

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ГІДРОДИНАМІЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕСУ ВИТЯГУВАННЯ ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДІВ

*О. П. Зінкевич, В. М. Сафонов,
кандидати фізико-математичних наук
Національний університет харчових технологій
О. М. Нещадим, кандидат фізико-математичних наук
Національний університет біоресурсів
і природокористування України
e-mail: nni.elektrik@gmail.com*

Анотація. Виконано порівняння існуючих моделей витягування волоконних світловодів на основі їх особливостей в таких аспектах: реологічна модель; ізотермічність (неізотермічність); стаціонарність (нестационарність); врахування тих або інших сил у загальному балансі сил, діючих на витягаюче волокно; розмірність моделі; граничні умови; спосіб знаходження поля швидкостей і температур. Встановлено необхідність двовимірного розгляду обох сторін процесу – гідродинамічної та теплотехнічної.

Ключові слова: заготовка, зони формування, реологія, конститутивні рівняння, баланс сил, повна модель.

Процес формування волоконних світловодів має дві основні стадії: формотворення та фіксації форми [11, 1]. Тут необхідно розглядати дві сторони протікання процесу формування – механічну (процес деформування скломаси) і теплотехнічну (процес нагрівання та охолодження скла). Якщо точкою відліку вважати початок плавлення скла заготовки, то увесь процес формування можна умовно розбити на чотири зони: зону формування; зону власне витягування; зону завершення процесу; зону приймання готового скловолокна. Кожній зоні відповідають характерні особливості протікання двох названих сторін протікання процесу формування.

Мета досліджень – вибір належної моделі реології, що якнайкраще описує поведінку розплаву волокноутворюючих матеріалів у відповідній зоні процесу формування.

Матеріали та методика досліджень. Гідродинамічні моделі процесу витягування волоконних світловодів аналізувалися в межах класичної теорії механіки суцільного середовища.

Результати досліджень. Кожна із названих чотирьох зон характеризується своїм видом залежності між напругою τ й спричиненими нею деформаціями Δ , а також швидкостями деформацій. Встановлення характеру таких залежностей $\tau = \tau(\Delta)$, які ще називають конститутивними рівняннями, є завданням реології. Для повного розуміння процесу форму-

вання необхідно знати реологічну поведінку волокна, що витягується, у кожній з чотирьох зон.

Проте це неможливо за нинішнього стану наших знань: до сьогодні не існує надійної, достеменно точної загальної теорії або вичерпних експериментальних даних для такого широкого діапазону зовнішніх умов. І, як результат, доводиться обмежуватися застосуванням простих реологічних моделей і прийнятних емпіричних співвідношень.

Усі існуючі реологічні моделі можна поділити на два класи залежно від того, чи вкладаються ці моделі в межі класичної лінійної теорії, що розглядає лише нескінченно малі й нескінченно повільні деформації і так звані явища першого порядку, або при побудові цих моделей беруться до уваги скінченність деформацій та їх швидкостей, а також явища вищих порядків [12].

Рейнер [10] запропонував проводити систематизацію моделей у межах класичної теорії, опираючись на основні моделі суцільного середовища: пружне тіло Гука, що є ідеально пружним тілом і розглядається в класичній теорії пружності; в'язка рідина Ньютона, що є «простою» в'язкою рідиною і розглядається класичною гідродинамікою; пластичне тіло Сен-Венана – тверде тіло, якому властива межа протікання, при напрузі, нижче за яку воно деформується пружно й пластично тече при постійній напрузі, що дорівнює межі протікання. Тіло Сен-Венана вивчає ідеальна пластичність. Решту «реологічних тіл» можна розглядати як комбінації цих трьох основних тіл.

Кожній із названих моделей можна дати механічну трактовку, на основі якої будується механічна модель. Складаючи послідовні, паралельні або змішані поєднання цих моделей, можна отримати нові моделі, які описують поведінку найрізноманітніших реальних матеріалів. Так, послідовне поєднання моделей Ньютона і Гука створює відому модель Максвелла.

Наближення, що витікає з ізотермічності процесу витягування, є грубим і практично ніколи не відповідає дійсності. Проте при вивченні ізотермічних моделей процесу витягування волоконних світловодів було отримано важливі якісні результати [17, 19].

Відомі неізотермічні моделі можна розділити на дві великі групи. До першої групи належать такі, в яких разом з рівнянням Нав'є-Стокса використовується рівняння теплопровідності. Такі моделі будемо вважати повними. До другої групи належать моделі, в яких розподілення температури враховується параметрично за допомогою завдання в'язкості як функції координат. Найкращих результатів у дослідженні процесу витягування було досягнуто на основі повних моделей, серед яких слід виокремити [9, 15].

Початковим етапом дослідження процесу витягування має бути аналіз стаціонарних конфігурацій волокон і відповідного поля швидкостей. Здебільшого так і буває; нестаціонарні початкові рівняння використовуються, як правило, при дослідженні стійкості процесу і його реакції на всілякі обурення. Винятком є випадок, коли нестаціонарні рівняння використовуються для відшукування стаціонарного рішення у межах методу встановлення при $t \rightarrow \infty$ [5,9].

У найбільш загальному випадку рівняння балансу сил при витягуванні волокон має вигляд [18]:

$$F + F_g = F_\mu + F_{in} + F_{st} + F_a. \quad (1)$$

Тут

F – сила натягу в точці прийому волокна;

F_g – сила тяжіння;

F_μ – складова, обумовлена в'язкими силами і залежна від реологічних властивостей розплаву;

F_{in} – інерційна сила, пов'язана з прискоренням струменя рідини;

F_{st} – сила поверхневого натягу, пов'язана зі зміною поверхні струменя і відповідної поверхневої енергії струменя; вона пропорційна поверхневому натягу між струменем і довкіллям;

F_a – сила тертя об повітря.

Відносна важливість складових у балансі сил залежить від умов формування і властивостей розплавленого матеріалу.

Практично в усіх відомих роботах нехтують силою тертя об повітря. Умови, за яких таке нехтування не є виправданим, розглянуті в [5]. Нехтування всіма силами, крім F і F_μ , відповідає повільному витягуванню високов'язкого матеріалу, є хорошою моделлю даного процесу [2]. Врахування окремих складових в рівнянні (1) і, у першу чергу F_{st} , відповідає тим чи іншим особливостям при розгляді реальних процесів. Так, наприклад, F_{st} необхідно врахувати при моделюванні процесу витягування скляних волокон. Чисто теоретичний інтерес представляє випадок, коли $F = 0$, він є предметом дослідження в роботі [13].

Практично всі існуючі моделі є одновимірними. Це обумовлено труднощами дослідження початкових рівнянь, записаних для випадку осьової симетрії, не кажучи вже про тривимірний випадок. Були нечисленні спроби врахування поперечної складової швидкості [16, 12] за допомогою подання її у вигляді

$$V(r, z) = V(z) \cdot (1 + a_1 \cdot r + a_2 \cdot r^2 + \dots). \quad (2)$$

У випадку [16] (досліджувалися полімерні волокна) оцінка коефіцієнтів a_1, a_2, \dots показала їх малість, на основі чого було зроблено висновок про задовільність одновимірного підходу. В іншому випадку [12] виявилося, що прийняття параболічного профілю швидкості (2) у межах поперечного перерізу волокна не призводить до задовільного результату при порівнянні теоретичних та експериментальних даних. У результаті автори цієї роботи прийшли до висновку про необхідність врахування двовимірності поля температур.

У роботах [6, 7] запропоновано розв'язання задачі формування волокон із полімерних матеріалів у вигляді накладення завдання про розтягування в'язко-пружного стержня і руху, який визначається продуктивністю процесу. При цьому завдання про струмінь, що витягається, розділено на

дві. Це задача про розтягування в'язко-пружного стрижня в умовах теплообміну з довкіллям, коли розтягуюче зусилля стає або змінюється з часом за лінійним законом, і задача про визначення основних параметрів струменя за допомогою результату розв'язання першої задачі та заданої швидкості часток.

Постановка граничних умов визначається з урахуванням тих або інших сил, що діють на волокно, розмірністю моделі, а також похибкою апроксимацій, пов'язаних із розглядом усієї області витягування або її частини.

На завершальній стадії практично всі способи розв'язання є чисельними [3, 4 та інші]. Виняток становлять деякі окремі випадки ізотермічних моделей, а також неізотермічних, коли, наприклад, задається залежність в'язкості від подовжньої координати.

Є низка робіт, в яких використані методи перетворення змінних. Так, у роботі [14] рівняння, записані в наближенні пограничного прошарку, представлені в так званій системі Protean координат, унаслідок чого, розв'язок відшукується для функції струму.

У роботі [16] продемонстровано підхід, заснований на використанні лагранжевих координат при аналізі нестационарного процесу витягування. Підхід дає змогу зводити задачу одновісного розтягу рідкої ниті з вільним розподілом площі поперечного перерізу вздовж усієї довжини ниті відносно задачі про розтяг рівномірного рідкого циліндра, яка загалом вирішується теж чисельно.

Найважливішими процесами деформування при формуванні волокон є: зсув у круговому каналі (течія Пуазейля) і одновісний розтяг [8]. Перший тип течії реалізується у фільсері при витягуванні фільєрним способом, другий – по виходу із фільсера і при витягуванні із заготовки [5].

Усталена течія струменю є прикладом усталеного негомоторного руху, де градієнт швидкості є функцією положення і змінюється уздовж шляху течії. Це не суто поздовжня течія; зміна радіуса по її довжині призводить до появи деяких радіальних складових градієнта швидкості і не рівних нулю складових напруги зсуву. Надійна теорія такої течії для рідин із нелінійною в'язкістю не розроблена; те саме можна сказати і про лінійні вязкопружні і ньютонівські рідини. Проте на випадок, коли зміна радіуса не дуже велика, течія може апроксимувати як квазіпоздовжня, а розподіл швидкості вважається плоским. Усі існуючі теоретичні рішення для вільно розтягваних струменів ґрунтуються на цьому наближенні (про чистий розтяг), яке є більш-менш обґрунтованим залежно від того, яка із зон витягування розглядається.

Вочевидь, зміна радіуса струменя тут найбільша і недооцінка радіальних складових змінних, що описують процес витягування, може дуже викривити картину течії в тій зоні, яка значною мірою визначає характеристику готового волокна.

Висновки

Побудова вискоєфективних волоконних систем зв'язку потребує виготовлення високоякісних волоконних світловодів. Важливим показни-

ком якості є незмінність по довжині їх геометричних розмірів. Традиційно використовувані для опису процесу моделі, в основному одновимірні і квазіодновимірні, характеризуються прийняттям значних і не завжди виправданих спрощень, що часто призводить до помилок. Тому для побудови та ефективного функціонування автоматичних систем управління технологічними процесами витягування волоконних світлопроводів потрібний спосіб розрахунків стаціонарних осесиметричних полів швидкостей і температур, а також форми скломаси на ділянці переходу від заготовки до волоконного світловода. Важливою є розробка алгоритмів розрахунку нестаціонарних процесів: дослідження реакції стаціонарного процесу витягування світлопроводів на збурюючі дії зовнішніх умов формування.

Щоб домогтися прогресу в розумінні механізмів протікання процесу витягування, а також задовільного збігу розрахункових та експериментальних даних можна тільки в результаті двовимірного розгляду обох сторін процесу – гідродинамічної й теплотехнічної.

Список літератури

1. Асланова М. С. Стекланные волокна / М. С. Асланова, Ю. И. Колесов, В. Е. Хасанов и др. ; под ред. Аслановой М. С. – М. : Химия, 1979. – 256 с.
2. Брагинский К. И. Механика процесса вертикального вытягивания стекла / К. И. Брагинский // Стекло и керамика. – 1962. – № 1. – С. 7012.
3. Численные методы исследования течения вязкой жидкости / [Госман А. Д., Пак В. М., Рангель А. К. и др.] . – М. : Мир, 1972. – 324 с.
4. Жаботинский М. Е. Физика формирования волоконных световодов / М. Е. Жаботинский, А. В. Фойгель // ПМТФ. – 1976. – № 2. – С. 167–174.
5. Зябицкий А. Теоретические основы формирования волокон / А. Зябицкий ; пер. с англ. О. К. Перепелкиной и К. Е. Перепелкина. – М. : Химия, 1979. – 504 с.
6. Литвинов В. Г. Движение нелинейно-вязкой жидкости / В. Г. Литвинов. – М. : Наука, 1982. – 376 с.
7. Литвинов В. Г. Растяжение вязко-упругой струи в условиях теплообмена с окружающей средой / В. Г. Литвинов // Мех. Полит. – 1968. – № 3. – С. 540–546.
8. Милдман С. Течение полимеров / С. Милдман ; пер. с англ. ; под ред. А. Я. Малкина. – М. : Мир, 1971. – 259 с.
9. Наумчик В. Д. Квазодномерная модель процесса вытяжки оптического волокна / В. Д. Наумчик // Энергоперенос в конвекторных потоках. – Минск, 1985. – С. 64–76. – Сб. наук. Тр. / ИТМО АН БССР.
10. Рейнер М. Реология / М. Рейнер ; пер. с англ. Н. И. Малинина. – М. : Наука, 1965. – 223 с.
11. Ходаковский М. Д. Производство стеклянных волокон и тканей / М. Д. Ходаковский и др. – М. : Химия, 1973. – 311 с.
12. Glicksman L. R. A prediction of the upper temperature limit for glass fiber spinning // L. R. Glicksman. – Glass Technology. – 1974. – № 15. – P. 16–20.
13. Glarke N. S. Two-dimensional flow under gravity in a jet of viscous liquid / N. S. Glarke // Journal of Fluid Mechanics. – 1968. – 31. – P. 3. – P. 481–500.
14. Green A. E. On the non-linear behavior of fluid jets / A. E. Green // International of Engineering Science. – 1979. – 14. – P. 49–63.
15. Geyling F. T. Basic fluid-dynamic considerations in the drawing of optical fibers / F. T. Geyling // Bell System Technical Journal. – 1976. – 55. – № 8. – P. 1011–1056.

16. Kase S. Studier on melt spinning. Velocity field within the t thread / S. Kase // Journal of Applied Polymer Science. –1974. – 18. – P. 3267–3278.

17. Matovich M.A. Spinning a moltem threnollne//Industrial Engineering Chemistry. Fundamentals / M. A. Matovich, J. R. A. Pearson. – 1969. – 8, № 8. – P. 513–520.

18. Manfre G. Forces acting in the contenuous drawing of glass fibers / G. Manfre // Glass Technology. – 1969. – 10. – № 4. – P. 99–106.

19. Shah Y. T. On the stability of nonisothermal fiber spinning // Industrial Engineering Chemistry. Fundamentals / Y. T. Shah, J. R. A. Pearson. – 1972. – V. 11, № 2. – P. 150–153.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРОЦЕССА ВЫТЯГИВАНИЯ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДОВ

А. П. Зинькевич, В. М. Сафонов, А. М. Нещадим

Аннотация. *Выполнено сравнение существующих моделей вытягивания волоконных световодов на основе их особенностей в следующих аспектах: реологическая модель; изотермичность (неизотермичность); стационарность (нестационарность); учета тех или иных сил в общем балансе сил, действующих на вытягивание волокна; размерность модели; граничные условия; способ нахождения поля скоростей и температур. Определена необходимость двумерного рассмотрения обеих сторон процесса – гидродинамической и теплотехнической.*

Ключевые слова: *заготовка, зоны формирования, реология, конституционные уравнения, баланс сил, полная модель.*

ANALYSIS OF EXISTING HYDRODYNAMIC MODELS OF THE OPTICAL FIBER ATTENUATION PROCESS

A. Zinkevych, V. Safonov, A. Neshchadym

Annotation. *The article is carried out a comparison of existing models drawing optical fibers based on their characteristics in such aspects: rheological model; isothermal (nonisothermality); stationary (non-stationary); consideration of those or other forces in the overall balance of forces acting on the fiber is pulled; the dimension of the model; border conditions; solution method (finding) the velocity and temperature field.*

Key words: *harvesting, formation zone, rheology, constitutive equation, the balance of power, complete model.*