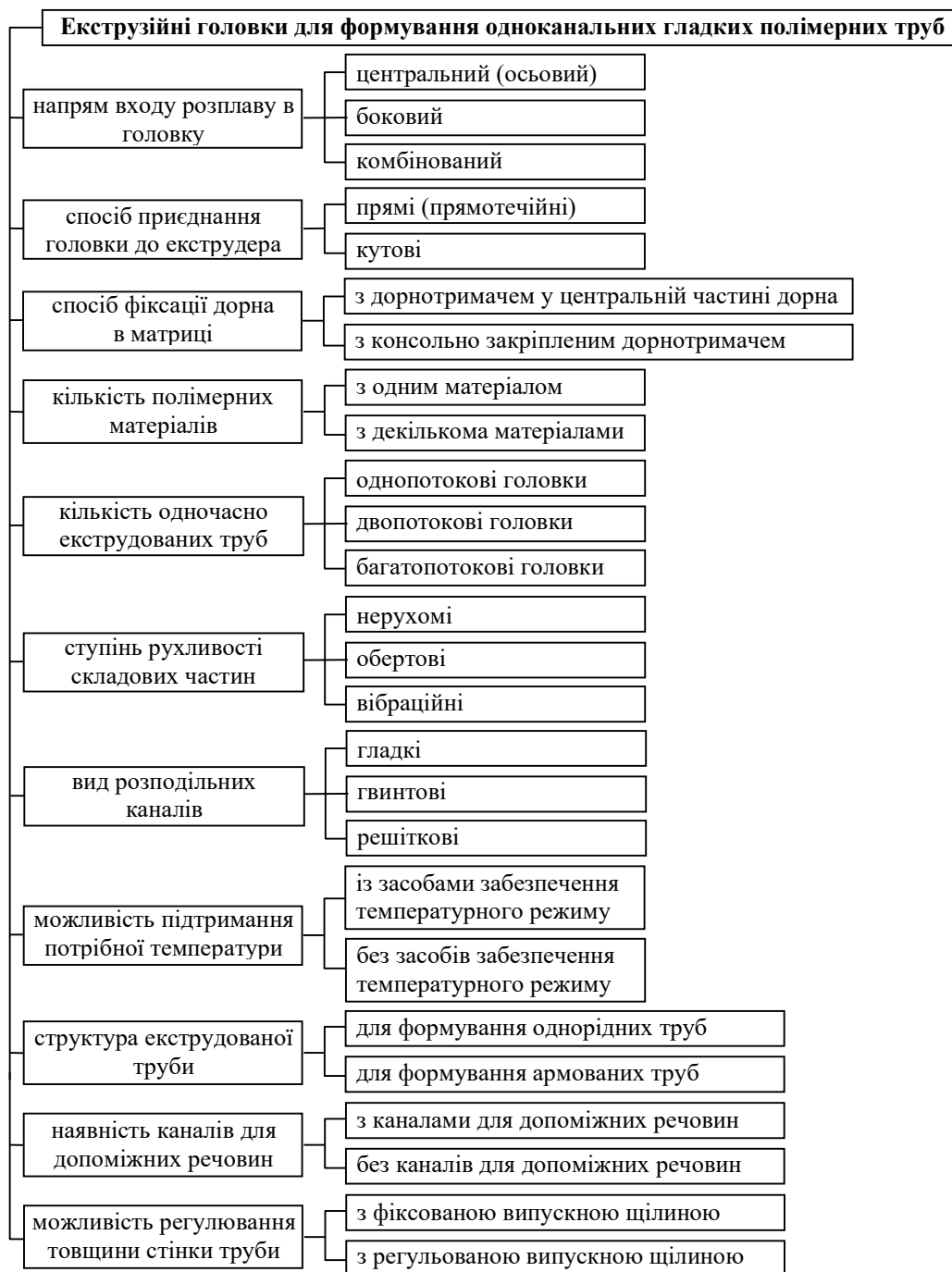


Рис. 1 – Класифікація екструзійних головок для формування одноканальних гладких полімерних труб

За напрямом входу розплаву до головки розрізняють головки з центральним (осьовим), боковим і комбінованим входом розплаву.

Головка з центральним (осьовим) входом розплаву містить канал складної форми, що забезпечує однорідність розплаву в радіальному й коловому напрямках стінки труби (заявка № EP0806279A1).

Головка з центральним (осьовим) входом розплаву забезпечує формування труби з рівномірно розташованими по колу в її стінці отворами (пат. № CN2303720Y). Завдяки одержуваним повітряним каналам у стінці екструдованої труби вона вирізняється високими звуко- та теплоізолювальними властивостями.

Головка з комбінованим входом розплаву застосовується для виготовлення тришарових труб. У такій головці центральний потік розплаву покривається з двох сторін шаром іншого матеріалу, наприклад, внутрішній і зовнішній шари виконують з основного матеріалу (наприклад, ПЕНТ, непластифікований ПВХ), а внутрішній шар зі спіненого або вторинного полімерного матеріалу. Використання тришарових труб дає змогу полегшувати труби, поліпшувати їхні теплоізолювальні властивості та знижувати вартість за рахунок використання вторинних ресурсів [12].

Співекструзійні головки з боковим входом трьох потоків розплавів полімерів призначено для формування тришарової труби (пат. № CN214726299U, заявка № WO95/29051A1; рис. 2, 3).

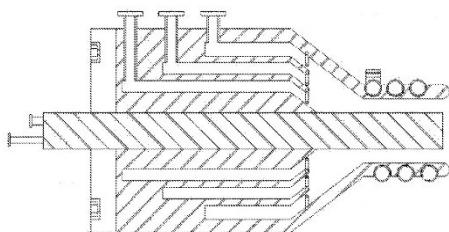


Рис. 2 – Головка для формування тришарової трубчастої заготовки (пат. № CN214726299U)

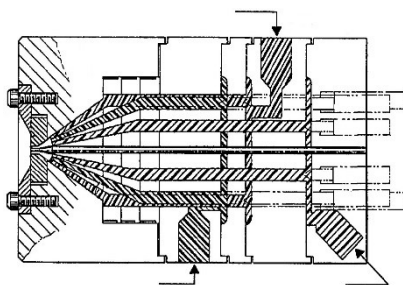


Рис. 3 – Головка для формування тришарової трубчастої заготовки (заявка № WO95/29051A1)

У головці з комбінованим входом розплаву між двома кільцевими шарами полімеру (або різних полімерів) утворюють шар наповнювача з одержанням тришарової гладкої полімерної труби (пат. № US4364882A; рис. 4).

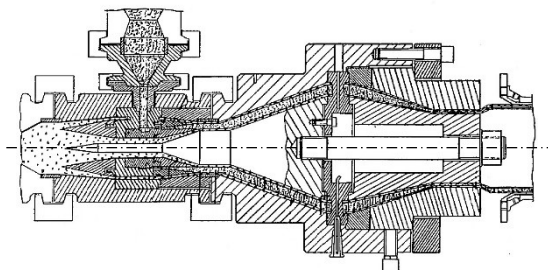


Рис. 4 – Головка для формування тришарової трубчастої заготовки (пат. № US4364882A)

Аналогічна головка з комбінованим входом розплавів двох полімерів дає змогу одержати тришарову трубу з внутрішнім і зовнішнім шарами одного матеріалу й розташованим між ними шаром другого матеріалу (пат. № CN201253946Y; рис. 5).

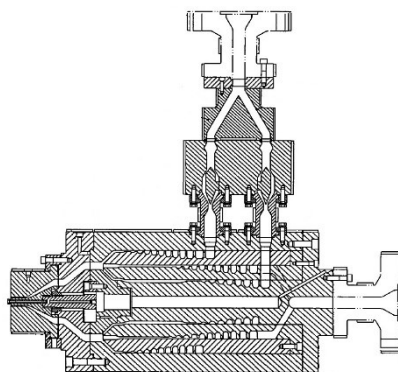


Рис. 5 – Головка для формування тришарової трубчастої заготовки (пат. № CN201253946Y)

Співекструзійну головку з комбінованим входом двох потоків розплавів полімерів для виготовлення тришарової труби: середнім шаром з бокового потоку та внутрішнім і зовнішнім з прямого потоку запропоновано в пат. № CN217670966U.

Головку з комбінованим входом розплавів двох полімерів, подібну до попередньої конструкції, запропоновано також у пат. № JPH01269517A.

В іншій співекструзійній головці з комбінованим входом двох потоків розплавів полімерів зовнішній потік рухається по кільцевому S-подібному каналу в напрямку поздовжньої осі головки, що сприяє поліпшенню однорідності розплаву та якості одержуваної двошарової труби (пат. № CN216708300U).

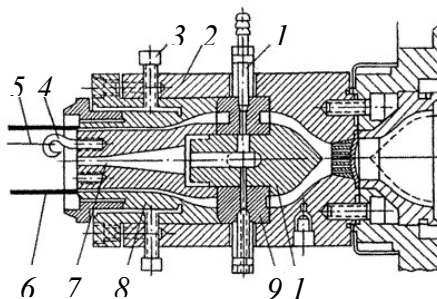
Співекструзійну головку з комбінованим входом двох потоків розплавів полімерів та можливістю регулювання співвідношення значень товщини шарів наведено в а. с. № SU1118537A1.

Також розроблено конструкції головок для формування п'ятишарових труб (пат. № CN103358523A, CN108819172A).

Інші головки з комбінованим входом декількох потоків розплаву (з одного або різних матеріалів), призначені для виготовлення багатошарових гладких полімерних труб, розглянуто в а. с. № SU1570929A1; пат. № DE3704698A1, DE3716884A1, CN114193734A, CN114474668A, CN211165212U, заявки № WO2010/144861A1, US2016/001484A1, US2021/008780A1, EP0279321A2.

За способом прикріплення головки до екструдера розрізняють прямі та кутові головки.

Найбільш поширеним видом трубних головок є прямі (або прямотечіні; рис. 6 [12]).



- 1 – штуцер для підведення стисненого повітря; 2 – корпус; 3 – регулювальні гвинти;
4 – кріпильний пристрій; 5 – трос для втримання ковзних пробок у трубі; 6 – трубна заготовка;
7 – канал для надходження в трубу стисненого повітря; 8 – матриця; 9 – дорнотримач; 10 – дорн

Рис. 6 – Пряма трубна головка (для калібрування труб за допомогою надлишкового тиску в трубі)

Рівнотовщинність екструдованої трубчастої заготовки на виході з головки забезпечують розташованими рівномірно по колу регулювальними гвинтами 3. При цьому для усунення високоеластичних властивостей

розплаву та одержання екструдату з більшою точністю розмірів поперечного перерізу прямотечійну частину головки (на виході розплаву з головки) виконують від 5 до 40 значень товщини трубчастої заготовки (пат. № CN101653983A, CN203779829U, CN203888179U, CN103980527A, CN104139506A, CN104494100A, CN114714590A; рис. 7).

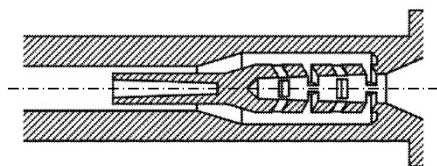


Рис. 7 – Пряма трубна головка з подовженою прямотечійною частиною (пат. № CN114714590A)

Також для спрощення регулювання форми вихідної кільцевої (калібрувальної) щілини головку запропоновано споряджати змонтованим на корпусі за допомогою кульової опори мундштуком, положення якого регулюється скошеними шайбами (пат. № SU1151198A3).

Дорн у корпусі фіксується дорнотримачами, виконаними у вигляді стояків («павукові ноги»), решіток або кілець. Розподіляючи потік розплаву на окремі підпотоки, дорнотримачі часто стають причиною утворення ліній зварювання потоків, які знижують міцність труби, особливо коли полімер характеризується поганою зварюваністю.

Для зниження впливу утворюваних «спайок» стояки дорнотримача виконують розташованими не радіально, а по спіралі (рис. 8).

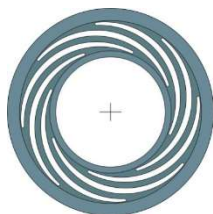


Рис. 8 – Спіральний дорнотримач

Одержані на таких головках високоміцні труби матимуть своєрідну виту структуру, що складається з тонких смуг полімеру [12].

Також для зниження впливу утворюваних «спайок» та відповідно підвищення фізико-механічних властивостей одержуваних труб робочий канал прямої головки виконують багатоступінчастим (пат. № CN202114906U; рис. 9).

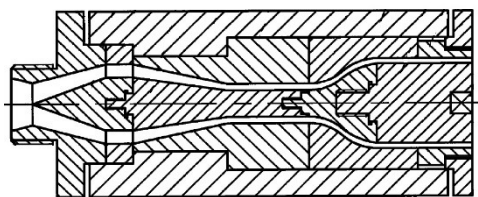


Рис. 9 – Пряма головка з багатоступінчастим робочим каналом (пат. № CN202114906U)

Дорнотримач у вигляді рівномірно розташованих по колу Y-подібних (у поперечному перерізі) стояків (пат. № CN111531844A, CN213006476U). За твердження винахідників зазначена форма стояків зменшує спайність матеріалу стінки екструдованої труби. Головку з двома діаметрально розташованими аналогічними стояками розглянуто в пат. № CN208881142U.

У прямотечійній головці згідно з пат. № US4509907A для зниження впливу утворюваних «спайок» у каналі розміщено втулкоподібну торпеду (або розсікач потоку; рис. 10).

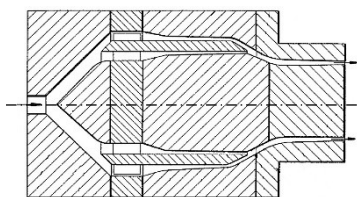


Рис. 10 – Головка з втулкоподібною торпедою в робочому каналі (пат. № US4509907A)

Аналогічні технічні рішення запропоновано в пат. № GB994567A та JPH0216025A.

Головка з втулкоподібною торпедою та рухомих в осьовому напрямку кільцем для часткового перекриття зовнішнього потоку розплаву й можливості регулювання співвідношення витрат потоків по обидва боки торпеди (пат. № DE2010803A1).

У дорнотримачі з боку зовнішньої поверхні корпусу трубної головки запропоновано виконати щонайменше один глухий отвір з розміщеною в ньому вставкою, коефіцієнт теплопровідності матеріалу якої більше за коефіцієнт теплопровідності матеріалу дорнотримача (пат. № UA94625U). Така вставка забезпечує ефективне підведення теплового потоку від нагрівника до дорнотримача. Наприклад, у разі виконання дорнотримача зі сталі марки 12X18H10T (коефіцієнт теплопровідності за температури 150 °С становить 17 Вт/(м·К)), а вставки – з міді марки М1 (390 Вт/(м·К) відповідно), дорнотримач нагрівається більш інтенсивно за тієї самої потужності нагрівника [24, 25]. Це забезпечує підвищену температуру дорнотримача, а отже меншу в'язкість прилеглих до нього шарів розплаву, що сприяє мінімізації спайності потоків розплаву після проходження ним дорнотримача й більш рівномірній структурі термопластичного матеріалу в порожнистому виробі.

У прямих головці лобову частину дорна виконано сферичною, проте така форма дорна збільшує гідравлічний опір головки (пат. № CN212498881U; рис. 11).

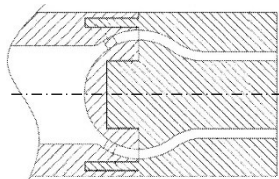


Рис. 11 – Пряма головка зі сферичною лобовою частиною дорна (пат. № CN212498881U)

У кутових головках потік розплаву полімеру повертає на 90° відносно поздовжньої осі екструдера (пат. № US3690806A, FR2140530A1, DE2151295A1, CN104669582A, заявка № WO03/004247A1).

За способом фіксації дорна в матриці розрізняють головки з дорнотримачем, закріпленим у центральній частині, та консольно закріпленим дорнотримачем.

У більшості головках, як це вже було показано, дорнотримач закріплено в матриці і його центральній частині (наприклад, пат. № CN102463662A, CN201889896U, CN202528427U, CN203019652U). Проте розроблено конструкцію головки для формування труб з поліпропілену з консольно закріпленим дорнотримачем, що істотно зменшує появу «спайок» у матеріалі стінки труби (пат. № CN115195072A). У цій головці вільну частину дорна зафіксовано концентрично відносно каналу матриці за допомогою системи електромагнітів (рис. 12).

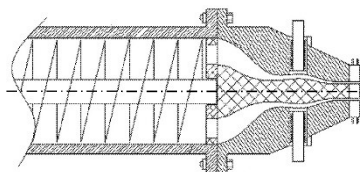


Рис. 12 – Головка з консольно закріпленим дорнотримачем (пат. № CN115195072A)

За кількістю різних потоків розплавів різних матеріалів розрізняють головки з одним і декількома потоками розплавів різних матеріалів.

У пат. № RU2774383C1 розглянуто головку з введенням у виконаний у дорнотримачі отвір другого розплаву іншого полімеру, який формує в стінці одержуваної з потоку основного полімерного матеріалу круглої труби сектора з цього полімеру. У результаті утворюється труба, стінку якої в поперечному перерізі утворено з двох секторів різних полімерів.

За кількістю одночасно екструдованих труб розрізняють одно-, дво- і багатопотокові головки.

Найбільшого поширення, насамперед для формування жорстких труб, набули однопотокові головки. Дво-, три- й чотирипотокові головки з однаковою довжиною каналів для розплаву кожного з потоків, зазвичай застосовують для формування гнучких труб малого діаметра [26].

Двопотокові головки дають змогу формувати одночасно дві однакові труби (пат. № FR2151741A5, CN213108123U; рис. 13).

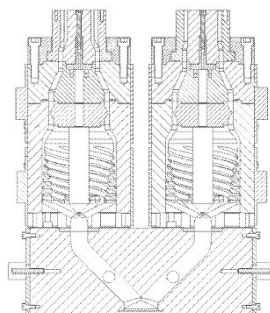


Рис. 13 – Двопотокова трубна головка (пат. № CN213108123U)

Двопотокова головка з центральним підведенням розплаву в протилежно спрямовані формувальні канали (пат. № CN106493929A).

Восьмипотокова (по чотири формувальні щілини на двох рівнях) головка дає змогу формувати від однієї до восьми труб одночасно (пат. № CN202283778U; рис. 14).

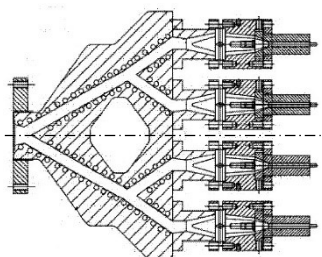


Рис. 14 – Восьмипотокова трубна головка (пат. № CN202283778U)

За можливістю руху елементів головки розрізняють нерухомі, обертові та вібраційні головки.

Нерухома головка з послідовно розміщеними в каналі корпусу нерухомими сітчастим фільтром і нерухомим дорном вирізняється зручністю у складанні й розбиранні, що істотно поліпшує обслуговування й ремонт головки (пат. № CN106671384A; рис. 15).

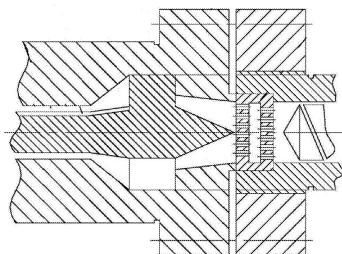


Рис. 15 – Стационарна трубна головка підвищеної ремонтпридатності (пат. № CN106671384A)

Головки з обертовим дорном та/або матрицею для виробництва труб набули набагато меншого поширення, ніж для виробництва рукавних полімерних плівок (а. с. № SU1046111A1; пат. № US4798696A; [13, 23]). Якщо відносно обертання матриці й дорна для полімерних плівок дає змогу одержати рівнощільне намотування плівки в рулон, то в разі виробництва полімерних труб зазначеним обертанням може бути досягнуто лише певне усереднення фізико-механічних властивостей матеріалу стінки труби в коловому й радіальному напрямках, проте відповідне ускладнення конструкції головки майже недоцільне.

Головка з обертовими дорном й матрицею для виготовлення труб, застосовуваних для облаштування вловлювача крапель з потоку повітря на теплових електростанціях (пат. № RU75985U1). Завдяки наявності на поверхні дорна трьох радіальних пазів на одержуваній трубі утворюються поздовжні спіральні ребра.

У праці [27] досліджено вплив режимів перероблення поліпропілену в трубній головці з обертовими дорном. Показано поліпшення фізико-механічних властивостей одержуваних труб порівняно з продукцією, сформованою в нерухомій головці.

Головку з обертовим наконечником дорна для виготовлення труб з можливістю утворення гвинтового паза на внутрішній поверхні (за умови гладкої зовнішньої поверхні) запропоновано в пат. № CN212528625U.

Головка з двома матрицями, що обертаються в протилежних напрямках, скручують нитки поздовжнього армувального матеріалу між двома потоками розплаву полімеру (пат. № JPS5649229A). У результаті одержують полімерну трубу з сітчастим армувальним шаром в середній частині її стінки.

Прямотечійна головка з обертовим дорном і прикріпленням до нього сітчастим фільтром поліпшує температурну й гідродинамічну однорідність розплаву перед його безпосереднім формуванням у трубчасту заготовку (пат. № CN107053634A).

Прямотечійна головка з дорном, оснащеним генератором колових коливань, підвищує рівномірність фізико-механічних властивостей матеріалу стінки труби (а. с. № SU1736726A1).

За видом розподільних каналів розрізняють гладкі, гвинтові й решіткові головки.

Основний недолік головок з гладкими розподільними каналами – можливість утворення ліній зварювання підпотоків полімеру в стінці труби (тобто «спайного» ефекту), які істотно знижують механічні властивості труби, зокрема її міцність.

Для зниження «спайного» ефекту також зменшують площу поперечного перерізу робочого каналу за дорнотримачами в 3–5 разів; застосовують локальні звуження поперечного перерізу; обертають дорн або матрицю; на циліндричній поверхні дорна виконують багатозахідну спіральну нарізку, глибина та/або ширина якої зменшується в напрямку руху розплаву (пат. № UA115094U; рис. 16). При цьому гребені такої нарізки так званої «гвинтової головки» можуть бути нахилені в напрямку формувальної щілини під кутом 15–45° (а. с. № SU1801764A1).

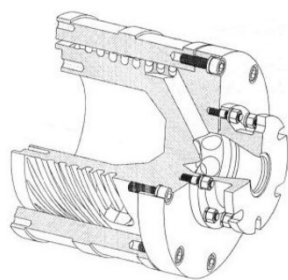


Рис. 16 – Головка з гвинтовим розподільвальним каналом (пат. № UA115094U)

Удосконалені аналогічні головки запропоновано в а. с. № SU1682197A1, SU1752569A1 і пат. № JPH07276467A, CN202517691U.

Інший варіант гвинтової головки досліджено в праці [27]. У цій головці наконечник дорна, а також відповідну конічну ділянку отвору матриці з боку формувальної щілини оснащено гвинтовими лопатями, що закручують потік розплаву та сприяють розмиванню спайок полімерного матеріалу (рис. 17). Недолік конструкції – потреба у достатньо подовженій вихідній прямотечійній частині головки (на виході розплаву з головки) для стабілізації потоку розплаву після його закручування на виході з дорна.

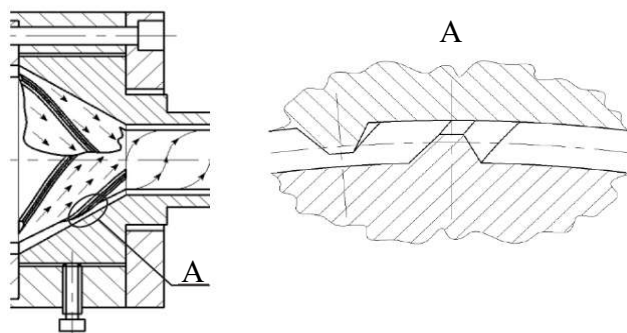


Рис. 17 – Головка з гвинтовим наконечником дорна [27]

Головка з подвійною зміною потоку розплаву з осьового на радіальний ще більше знижує «спайний» ефект, проте збільшує гідравлічний опір проходженню розплаву (пат. № CN108237672A).

Дорнотримачі у вигляді решітки з діаметром отворів 1,5–2,5 мм (так звані решіткові головки) забезпечують мінімальний «спайний» ефект, проте вони мають значний гідравлічний опір, для зменшення якого решітки виконують не у вигляді плоского кільця, а перфорованого циліндра з відбортованим кільцевим фіксатором. При цьому вимушена зміна потоку розплаву під час проходження перфорованого циліндра з осьового на радіальний й далі знову на осьовий також знижує «спайний» ефект у стінці одержуваної труби (а. с. № SU1298091A1).

Дорнотримач має не лише фіксувати дорн у каналі головки, а й вирівнювати по об'єму розплаву його властивості, насамперед реологічні [28].

За можливістю підтримання потрібної температури розрізняють головки із засобами забезпечення температурного режиму й головки без зазначених засобів.

Екструзійна головка містить порожнистий корпус з розміщеним у ньому дорном, при цьому корпус виконано з немагнітного матеріалу, із зовнішнього боку корпуса на ділянці розміщення дорна змонтовано котушку індуктивності, а дорн виконано з магнітного матеріалу з точкою Кюрі, що відповідає температурі перебігу процесу формування (пат. № UA68120U). Така головка забезпечує рівномірний і стабільний за величиною і в часі нагрів дорна (температура дорна при цьому відповідає точці Кюрі матеріалу, з якого виготовлено дорн). Так, після підключення котушки індуктивності до джерела електричного струму внаслідок того, що корпус головки виконано з немагнітного матеріалу (у результаті чого він не виконує роль екрана для змінного магнітного поля) феромагнітний дорн унаслідок індукції нагрівається. За умови досягнення ним температури, що відповідає точці Кюрі матеріалу дорна, дорн втрачає магнітні властивості, внаслідок чого він перестає нагріватися. За подальшого поступового охолодження дорн знову набуває магнітних властивостей і знову починає нагріватися. Таким чином підтримується постійна температура дорна (а отже й розплаву полімеру), що дорівнює точці Кюрі матеріалу дорна [29, 30].

У головці для формування труб великого діаметра в матриці й дорні виконано канали для руху високо температурного теплоносія, що забезпечує рівномірність температури розплаву на виході з головки, а отже й однорідність фізико-механічних властивостей матеріалу стінки труби (пат. № CN115056457A).

Матрицю й дорн головки для формування товстостінних труб з поліефіркетону оснащено індивідуальними змійовиками для забезпечення потрібної температури розплаву (пат. № CN114633454A).

Головка з системою повітряного охолодження зовнішньої й внутрішньої поверхонь екструдованої трубчастої заготовки (пат. № CN206201431U). Недолік конструкції – можливість передчасного твердіння обох поверхонь трубчастої заготовки та утворення дефектів всередині стінки одержуваної труби в разі високого температурного коефіцієнта об'ємного розширення матеріалу труби [2, 3, 31, 32].

За структурою екструдованих труб розрізняють головки для формування однорідних та армованих гладких полімерних труб.

Екструзійна головка для формування гладких полімерних труб, армованих кільцевим армувальним елементом, наприклад, сітковим (а. с. № SU317271A1). Конструктивно головка аналогічна кутовим кабельним головкам [9, 10, 12, 33, 34].

Екструзійна головка для формування гладких полімерних труб із зовнішнім армувальним каркасом у

вигляді металевої сітки, яку одержують за допомогою змонтованого на головці пристрою для укладання поздовжніх і поперечних стренг з наступним їх зварюванням між собою (а. с. № SU657997A1).

Кутова екструзійна головка для формування гладких полімерних труб із зовнішнім кільцевим тканинним каркасом (а. с. № SU749674A1). Зазначений каркас утворюється подаванням декількох тканинних стрічок у проміжок між калібратором і зовнішньою поверхнею трубчастої заготовки, при цьому сусідні стрічки укладаються внапусток між собою для утворення суцільної тканинної оболонки, просоченої розплавом термопласту, який затікає в комірки тканини під тиском повітря, що подається крізь головку всередину трубчастої заготовки. Для поліпшення просочення тканинної оболонки розплавом дорн головки виконано ступінчастим з утворенням стінки трубчастої заготовки, що складається з декількох шарів термопласту.

Головка з прямоточійним рухом розплаву полімеру та осьовим або кутовим введенням гнучких поздовжніх армувальних елементів (у вигляді дроту різного поперечного перерізу або стрічок; заявка № US2005/260374A1).

За наявністю каналів для допоміжних речовин розрізняють головки з каналом для допоміжної речовини та без таких каналів.

Головка з каналом для рідкого мастильного матеріалу, що подається між екструдованою трубчастою заготовкою та циліндричним калібратором, зменшує ймовірність утворення дефектів на поверхні готової труби через відсутність безпосереднього контакту з калібратором (пат. № SU540557A3).

Головку оснащено двома каналами для підведення газового потоку з боку зовнішньої та внутрішньої поверхонь екструдату, що зменшує ймовірність утворення напливів (у вигляді крапель) полімеру на трубчастій заготовці (заявка № EP2873506A1).

За можливістю регулювання товщини стінки труби розрізняють головки з фіксованою й регульованою випускною кільцевою (калібрувальною) щілиною.

Головка з конічними ділянками отвору матриці й дорна та можливістю осьового переміщення дорна дають змогу регулювати товщину екструдованої трубчастої заготовки (пат. № DE2060924A1, DE2639665A1, CN105163924A, CN105324227A, CN2659664Y, заявки № WO2014/127958A1, WO2014/127959A1).

Головка аналогічного призначення, але з конічною ділянкою отвору матриці й циліндричним дорном, змонтованим з можливістю осьового переміщення (пат. № GB1552528A).

Основний недолік гладких полімерних труб значного діаметра (зазвичай понад 800 мм) – велика товщина стінки (і відповідно мале значення SDR (Standart Dimension Ratio) – відношення номінального зовнішнього діаметра труби до номінальної товщини стінки труби; для полімерних труб прийнято такі значення SDR: 41; 33; 26; 21; 17,6; 17; 13,6; 11; 9; 7,4; 6), що спричинює велику матеріаломісткість і лінійну густину (масу 1 м труби). У разі застосування безнапірних полімерних труб значного діаметра, наприклад, для облаштування каналізації, можна рекомендувати використовувати двошарові гофровані полімерні труби: з гладким внутрішнім і гофрованим зовнішнім шарами [2, 3, 35].

Висновки. Аналіз конструкцій екструзійних головок для формування одноканальних гладких полімерних труб свідчить про їх значну різноманітність, при цьому разом з апробованими впродовж тривалого часу достатньо простими у виготовленні та експлуатації прямими трубними головками з робочим каналом фіксованої геометрії проектувальниками й винахідниками пропонуються інноваційні конструкції, придатні для перероблення різноманітних полімерних матеріалів на гладкі труби різного типорозміру (зокрема зовнішнього діаметра й товщини стінки).

Розроблена розгорнута класифікація трубних головок може стати у пригоді розробникам нової техніки для створення високоєфективного екструзійного обладнання. При цьому завдяки можливостям сучасного матеріалознавства та комп'ютерного моделювання з'являється можливість істотного спрощення модернізації існуючих і розробки принципово нових конструкцій екструзійних головок для виробництва гладких полімерних труб з високими експлуатаційними властивостями.

Також варто зазначити, що окремі технічні й технологічні рішення стосовно головок для формування одноканальних гладких полімерних труб можуть бути використано (безпосередньо або з певними змінами) в інших галузях промисловості, зокрема у виробництві вуглеграфітових виробів, зокрема «зелених» електродних заготовок під час екструзії вуглепекової маси крізь мундштук – аналог головки [36].

Перспективи подальших досліджень. Надалі передбачено проаналізувати конструкції інших конструктивних елементів екструзійних технологічних ліній для виготовлення трубчастих і погонних виробів, а також шляхи підвищення їх ефективності.

Список використаної літератури

1. Ledningsbyggande med plaströrsystem / Ed. I. Björklund. Stockholm : Nordiska plaströrgruppen (NPG), 1999. 117 p. URL: https://www.pipelife.dk/content/dam/pipelife/sweden/marketing/general/installation-guidelines/infrastruktur/va/NPG_Ledningsbyggande%20med%20plastr%C3%B6rsystem_Mars_1999_1.pdf
2. Вознюк В. Т. Інтенсифікація процесу охолодження екструдованих полімерних труб : дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. Київ, 2011. 175 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/1315>
3. Вознюк В. Т., Мікульонюк І. О. Інтенсифікація процесу виготовлення екструдованих полімерних труб. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 144 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37521>
4. Handbook of fillers for plastics / Eds H. S. Katz, J. V. Milewski. New York : Van Nostrand Reinhold, 1987. 467 p.
5. Handbook of fillers and reinforcements for plastics / Eds H. S. Katz, J. V. Milewski, New York : Van Nostrand Reinhold, 1978, 652 p.
6. Мікульонюк І. О. Термопластичні композитні матеріали та їх наповнювачі. Класифікація та загальні відомості // Хімічна промисловість України. 2005. № 5. С. 30–39.
7. Chung D. D. L. Composite Materials: Science and Applications. London : Springer Verlag London Limited, 2010. 349 p. URL: https://www.academia.edu/36174278/Composite_Materials_Science_and_Applications
8. Микульєнок І. О. Класифікація термопластических композиционных материалов и их наполнителей // Пластические массы. 2012. № 9. С. 29–38.
9. Мікульонюк І. О. Технологічні основи перероблення полімерів, пластмас і гумових сумішей. Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 312 с.
10. Мікульонюк І. О. Технологічні основи перероблення полімерних матеріалів. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 292 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084>
11. Mikulenk I. O. Intensification of Fabrication of Extruded Polymeric Shapes // Chemical and Petroleum Engineering. 2014. Vol. 50, N 7–8. P. 483–488. DOI: 10.1007/s10556-014-9927-5
12. Сокольський О. Л., Сівецький В. І., Мікульонюк І. О. Проектування формуючих пристроїв обладнання для переробки пластмас. Київ : НТУУ «КПІ», 2014. 148 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25307>
13. Лукач Ю. Е., Петухов А. Д., Сенатос В. А. Оборудование для производства полимерных пленок. Москва : Машиностроение, 1981. 224 с.
14. Мікульонюк І. О., Сокольський О. Л. Полімерні матеріали і вироби з них (одержання, перероблення, властивості). Київ : НТУУ «КПІ», 2015. 208 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37632>
15. Tadmor Z., Gogos C. G. Principles of polymer processing. 2nd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2006. 961 p. URL: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/procesamiento/material/Tadmor-Gogos.pdf>
16. Rauwendaal C. Understanding extrusion. Munich : Hanser Publishers, 2010. 231 p.
17. Mikulyonok I. O. Equipment for preparing and continuous molding of thermoplastic composites // Chemical and Petroleum Engineering. 2013. Vol. 48, N 11–12. P. 658–661. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10556-013-9676-x>
18. Rauwendaal C. Polymer extrusion. 5th ed. Munich : Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014. 950 p. URL: <https://doi.org/10.3139/9781569905395>
19. Polymer Processing: Principles and Modeling / J.-F. Agassant, P. Avenas, P. J. Carreau, B. Vergnes, M. Vincent. 2nd ed. Munich : Carl Hanser Verlag, 2017. 883 p. DOI: <https://doi.org/10.3139/9781569906064>
20. Vlachopoulos J., Polychronopoulos N. D. Understanding Rheology and Technology of Polymer Extrusion. Dundas : Polydynamics Inc, 2019. 337 p. URL: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Rheo_Tech_Book_Part_A.pdf
21. Мікульонюк І. О., Радченко Л. Б. Переробка вторинної сировини екструзією. Київ : НТУУ «КПІ», 2006. 184 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38062>
22. Мікульонюк І. О., Гавва О. М., Кривопляс-Володіна Л. О. Інноваційне обладнання для приготування та перероблення полімерних матеріалів і гумових сумішей. Київ : НУХТ, 2022. 139 с. URL: <http://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/38700>
23. Sikora J. Design of Extrusion Heads. URL: <https://bc.pollub.pl/Content/101/Design%20of%20Extrusion%20Heads.pdf>
24. Zohuri B. Compact Heat Exchangers: Selection, Application, Design and Evaluation. New York City: Springer Nature, 2017. 570 p. DOI: 10.1007/978-3-319-29835-1
25. Mikulenk I. O. Determining the thermophysical properties of thermoplastic composite materials // International Polymer Science and Technology. 2013. Vol. 40, N 9. P. 23–28. DOI: <https://doi.org/10.1177/0307174X1304000905>

26. Martins M. R., Covas J. A. Helical flow during rotational pipe extrusion // *Plastics, Rubber and Composites*. 2006. Vol. 35, N 2. P. 59–66. DOI: 10.1179/174328906X79950
27. Baranowski W., Palutkiewicz P., Werner K. The special design of extrusion head for manufacturing of polymer pipes with increased mechanical strength // *Polimery*. 2015. Vol. 60, N 1. P. 66–71. DOI: <https://doi.org/10.14314/polimery.2015.066>
28. Мікульонюк І. О. Полімерні композиційні матеріали. Визначення реологічних властивостей // *Хімічна промисловість України*. 2003. № 6. С. 58–61.
29. Мікульонюк І. О. Застосування феромагнітних матеріалів для забезпечення потрібного теплового режиму технологічного обладнання (Огляд) // *Энерготехнологии и ресурсосбережение*. 2019. № 1. С. 60–72. DOI: 10.33070/etars.1.2019.06
30. Mikulionok I. O. Stabilization of the temperature of the working medium in the equipment of chemical plants (a survey of patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2015. Vol. 51, N. 5–6. P. 324–327. DOI: 10.1007/s10556-015-0046-8
31. Voznyuk V. T., Mikulyonok I. O., Petukhov A. D. Study of two-sided cooling of extruded smooth polymer pipes. Part 1. Small diameter pipe cooling // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. Vol. 48, N 11–12. P. 699–704. DOI: 10.1007/s10556-013-9683-y
32. Voznyuk V. T., Mikulyonok I. O., Petukhov A. D. Study of two-sided cooling of extruded smooth polymer pipes. Part 2. Large Diameter Pipe Cooling // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2013. Vol. 48, N 11–12. P. 765–768. DOI: 10.1007/s10556-013-9693-9
33. Формуючий інструмент для виробництва кабелю екструзійним способом. Кабельні головки / О. М. Яхно, В. С. Бочковський, А. П. Полив'яний, В. С. Кривошеєв. Київ : Техніка, 1992. 37 с.
34. Технологія нанесення покриттів на поверхні / О. М. Яхно, С. Г. Кравченко, В. С. Кривошеєв, А. П. Полив'яний, В. С. Бочковський. Київ : Техніка, 1993. 120 с.
35. Voznyuk V. T., Karvatskii A. Ya., Mikulionok I. O. Investigation of the Cooling of Two-Layer Corrugated Polymeric Pipes // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2013. Vol. 86, N 3. P. 505–510. DOI: 10.1007/s10891-013-0861-8
36. Енергоресурсоефективне пресування вуглеграфітових виробів / Є. М. Панов, С. В. Лелека, А. Я. Карвацький, І. О. Мікульонюк. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 86 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37591>

Ihor Mikulionok, Anton Karvatskii, Olena Ivanenko

EXTRUSION HEADS FOR FORMING SMOOTH ONE-CHANNEL POLYMER PIPES (Design Overview)

The subject of research is extrusion heads for forming smooth pipes from polymer materials.

Studies of the state of art and prospects of the development of the structural and technological design of extrusion heads for the formation of smooth polymer pipes is based on a critical analysis of scientific and technical sources of information and, above all, patent information of the leading countries of the world, since it is in the patent documentation that information is given about innovative developments in the relevant field of technology and technologies.

With the help of methods of analysis and synthesis, the designs of extrusion heads for the formation of smooth polymer pipes of various purposes for use in the chemical, petrochemical, oil refining, thermal energy, food and related industries were systematized. A thorough classification has been developed for each type of head, on the basis of which the most interesting designs proposed by scientists, designers and inventors from the leading countries of the world have been examined in detail. A critical assessment of most of the above constructions is provided, their advantages and disadvantages are discussed.

Designs of the heads were analyzed depending on the direction of the entrance of the melt to the head, the method of attaching the head to the extruder, the method of fixing the mandrel in the matrix, the number of possibilities of different flows of melts of different materials, the number of simultaneously extruded pipes, the movement of the elements of the head, the type of distribution channels, the possibility of maintaining the required temperature, the extruded pipes structure, the presence of channels for auxiliary substances, the possibility of adjusting the thickness of the pipe wall.

It is shown that, despite the considerable variety of designs of extrusion heads for forming smooth polymer pipes, the most demanded by the industry are straight pipe heads with a working channel of fixed geometry, which have been tested for a long time and are quite simple to manufacture and operate. However, thanks to the successes of materials science and computer modeling, the search for new designs of tubular extrusion heads continues.

Keywords: *polymer pipes, extrusion, forming heads, classification, design*

References

1. Ledningsbyggande med plaströrssystem / Ed. I. Björklund. Stockholm : Nordiska plaströrgruppen (NPG) (1999). URL: https://www.pipelife.dk/content/dam/pipelife/sweden/marketing/general/installation-guidelines/infrastruktur/va/NPG_Ledningsbyggande%20med%20plastr%C3%B6rsystem_Mars_1999_1.pdf
2. Vozniuk, V. T. (2011). Intensyfikatsiia procesu okholodzhennia ekstrudovanykh polimernykh trub [Intensification of the cooling process of extruded polymer pipes] : thesis ... candidate technical of science: spec. 05.14.06 – technical thermal physics and industrial thermal power engineering. Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/1315> (Ukr.)
3. Vozniuk, V. T., Mikulionok, I. O. (2012). Intensyfikatsiia procesu vygotovlennia ekstrudovanykh polimernykh trub [Intensification of the manufacturing extruded polymer pipes process]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37521> (Ukr.)
4. Handbook of fillers for plastics (1987) / Eds H. S. Katz, J. V. Milewski, Van Nostrand Reinhold, New York.
5. Handbook of fillers and reinforcements for plastics (1978) / Eds H. S. Katz, J. V. Milewski, Van Nostrand Reinhold, New York.
6. Mikulionok, I. O. (2005). Termoplastychni kompozytni materialy ta ikh napovniuvachi. Klasyfikatsiia ta zagalni vidomosti [Thermoplastic composite materials and their fillers. Classification and general information]. *Khimichna promyslovisht Ukrainy*, no 5, pp. 30–39. (Ukr.)
7. Chung, D. D. L. (2010). Composite Materials: Science and Applications. Springer Verlag London Limited, London. URL: https://www.academia.edu/36174278/Composite_Materials_Science_and_Applications
8. Mikulionok, I. O. (2012). Klassifikatsiya termoplasticheskikh kompozitsionnykh materialov i ikh napolniteley [Classification of thermoplastic composite materials and their fillers]. *Plasticheskiye massy*, no 9, pp. 29–38. (Rus.)
9. Mikulionok, I. O. (2015). Technologichni osnovy pereroblennia polimeriv, plastmas i gumovykh sumishei [Technological bases of polymers, plastics and rubber mixtures processing]. NTUU "KPI", Kyiv. (Ukr.)
10. Mikulionok, I. O. (2020). Technologichni osnovy pereroblennia polimernykh materialiv [Technological bases of polymer materials processing]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/35084> (Ukr.)
11. Mikulenok, I. O. (2014). Intensification of Fabrication of Extruded Polymeric Shapes. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 50, no. 7–8, pp. 483–488. doi: 10.1007/s10556-014-9927-5
12. Sokolskyi, O. L., Sivetskui, V. I., Mikulionok, I. O. (2014). Proektuvannia formuiuchykh prystroiv obladnannia dlia pererobky plastmas [Design of forming devices for plastics processing equipment]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/25307> (Ukr.)
13. Lukach, Yu. Ye., Petukhov, A. D., Senatos, V. A. (1981). Oborudovaniye dlya proizvodstva polimernykh plynok [Equipment for the production of polymer films]. Mashinostroyeniye, Moscow. (Rus.)
14. Mikulionok, I. O., Sokolskyi, O. L. (2015). Polimerni materialy i vyroby z nykh (oderzhannia, pereroblennia, vlastyvosti) [Polymer materials and products from them (production, processing, properties)]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37632> (Ukr.)
15. Tadmor, Z., Gogos, C. G. (2006). Principles of polymer processing. 2nd ed. John Wiley & Sons, Hoboken. URL: <http://www3.fi.mdp.edu.ar/procesamiento1/material/Tadmor-Gogos.pdf>
16. Rauwendaal, C. (2010). Understanding extrusion. Hanser Publishers, Munich.
17. Mikulyonok, I. O. (2013). Equipment for preparing and continuous molding of thermoplastic composites. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 48, no. 11–12, pp. 658–661. doi: <https://doi.org/10.1007/s10556-013-9676-x>
18. Rauwendaal, C. (2014). Polymer extrusion. 5th ed. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Munich. URL: <https://doi.org/10.3139/9781569905395>

19. Agassant, J.-F., Avenas, P., Carreau, P. J., Vergnes, B., Vincent, M. (2017). *Polymer Processing: Principles and Modeling*, 2nd ed. Carl Hanser Verlag, Munich. doi: <https://doi.org/10.3139/9781569906064>
20. Vlachopoulos, J., Polychronopoulos, N. D. (2019). *Understanding Rheology and Technology of Polymer Extrusion*. Polydynamics Inc, Dundas. URL: http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/Rheo_Tech_Book_Part_A.pdf
21. Mikulionok, I. O., Radchenko, L. B. (2006). Pererobka vtorynnoi syrovyny ekstruziieiu [Processing of secondary raw materials by extrusion]. NTUU "KPI", Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/38062> (Ukr.)
22. Mikulionok, I. O., Gavva, O. M., Kryvoplias-Volodina, L. O. (2022). Innovatsiine obladnannia dlia prygotuvannia ta pereroblennia polimernykh materialiv i gumovykh sumishei [Innovative equipment for the preparation and processing of polymer materials and rubber mixtures]. NUKhT, Kyiv. URL: <http://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/38700> (Ukr.)
23. Sikora J. Design of Extrusion Heads. URL: <https://bc.pollub.pl/Content/101/Design%20of%20Extrusion%20Heads.pdf>
24. Zohuri, B. (2017). *Compact Heat Exchangers: Selection, Application, Design and Evaluation*. Springer Nature, New York City. doi: 10.1007/978-3-319-29835-1
25. Mikulionok, I. O. (2013). Determining the thermophysical properties of thermoplastic composite materials. *International Polymer Science and Technology*, vol. 40, no. 9, pp. 23–28. doi: <https://doi.org/10.1177/0307174X1304000905>
26. Martins, M. R., Covas, J. A. (2006). Helical flow during rotational pipe extrusion. *Plastics, Rubber and Composites*, vol. 35, no. 2, pp. 59–66. doi: 10.1179/174328906X79950
27. Baranowski, W., Palutkiewicz, P., Werner, K. (2015). The special design of extrusion head for manufacturing of polymer pipes with increased mechanical strength. *Polimery*, vol. 60, no 1, pp. 66–71. doi: <https://doi.org/10.14314/polimery.2015.066>
28. Mikulionok, I. O. (2003). Polimerni kompozytsiini materialy. Vyznachennia reologichnykh vlastyvostei [Polymer composite materials. Determination of rheological properties]. *Khimichna promyslovisť Urrainy*, no. 6, pp. 58–61. (Ukr.)
29. Mikulionok, I. O. (2019). Zastosuvannia feromagnitnykh materialiv dlia zabezpechennia potribnogo teplovogo rezhimu tekhnologichnogo obladnannia (Ogliad) [Ferromagnetic Materials Use for Providing the Necessary Thermal Mode of Processing Equipment (Review)]. *Energotekhnologii i resursoberezhenniye*. No 1, pp. 60–72. doi: 10.33070/etars.1.2019.06
30. Mikulionok, I. O. (2015). Stabilization of the temperature of the working medium in the equipment of chemical plants (a survey of patents). *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 51, no. 5–6, pp. 324–327. doi: 10.1007/s10556-015-0046-8
31. Voznyuk, V. T., Mikulyonok, I. O., Petukhov, A. D. (2013). Study of two-sided cooling of extruded smooth polymer pipes. Part 1. Small diameter pipe cooling. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 48, no. 11–12, pp. 699–704. doi: 10.1007/s10556-013-9683-y
32. Voznyuk, V. T., Mikulyonok, I. O., Petukhov, A. D. (2013). Study of two-sided cooling of extruded smooth polymer pipes. Part 2. Large Diameter Pipe Cooling. *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 48, no. 11–12, pp. 765–768. doi: 10.1007/s10556-013-9693-9
33. Yakhno, O. M., Bochkonskyi, V. S., Polyvianyi, A. P., Kryvosheiev, V. S. (1992). Formuiuchyi instrument dlia vyrobnytstva kabeliu ekstruziinyim sposobom. Kabelni golovky [Forming tool for the production of cable by the extrusion method. Cable heads]. Київ : Техніка, 1992. 37 с. Техніка, Kyiv. (Ukr.)
34. Yakhno, O. M., Kravvhenko, S. G., Kryvosheiev, V. S., Polyvianyi, A. P., Bochkonskyi, V. S. (1993). Tekhnologiiia nanesennia pokryttiv na poverkhni [Surface coating technology]. Техніка, Kyiv. (Ukr.)
35. Voznyuk, V. T., Karvatskii, A. Ya., Mikulionok, I. O. (2013). Investigation of the Cooling of Two-Layer Corrugated Polymeric Pipes. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 86, no. 3, pp. 505–510. doi: 10.1007/s10891-013-0861-8
36. Panov, Ye. M., Leleka, S. V., Karvatskii, A. Ya., Mikulionok, I. O. (2020). Energoresursoefektyvne presuvannia vuglegrafitnykh vyrobiv [Energy-resource-efficient pressing of carbon graphite products]. Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/37591> (Ukr.)