

МКУЛЬОНОК І. О., д.т.н., проф.; СОКОЛЬСЬКИЙ О. Л., к.т.н., доц.;
СОКОЛЕНКО В. В., магістрант
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ОХОЛОДЖЕННЯ НАКЛАДЕНОЇ НА ЖИЛИ КАБЕЛЬНИХ ВИРОБІВ ПОЛІМЕРНОЇ АБО ГУМОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

Наведено визначення кабельних виробів (кабелю, проводу, шнура) та класифікацію методів їх охолодження після накладення на їхню жилу ізоляційного шару з полімерних матеріалів або гумових сумішей. Показано, що обмеженою стадією виготовлення кабельних виробів часто є процес їхнього охолодження від температури формування полімерної або гумової ізоляції до температури в зоні приймального пристрою технологічної лінії. Проаналізовано основні методи охолодження, їх конструктивне оформлення, а також шляхи інтенсифікації охолодження.

Ключові слова: кабельний виріб, ізоляція, екструзія, охолодження, інтенсифікація.

© Мікульонко І. О., Сокольський О. Л., Соколенко В. В., 2014.

Постановка проблеми та аналіз попередніх досліджень. У багатьох галузях промисловості широко застосовують кабельні вироби [1–3].

Відповідно до ГОСТ 15845–80 кабельний виріб – це електричний виріб, призначений для передавання по ньому електричної енергії, електричних сигналів інформації або для виготовлення обмоток гнучких електричних пристроїв [3]. При цьому залежно від конструкції кабельні вироби поділяють на кабелі, проводи й шнури [1].

Значну частку кабелів і проводів становлять електричні кабельні вироби, призначені для передавання по них передусім електричної енергії. При цьому одним з елементів електричних кабелів, проводів і шнурів є насамперед полімерна або гумова ізоляція однієї чи декількох струмопровідних жил, яка накладається на них методом екструзії за допомогою кабельних головок [4].

У виробництві кабельної продукції з ізоляцією на основі високомолекулярних сполук потрібну продуктивність технологічних ліній зазвичай досягають високопродуктивним методом екструзії [5, 6].

У процесі виробництва кабельних виробів металевий дріт (жилу або осердя майбутнього виробу) розмотують із віддавального пристрою, випрямляють і підігривають до певної температури з метою видалення з його поверхні вологи й мастила, а також збільшення адгезії ізоляції до металу дроту. Після цього дріт надходить в екструзійну кабельну головку, де здійснюється його покриття розплавом полімеру або гумової суміші (далі – полімеру). Після кабельної головки дріт із нанесеною на його поверхню одно- чи багат шаровою полімерною ізоляцією (або після пристрою для вулканізації в разі гумової ізоляції) потрапляє в охолоджувальний пристрій, де відбувається зниження температури одержаного виробу до необхідного значення, яке забезпечує проведення подальших технологічних операцій аж до утворення бухт, бобин тощо в приймальному пристрої.

Отже, під час оформлення електричної ізоляції з полімерів і гумових сумішей температура ізоляційного покриття струмопровідних жил змінюється від температури формування полімеру або вулканізації гумової суміші до температури на «холодному» кінці технологічної лінії для накладення пластмасової ізоляції на проводи та кабелі або технологічної лінії для накладання і вулканізації гумової ізоляції на кабелі та проводи (остання температура передусім має унеможливити злипання між собою витків виготовленого кабелю або проводу між собою).

Процес охолодження кабелів або проводів має неабияке значення для одержання якісної продукції. Охолоджувальний пристрій зазвичай виконують у вигляді декількох послідовно розташованих ванн, заповнених водою, температура якої поступово зменшується від однієї ванни до іншої, що запобігає різкому охолодженню зовнішніх шарів поверхні ізоляції, яке може спричинити утворення в них технологічних напружень. Поступове охолодження виробу особливо необхідне під час виготовлення проводів і кабелів з товстою ізоляцією (як одно-, так і багат шаровою). У цьому разі інтенсивне охолодження зовнішніх і повільне охолодження внутрішніх шарів ізоляції може призвести не лише до деформування, а й навіть до механічного пошкодження зовнішніх шарів (утворення в зовнішніх шарах тріщин та інших дефектів), а також до втрати суцільності на межі «ізоляція – жила» та (або) на межі сусідніх шарів багат шарової ізоляції. Вид теплоносія (зазвичай вода й повітря), його температура, а також послідовність і довжина ділянок охолоджувального пристрою визначаються залежно від конструкції та швидкості руху охолоджувального виробу, а також матеріалу й розмірів елементів виробу (жили та ізоляції).

З урахуванням значних швидкостей виробу (до 25...40 м/с і більше [2]), а також низької теплопровідності полімерних матеріалів довжина охолоджувального пристрою може досягати десятків метрів, що суттєво збільшує вартість як технологічної лінії, так і одержуваного виробу.

При цьому, якщо питання математичного моделювання процесу охолодження кабельних виробів або конструктивного оформлення процесу формування ізоляції розглянуто достатньо докладно [7–9], то конструкціям охолоджувальних пристроїв уваги приділялося недостатньо.

Метою статті є аналіз способів і пристроїв охолодження шару полімерної або гумової ізоляції кабельного виробу.

Виклад основного матеріалу. Перш за все визначимося з термінами. Кабель – це один чи декілька заізованих жил (провідників), уміщених зазвичай у металеву або неметалеву оболонку, поверх якої залежно від умов прокладання та експлуатації може бути відповідне захисне покриття, іноді броньоване [1, 2].

Кабель електричний – один чи декілька ізованих провідників (струмопровідних жил), уміщених у захисну (зазвичай герметичну) оболонку. Кабелі будь-якого типу мають спільні конструктивні елементи: струмопровідні жили, ізоляцію та оболонку [10].

Провід – це одна неізована або одна чи декілька заізованих жил, які залежно від умов прокладання та експлуатації можуть мати неметалеву оболонку, обмотку та (або) обплетення волокнистими матеріалами або дротом [1, 2].

Провід електричний – це неізований або ізований провідник електричного струму, який складається з одного (одножильний провід) або декількох (багатожильний провід) дротів [10].

Шнур – це дві або більше заізованих гнучких або особливо гнучких жил поперечним перерізом до $1,5 \text{ мм}^2$, скручених або укладених паралельно, поверх яких залежно від умов експлуатації можуть бути розташовані неметалева оболонка й захисне покриття [1].

Струмопровідні жили кабельних виробів можуть бути круглими або фасонними, залежно від перерізу – одно- чи багатодротяними.

На рис. 1 і 2 наведено поперечні перерізи декількох конструкцій кабелів і проводів.

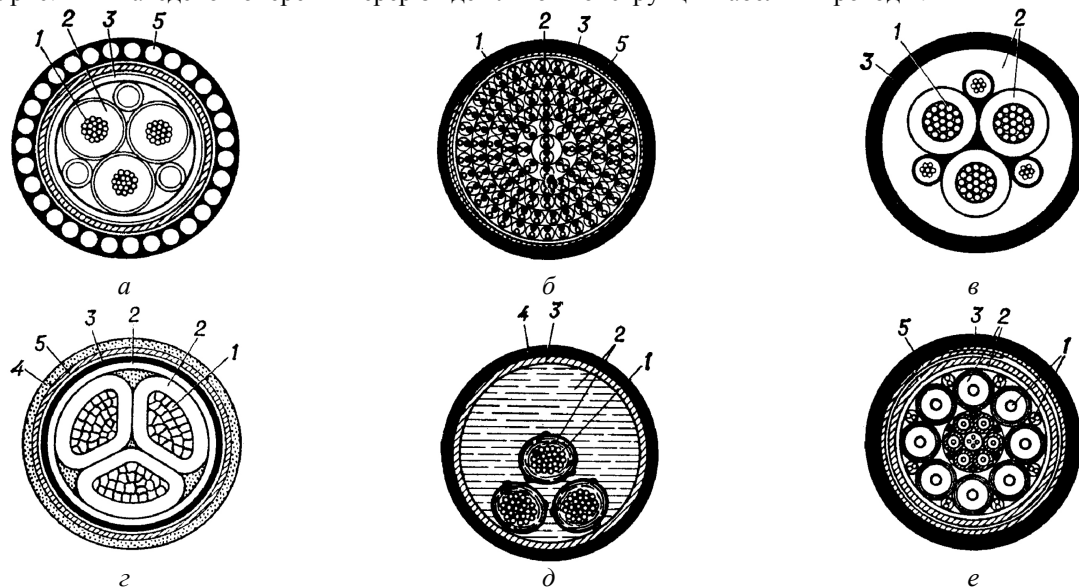


Рис. 1 – Поперечні перерізи кабелів: *a* – газонаповненого під тиском броньованого силового; *б* – телефонного для міських телефонних мереж; *в* – особливо гнучкого (шлангового) високої напруги; *г* – броньованого для силових та освітлювальних установок; *д* – магістрального комбінованого броньованого для міжнародних ліній зв'язку; *е* – силового маслонаповненого в сталевому трубопроводі (високого тиску); 1 – струмопровідна жила; 2 – ізоляція; 3 – оболонка; 4 – захисне покриття; 5 – броня, екран

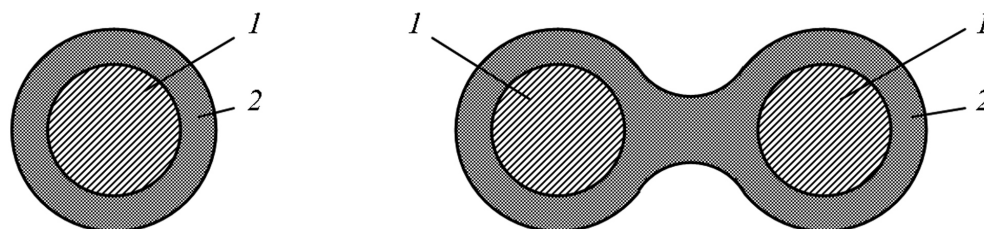


Рис. 2 – Поперечні перерізи одножильного (а) і багатожильного (б) проводу або шнура: 1 – струмопровідна жила; 2 – ізоляція

Як бачимо, чітко визначення, що відрізняло б кабель від проводу (і, насамперед, електричного кабелю – від електричного проводу), відсутнє.

У подальшому в статті розглядатимемо кабелі й проводи з полімерною або гумовою електричною ізоляцією, що накладаються на струмопровідну жилу (струмопровідні жили) методом екструзії. Відповідно під термінами «кабель» і «провід» розумітимемо:

– кабель електричний – один або декілька ізольованих провідників (струмопровідних жил), уміщених у захисну (зазвичай герметичну) оболонку;

– провід електричний ізольований – ізольований провідник електричного струму, який складається з одного (одножильний провід) або декількох (багатожильний провід) дротів.

Основну кількість теплоти від охолоджуваного кабельного виробу відводять у ваннах охолодження завдовжки 2...6 м (при цьому з метою регулювання довжини ділянок охолодження, отже й тривалості охолодження ванни іноді виготовляють розсувними). Також під час охолодження гнучких проводів і шнурів на кінцях ванни влаштовують поворотні ролики, на кожному з яких напрямки руху виробу змінюється на 180°, і таким чином довжина ділянки охолодження істотно збільшується.



Рис. 3 – Класифікація методів охолодження кабельних виробів

Охолодження екструдату у ваннах зазвичай здійснюють двома методами: зануренням екструдату в шар води або розбризкуванням води на його поверхню. При цьому, на відміну від порожнистого екструдату, наприклад, полімерних труб [11], відведення теплоти від кабельного виробу може бути реалізоване лише з боку його зовнішньої поверхні.

Охолодження екструдату зануренням у шар води здійснюють для виробів із зовнішнім еквівалентним діаметром переважно до 50 мм. Збільшення в цьому випадку еквівалентного діаметра виробу із внутрішньою порожниною збільшує виштовхувальне зусилля, яке діє на нього, що припускає застосування примусового занурення екструдату під дією механічних пристроїв, які можуть пошкодити його поверхню. Крім того, охолодження зануренням передбачає значну витрату води. Тому охолодження розбризкуванням води на поверхню екструдату є більш доцільним методом охолодження для кабельних виробів значного діаметра.

Проте в багатьох випадках від охолодження зануренням відмовитися неможливо. Це стосується передусім виробництва кабельної продукції невеликого поперечного перерізу (проводів, шнурів), коли охолодження розбризкуванням стає малоефективним.

У випадку, коли потрібно не «ударне» (різке), а «м'яке» (плавне) охолодження відформованого ізоляційного шару, забезпечують послідовне проходження екструдатом декількох ванн охолодження, зокрема трьох ванн із водою, що має температуру 90, 60 і 20 °С, відповідно [8]. У деяких випадках застосовують не водяне, а повітряне охолодження (як в умовах вільної, так і вимушеної конвекції), наприклад, під час низької швидкості руху екструдату з малою площею поперечного перерізу.

Під час виготовлення кабельних виробів діаметром до 30...50 мм охолодження у ваннах здійснюється за умови вільної конвекції зануренням виробу в шар охолодної води. Однак за такого процесу екструдований виріб захоплює пристінний шар охолодної води, який поступово прогрівається і, рухаючись разом із виробом, сповільнює процес охолодження. Для руйнування пристінного шару й збільшення коефіцієнта тепловіддачі запропоновано застосовувати поперечні перегородки або діафрагми (рис. 3) [12] чи пропускати крізь шар охолодної води бульбашки або струминки повітря (рис. 4) [13, 14]. Останнє рішення доцільно застосовувати в разі частой зміни типорозміру охолоджуваних виробів.

Зазначені поперечні перегородки виконують з еластичного матеріалу, в якому для зменшення ймовірності пошкодження поверхні ізоляції з боку їх отворів можуть бути виконано радіальні надрізи, або виконують у вигляді ірисової діафрагми, що забезпечує просте регулювання діаметра її отвору одночасним поворотом пелюсток, що утворюють зазначений отвір.

На відміну від ванни охолодження відповідно до патента [13] пристрій [14] споряджено додатковими барботерами, розміщеними з боків та/або зверху охолоджуваного екструдованого матеріалу (рис. 5). Цей пристрій забезпечує повне та ефективне руйнування нагрітого прилежого шару рідкого холодоагенту біля поверхні екструдованого матеріалу, що істотно поліпшує рівномірність охолодження цього матеріалу, а отже стабільність його фізико-механічних властивостей.

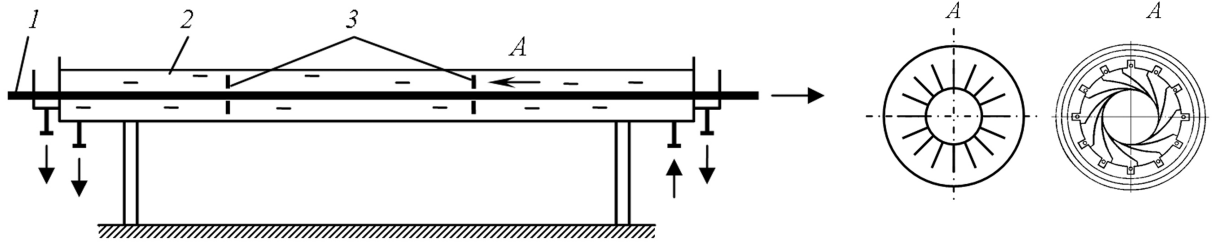


Рис. 3 – Схема руйнування пристінного шару за допомогою перегородок:
1 – кабельний виріб; 2 – ванна; 3 – поперечні перегородки

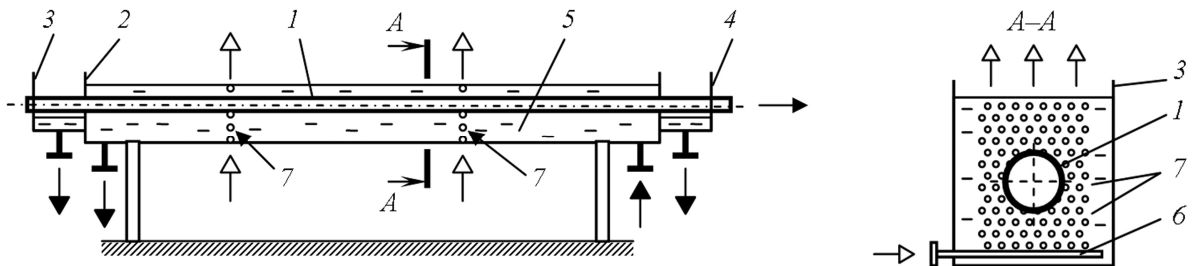


Рис. 4 – Схема руйнування пристінного шару за допомогою струминок повітря:
1 – кабельний виріб; 2 – ванна; 3 – барботери; 4 – бульбашкова завіса

При цьому кожний із барботерів може бути виконано у вигляді шлангу з отворами в його стінці, закріпленого на поздовжньому елементі з можливістю зміни і фіксації його форми у просторі, що забезпечує можливість вигинання поздовжнього елемента, а отже барботера навкруги екструдованого матеріалу незалежно від форми його поперечного перерізу.

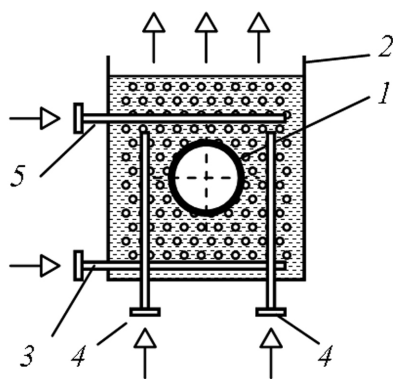


Рис. 5 – Схема удосконаленого руйнування пристінного шару за допомогою струминок повітря:
1 – кабельний виріб;
2 – ванна; 3 – барботери;
4 – бульбашкова завіса

Також для руйнування пристінного ламінарного шару води використовують струмені води [5], зокрема закручуванням потоку [15], а також вібрацію ванни [16]. Проте руйнування нагрітого ламінарного шару охолодної води поблизу поверхні екструдату струменями води потребує підвищеної витрати води та енергії. Використання ж вібраційних ванн негативно впливає на роботу обслуговуючого персоналу й навколишнього обладнання, а також передбачає використання надійних ущільнень на вході екструдату у ванну й на виході з неї.

Під час виготовлення кабельних виробів більшого діаметра застосовують ванни, в яких охолодження здійснюють зрошенням охолодної води на зовнішню поверхню виробу. Однак конструкція зрошувальних ванн не забезпечує ефективного використання холодоагенту під час переходу пристрою на охолодження виробу іншого діаметра. Наприклад, під час зменшення діаметра виробу частина факелів холодоагенту, що виходить з розпилювачів, проходить повз виріб, що спричинює нераціональне використання холодоагенту.

Якщо забезпечити ефективне потрапляння факела холодоагенту, що розпилюється, безпосередньо на поверхню охолоджуваного виробу незалежно від її діаметра, то заощаджується значна кількість

холодоагенту за умови забезпечення високої інтенсивності охолодження. Тому кожний розпилювач 3 доцільно встановлювати з можливістю переміщення в радіальному напрямі горизонтальної ванни 2 (рис. 6) [17].

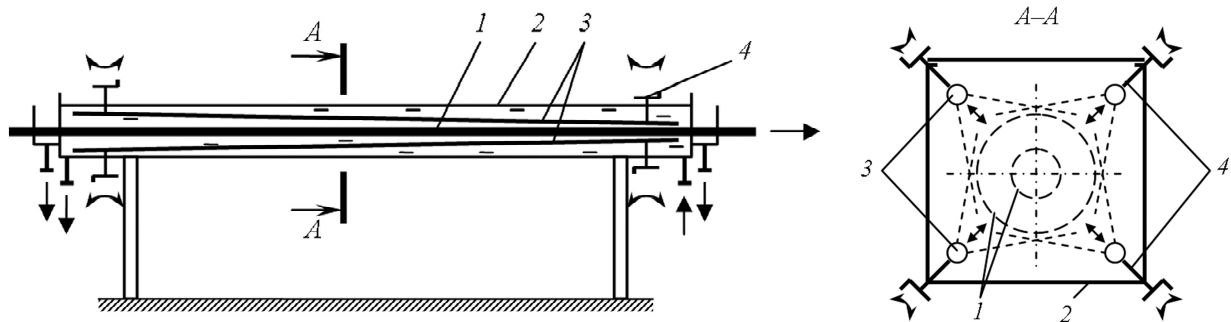


Рис. 6 – Схема охолодної ванни: 1 – кабельний виріб; 2 – ванна; 3 – розпилювачі; 4 – приводи

Під час охолодження виробу максимально можливого діаметра для пристрою певного типорозміру розпилювачі 3 рідкого холодоагенту розміщують на максимальній відстані від поздовжньої осі ванни. При цьому забезпечується потрапляння факелів холодоагенту, що виходять із сопел розпилювачів, на поверхню виробу, а, отже, і ефективне її охолодження.

У разі переходу екструзійної лінії на випуск виробу меншого діаметра, розпилювачі переміщують у радіальному напрямі горизонтальної ванни 2, тобто ближче до її поздовжньої осі, а, отже до поверхні охолоджуваного виробу. При цьому весь холодоагент, що виходить із сопел розпилювачів, потрапляє на поверхню виробу, ефективно його охолоджуючи.

Спорядження кожного розпилювача двома приводами переміщення 4, рознесеними за його довжиною (див. рис. 6), забезпечує можливість їхнього розташування під кутом до виробу 1, що дає змогу можливість регулювати інтенсивність охолодження виробу за його довжиною (наприклад, менш інтенсивне на вході виробу у ванну і більш інтенсивне на виході виробу з неї; для цього розпилювачі розміщують на більшій відстані від виробу на початку ванни та на меншій – в її кінці).

У зрошувальних систем охолодження також є певні недоліки: вода, що стікає поверхнею екструдату, поступово формується у водяну плівку, товщина якої суттєво збільшується в нижній частині екструдату, що призводить до його нерівномірного охолодження, а отже утворення небажаних технологічних напружень у полімерному покритті.

Проведені дослідження довели ефективність комбінованого за довжиною екструдату водно-повітряного охолодження: регулюванням довжини, кількості й послідовності розміщення водяних і повітряних ділянок охолодження можна не лише зменшити витрату охолодної води, але й загальну довжину зони охолодження та технологічні напруження в готовому виробі [8].

Нарешті, ще одним із можливих шляхів приведення у відповідність «зайвої» продуктивності екструдера та обмежної стадії охолодження екструдату невеликої площі поперечного перерізу є застосування багаторівчачкових екструзійних головок, коли забезпечувана екструдером витрата розплаву термопласту рівномірно розподіляється за всіма формувальними фільерами головки, уповільнюючи при цьому швидкість руху декількох потоків екструдату порівняно з єдиним потоком у традиційній технологічній лінії. Таким чином, застосовують головки з декількома формувальними фільерами для виготовлення простих виробів.

Інтенсивне охолодження виробу водою у ваннах швидко знижує температуру її зовнішньої поверхні, що істотно зменшує інтенсивність подальшого відведення теплоти від виробу, внаслідок чого зростає тривалість охолодження. Якщо ж після певного часу водяного охолодження виріб охолоджувати повітрям, то зовнішні шари стінки виробу почнуть прогріватися завдяки перерозподілу температури між внутрішніми й зовнішніми шарами стінки виробу, адже коефіцієнт тепловіддачі від виробу до повітря порівняно з ділянкою водяного охолодження зменшується на два порядки. Якщо ж виріб далі знову зрошувати водою, то охолодження буде ефективнішим. Таке чергування ділянок повітряного і водяного охолодження істотно підвищує ефективність процесу [18].

Висновки. Огляд конструктивних і технологічних заходів інтенсифікації охолодження полімерного або гумового покриття на електропровідну жилу кабельного виробу свідчить, що універсальних засобів не існує. Кожний виріб залежно від конструкції, розміру й матеріалу ізоляційного шару потребує ретельного аналізу умов охолодження та їх впливу на якість одержуваної продукції. Такий аналіз найдоцільніше здійснювати за допомогою числового моделювання процесу перероблення відповідної сировини у виробі, що надає змогу істотно зменшити матеріальні та енергетичні затрати.

Наведені результати допоможуть проектувальникам і виробничникам вибирати найефективніші шляхи підвищення продуктивності ліній для накладення пластмасової, накладення й вулканізації гумової ізоляції на проводи й кабелі з урахуванням умов охолодження, структури та властивостей ізоляційного шару (особливо в разі пластмасової ізоляції).

Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення раціональних режимів охолодження певної кабельної продукції, що забезпечуватимуть високу продуктивність технологічної лінії, а також відповідну якість кабельної продукції.

Список використаної літератури

1. *Электрические кабели, провода и шнуры* : справочник / Н. И. Белоруссов, А. Е. Саакян, А. И. Яковлева ; под ред. Н. И. Белоруссова. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 536 с.
2. *Григорьян А. Г.* Производство кабелей и проводов с применением пластмасс и резин / А. Г. Григорьян, Д. Н. Дикерман, И. Б. Пешков. – М. : Энергоатомиздат, 1992. – 304 с.
3. *ГОСТ 15845–80* Изделия кабельные. Термины и определения [Cable products. Terms and definitions].
4. *Формующий* инструмент для производства кабеля экструзионным способом. Кабельные головки / О. М. Яхно, В. С. Бочковский, А. П. Польшивный, В. С. Кривошеев. – К. : Техніка, 1992. – 37 с.
5. *Ким В. С.* Теория и практика экструзии полимеров / В. С. Ким. – М. : Химия, КолосС, 2005. – 568 с.
6. *Раувендааль К.* Экструзия полимеров / К. Раувендааль ; пер. с англ. под ред. А. Я. Малкина. – СПб. : Профессия, 2006. – 768 с.
7. *Мікульонок І. О.* Моделювання термообробки погонних композитних матеріалів / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко, Л. І. Ружинська // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2005. – № 2. – С. 66-71.
8. *Мікульонок І. О.* Обладнання і процеси переробки термопластичних матеріалів з використанням вторинної сировини : монографія / І. О. Мікульонок. – К. : ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2009. – 265 с.
9. *Мікулёнок И. О.* Моделирование процессов термической обработки непрерывно формующих изделий / И. О. Микулёнок // Химическая промышленность. – 2012. – Т. 89. – № 3. – С. 118-128.
10. *Полімерні* композитні матеріали й вироби з них. Одержання, перероблення та властивості : термінол. слов. / І. О. Мікульонок, Л. Б. Радченко. – К. : ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2005. – 179 с.
11. *Вознюк В. Т.* Інтенсифікація процесу виготовлення екструдованих полімерних труб : монографія / В. Т. Вознюк, І. О. Мікульонок. – К. : НТУУ «КПІ», 2012. – 144 с.
12. *Пат. 18744 U* Україна, МПК (2006) B29C 35/00. Пристрій для охолодження довгомірних виробів ; опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11.
13. *Пат. 69281 U* Україна, МПК (2006.01) B29C 47/88. Спосіб охолодження екструдованого матеріалу ; опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.
14. *Пат. 79165 U* Україна, МПК (2006.01) B29C 47/88. Пристрій для охолодження екструдованого матеріалу ; опубл. 10.04.2013, Бюл. № 7.
15. *А.с. 409885 СРСР*, МПК B29C 47/88. Устройство для охлаждения экструдированных полимерных изделий ; опубл. бюл. № 1, 1974.
16. *А.с. 446432 СРСР*, МПК B29C 47/88. Способ охлаждения экструдированных изделий ; опубл. бюл. № 38, 1974.
17. *Пат. 53879 U* Україна, МПК (2009) B 29 C 35/00. Пристрій для охолодження полімерних труб ; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20.
Пат. 66227 U Україна, МПК (2006.01) B29C 47/88. Спосіб охолодження екструдованої полімерної труби ; опубл. 26.12.2011, Бюл. № 24.