

4. Михлин В. М. Система технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственных машин по результатам диагностирования / В. М. Михлин; и др. – М.: Информагротех, 1995. – 228 с.
5. Положення про профілактичне обслуговування і ремонт рухомого складу автомобільного транспорту України / Міністерство транспорту України. – К., 1994. – 36 с.
6. Бажинов А.В. Научные основы оценки ресурса силовых агрегатов транспортных машин с учетом условий эксплуатации. Дис... докт. техн. наук: 05.22.20 / Бажинов А.В. – Харьков, 2001. – 324 с.
7. Полянський О.С. Формування властивостей надійності автотракторних двигунів у гарантійний і післягарантійний періоди експлуатації. Дис... докт. техн. наук: 05.22.20 / Полянський О.С. Харків 2004. – 381 с.
8. Бондаренко А.Ю. Мониторинг состояния сварных соединений для прогнозирования остаточного ресурса магистральных нефтепроводов. // Техн. диагностика и неразрушаемый контроль. – №1. – 2003. – С. 20-24.
9. Сараєва І.Ю. Удосконалення процесу діагностування циліндро-поршневої групи та герметичності клапанів бензинового двигуна автомобіля. Дис... канд. техн. наук: 05.22.20 / Харків, 2006. – 262 с.
10. Якушенко О.С. Автоматизований моніторинг залишкового ресурсу авіаційних ГТД в експлуатації за критерієм пошкодження робочих лопаток турбіни. Дис... канд. техн. наук: 05.22.14 / Київ, 1999. – 161 с.
11. Мазепа В.О. Обґрунтування експлуатаційних вимог до підбору та експлуатації моторних олів по технічному стану в засобів транспорту. Дис... канд. техн. наук: 05.22.20 / Київ, 2007. – 144 с.
12. Шипильовський Р.Б., Архипов В.С.. Перспективи розвитку діагностики технічного стану тракторів на основі бортових електронних засобів. "Тракторы и сельскохозяйственные машины". – № 7. – 2004. – 325 с.
13. Сухарев Э.А. Эксплуатационная надежность машин. Теория, методология, моделирование: Учебное пособие / Э.А. Сухарев – Ровно, НУВХП, 2006. – 192 с.
14. Черепанов С.С. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве (основы научной организации) / С.С. Черепанов. – М.: Колос, 1978. – 278 с.

УДК 678.057

О.С. Сахаров, д-р техн.наук, В.І. Сівецький, канд.техн.наук, О.Л. Сокольський канд.техн.наук,
Н.М. Нікітенко, студ., М.С. Кушнір, студ., А.А. Лизогубенко, студ.
НТУ України «Київський політехнічний інститут», м.Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗМІШУВАННЯ МОДЕЛЬНИХ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН

Разработана математическая модель массообмена при течении вязких жидкостей. Проведено численное моделирование с использованием метода конечных элементов задачи смешения вязких жидкостей в зазоре между двумя цилиндрами, один из которых вращается. Приведены некоторые закономерности распределения скоростей и концентраций.

The mathematical model of mass-transfer at the flow of viscid liquid is developed. The numeral design with the use of finite elements method of task of mixing of viscid liquids in a gap between two cylinders, one of which is revolved is modeled. Some conformities to the law of distributing of speeds and concentrations are resulted.

Вступ

При виробництві і переробці полімерних матеріалів у більшості випадків в полімер доводиться вводити такі добавки, як стабілізатори, наповнювачі, барвники, пластифікатори та інші речовини. Для ефективного проведення цих процесів важливо знати основні закономірності процесів змішування.

Змішування високов'язких рідин є наслідком деформації зсуву, у результаті якого відбувається збільшення поверхні поділу компонентів і перетворення первісного їхнього розподілу у випадковий неупорядкований розподіл.

Відомі принципи моделювання процесів змішування дають адекватні результати в каналах елементарної форми за спрощених умов, але не дають змоги аналітично розрахувати параметри течії та змішування в каналах складної форми, якими є канали реальних змішувальних пристроїв.

В той же час актуальною є задача розрахунку параметрів течії та показників ефективності змішування при використанні різних типів змішувачів, а також оптимізації їх конструкцій.

Постановка задачі

Основне призначення змішувального обладнання – забезпечення одержуваної термопластичної композиції необхідної якості змішування, яка пов'язана з кількісним описом стану суміші. У більшості випадків кожний з розподілених у матриці компонентів суміші можна уявити як множину умовних частинок певного розміру.

Як міру відхилення реальної суміші від стану ідеальної використовують такі критерії, як індекс змішування, критерій Лейсі, інтенсивність розділу та коефіцієнт неоднорідності. За допомогою перших двох критеріїв визначають ступінь наближення до граничного технологічно можливого стану випадкової суміші, одержуваної за умови нескінченно тривалого оброблення. Два останні критерії представляють собою порівняння з ідеальним станом суміші – системою з рівномірно розподіленими компонентами.

Існуючі до цього часу аналітичні методики дозволяють реалізувати задачу розрахунку енергосилових параметрів змішувального обладнання та показників якості змішування тільки для двох граничних умов: течія в круглому каналі і течія між двома нескінченими пластинами.

Дослідження поведінки неньютонівських, в тому числі багатофазних і багатокомпонентних середовищ пов'язане з постановкою і розв'язанням найбільш складних задач механіки і термодинаміки, що обумовлено складністю та багатогранністю фізичних явищ, великою кількістю факторів, що впливають на процеси, що розглядаються, і які не завжди можна визначити з достатньою точністю і т. д. Моделювання таких складних процесів в багатокомпонентних середовищах на сучасному рівні можливо лише з залученням комп'ютерної техніки і чисельних методів.

Для адекватного описання взаємодії тіл різної природи використовуються загальні співвідношення нелінійної механіки суцільних середовищ (МСС), які базуються на фундаментальних законах збереження імпульсу та балансу механічної енергії, збереження енергії та маси [1]. Це вимагає розробки універсальних нелінійних моделей та методів їх дослідження, які можуть бути побудовані тільки на базі методів чисельного аналізу, орієнтованих на потужну обчислювальну техніку. До найбільш ефективних чисельних методів розв'язання складних реологічних і динамічних задач механіки суцільних середовищ належить метод скінчених елементів (МСЕ), який дозволяє на базі комп'ютерної техніки моделювати і досліджувати різні технологічні процеси та конструктивні елементи обладнання [2-4].

Математична модель та результати дослідів

Рух суміші та її складових розглядається в даній роботі в рамках механіки суцільних середовищ з наступними припущеннями:

1. Суміш складається з окремих взаємно проникливих компонент, що заповнюють один і той же об'єм. Кожна компонента є неперервним однорідним середовищем (континуумом), стан якого безпосередньо визначається власними параметрами стану.

2. Для кожної компоненти середовища задовольняються закони збереження маси, імпульсу та енергії. Маса, імпульс та енергія суміші дорівнює сумі мас, імпульсів та енергій її компонент. Взаємодія між компонентами суміші не змінює загальну величину маси, імпульсу та енергії суміші.

Для розв'язання задач змішування спочатку розв'язується термомеханічна задача розподілу швидкостей та стану рідини, а потім на її основі – задача масообміну шляхами дифузії та конвекції.

Кінематика руху багатофазного середовища досліджується з позиції Ейлера, тобто всі подальші висновки базуються на розгляді не окремих елементів середовища, а того що відбувається в даній точці простору з координатами x^1, x^2, x^3 . Геометричні координати простору x^i і час t носять назву змінних Ейлера. Рух в розумінні Ейлера вважається відомим, якщо всі невідомі величини (переміщення, швидкості, прискорення і т. д.) визначені як функції x^i і t . При фіксованих x^i і змінному t ці функції описують зміну з часом в даній точці простору основних параметрів, що належать різним частинкам середовища, які проходять через цю точку. Швидкість руху окремої фази визначається по витраті її за одиницю часу через одиницю площі перерізу каналів, де рухається фаза.

Представимо основні співвідношення МСС у вигляді системи диференціальних рівнянь в ейлеревих координатах для стаціонарних процесів:

- рівняння руху:

$$\nabla \cdot \sigma + \vec{f} = \rho \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \vec{v},$$

- рівняння збереження енергії:

$$c_T \vec{v} \cdot \vec{\nabla} T = \vec{\nabla} \cdot (\lambda_T \vec{\nabla} T) + \sigma \cdot \zeta + Q_{(V)},$$

- рівняння дифузії:

$$\phi \nabla^2 C = \vec{v} \cdot \vec{\nabla} C,$$

- рівняння збереження маси:

$$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0,$$

де ρ – маса одиниці об'єму (густина) матеріалу; \vec{v} – вектор швидкості точки тіла; \vec{f} – вектор зовнішньої сили, що діє на одиницю об'єму тіла; σ – тензор напружень; $\vec{\nabla} \vec{v}$ – градієнт вектора швидкості; $Q_{(V)}$ – віднесена до одиниці маси швидкість зовнішнього об'ємного притоку тепла разом з іншою немеханічною енергією; E – питома внутрішня енергія (внутрішня енергія одиниці маси тіла), C – концентрація обраного компонента; ϕ – коефіцієнт дифузії.

До даної системи рівнянь необхідно також додати геометричні рівняння Коші:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left(\vec{\nabla} \vec{u} + (\vec{\nabla} \vec{u})^T \right), \quad \zeta = \frac{1}{2} \left(\vec{\nabla} \vec{v} + (\vec{\nabla} \vec{v})^T \right),$$

які зв'язують тензор деформацій ε з вектором переміщень \vec{u} та тензор швидкостей деформацій ζ з вектором швидкостей \vec{v} .

Для замикання системи рівнянь до неї треба приєднати рівняння стану:

$$\phi(\sigma, \varepsilon, \zeta, T) = 0,$$

які дозволяють описати основні властивості матеріалів реальних тіл.

Рівняння МСЕ для масопередачі будуються на основі матриць 8-кутних скінченних елементів (СЕ) [2,3], що характеризують перенесення речовин за рахунок дифузії і руху середовища. Слід зазначити, що в разі моделювання процесів змішування розплавів одних полімерів з іншими, або полімерів з дисперсними компонентами, дифузія відіграє незначну ролі і її можна знехтувати.

Таблиця. 1

Дані дослідження модельних рідин 4%, 5% водного розчину ПВС та 5% водного розчину КМЦ

| № П/П | Діапазон градієнтів швидкостей $\dot{\gamma}$, с^{-1} | Напруга зсуву τ , Па | Ефективна в'язкість μ , $\text{Па}\cdot\text{с}$ |
|--|---|---------------------------|--|
| 5% водний розчин КМЦ, $t=20^{\circ}\text{C}$, індекс течії $n=0,756$ | | | |
| 1 | 5,4 | 2,24 | 0,414 |
| 2 | 9 | 3,36 | 0,373 |
| 3 | 16,2 | 5,6 | 0,345 |
| 4 | 27 | 7,8 | 0,290 |
| 5 | 48,6 | 11,8 | 0,242 |
| 6 | 81 | 17,9 | 0,220 |
| 7 | 146 | 28 | 0,191 |
| 8 | 243 | 44,2 | 0,181 |
| 9 | 427 | 66,4 | 0,155 |
| 10 | 729 | 94 | 0,128 |
| 11 | 1312 | 138,3 | 0,105 |
| 4% водний розчин ПВС, $t=17^{\circ}\text{C}$, індекс течії $n=0,9428$ | | | |
| 1 | 243 | 1,05735 | 0,0043 |
| 2 | 364,5 | 1,49439 | 0,0041 |
| 3 | 437,4 | 1,76930 | 0,0040 |
| 4 | 656 | 2,60813 | 0,0039 |
| 5 | 729 | 2,89009 | 0,0039 |
| 6 | 1312 | 5,14577 | 0,0039 |
| 5% водний розчин ПВС, $t=20^{\circ}\text{C}$, індекс течії $n=0,7034$ | | | |
| 1 | 9 | 0,56 | 0,062 |
| 2 | 16,2 | 0,94 | 0,058 |
| 3 | 27 | 1,4 | 0,052 |
| 4 | 48,6 | 1,96 | 0,040 |
| 5 | 81 | 3,08 | 0,038 |
| 6 | 46 | 4,76 | 0,033 |
| 7 | 243 | 5,88 | 0,024 |
| 8 | 437 | 8,86 | 0,020 |
| 9 | 729 | 12,6 | 0,017 |
| 10 | 1312 | 21,3 | 0,016 |

Апробація складеної математичної моделі здійснювалась при чисельному моделюванні змішування забарвленої та незабарвленої модельних рідин в коаксіальному зазорі між двох циліндрів, один з яких (зовнішній) нерухомий, а внутрішній – рухомий. Початкову концентрацію барвника приймаємо рівною 1. При виконанні чисельних експериментів кількість барвника вважаємо такою, що незначно впливає на властивості рідини, тобто розв'язок механічної задачі здійснюється без урахування концентрації. Властивості рідин вважаємо лінійними. В якості модельної рідини для натурного експерименту використовувались водні розчини карбоксиметилцелюлози (КМЦ) і полівінілового спирту (ПВС), реологічні властивості яких дослідженні в [5] і представлені в табл. 1. Робоча частина коаксіального зазору складається з двох коаксіальних циліндрів, внутрішній діаметр нерухомого циліндра - 80мм і зовнішній діаметр обертового циліндра - 70мм. Довжина робочого коаксіального зазору між циліндрами складає 300мм. Швидкість обертання внутрішнього циліндра – 60 об/хв. Швидкість осьової подачі рідин в коаксіальний зазор складає 300мм/хв. Є можливість регулювання швидкостей обертання та подачі. В заданий сектор коаксіального зазору з такою самою швидкістю, що й основний потік модельної рідини подається також забарвлена рідина.

Також для перевірки адекватності математичної моделі були виконані натурні експерименти, які проводилися на лабораторній установці рис.1.

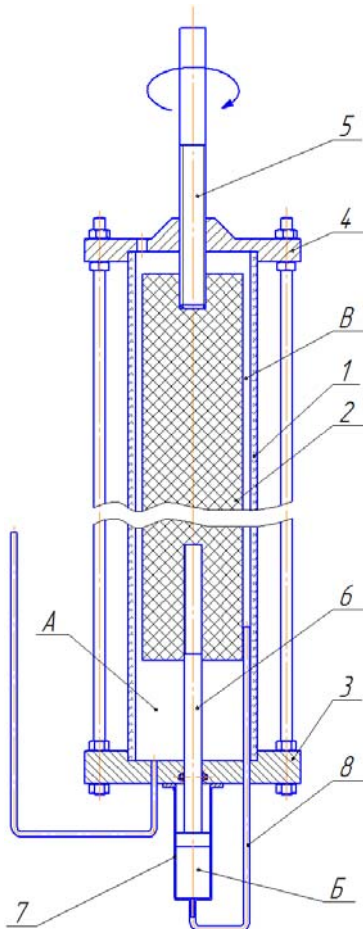


Рис. 1 Лабораторна установка
 1 – зовнішній нерухомий циліндр;
 2 – внутрішній рухомий циліндр;
 3 – фланець нижній; 4 – фланець
 верхній; 5 – привідний гвинт; 6 – шток;
 7 – циліндр; 8 – трубка

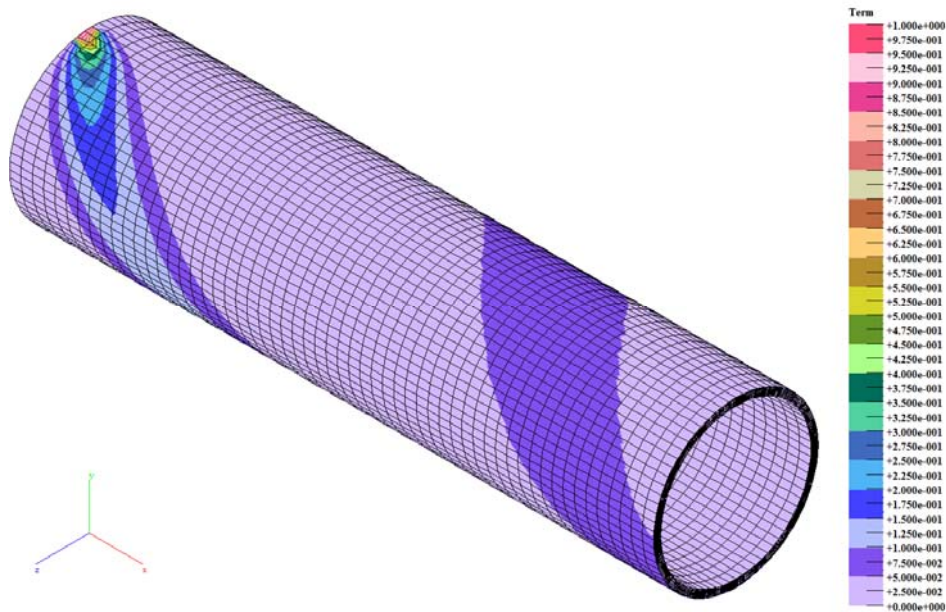
Лабораторна установка призначена для виконання натурального експерименту зі змішування модельних рідин, який полягає в тому, що в коаксіальний зазор, який розташований між зовнішнім нерухомим циліндром 1 та рухомим циліндром 2, подається модельна рідина з заданою швидкістю. Одночасно через трубку 8 з додаткового циліндра 7 в частину коаксіального зазору подається забарвлена модельна рідина. Діаметр плунжера додаткового циліндра вибрано таким чином, щоб забезпечити рух забарвленої рідини з такою ж швидкістю, що й незабарвленої рідини в коаксіальний зазор між циліндрами. Це реалізується так, при обертанні привідного гвинта 5 який передає обертовий і поступальний рух у осьовому напрямі внутрішньому обертовому циліндру 2 внаслідок чого його нижня частина якого витісняє модельну рідину з порожнини А в коаксіальний зазор В. Одночасно шток 6 витісняє забарвлену рідину з порожнини Б циліндра 7 по трубці 8 в кільцевий сегмент заданих розмірів коаксіального зазору В. В наслідок обертового і вісьового руху внутрішнього циліндру 2 відбувається рух обох рідин в коаксіальному зазорі по спіральній траєкторії.

Виконання зовнішнього циліндра 1 скляним дозволяє візуально контролювати процес змішування і фіксувати його на фото- і відео засоби.

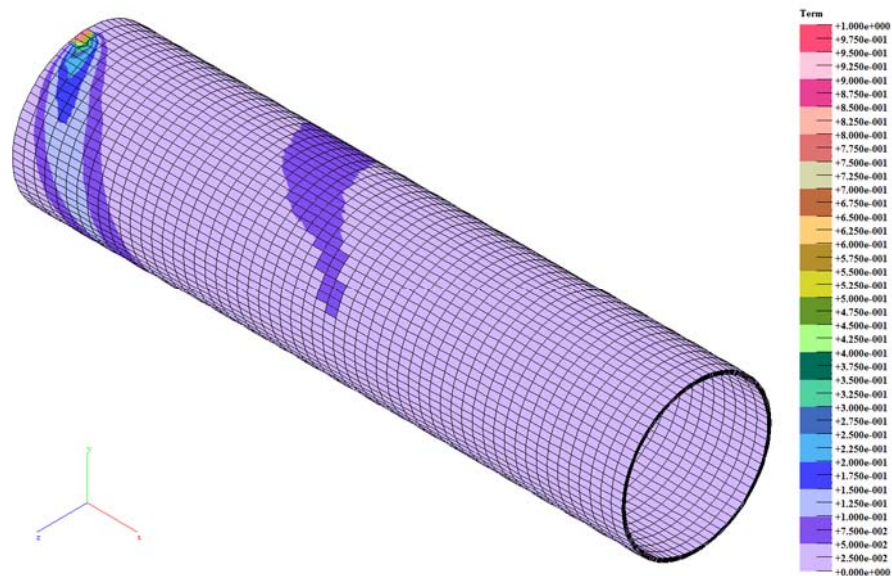
Результати чисельних досліджень та натурних експериментів показали, що в наслідок обертового руху одного із циліндрів спостерігається рух рідин по спіралі

(рис. 2). Водночас межі сегменту, в якому розміщується суміш забарвленої і незабарвленої модельної рідини поступово розширюються по мірі їх руху вздовж коаксіального зазору, а концентрація барвника в забарвленій рідині зменшується, тобто спостерігається змішування забарвленої модельної рідини з незабарвленою.

Ширина забарвленої області під час руху збільшується, причому неоднаково по висоті коаксіального зазору. На радіусах, ближчих до зовнішнього циліндра, що нерухомий, ширина забарвленої області збільшується швидше. На радіусах, позлизу внутрішнього циліндра, ближче до виходу з каналу забарвлена область утворює повне коло. Отримані в результаті чисельного моделювання результати корелюють з відомими результатами аналітичних обчислень та експериментальних досліджень [4].



a



б

Рис. 2. Розподіл рідин в коаксіальному зазорі: а – поблизу нерухомого циліндра, б – на поверхні, яка ближче до рухомого циліндра

Висновок

Отримані результати показують, що створена математична модель та система розрахунків дозволяє моделювати розподіл швидкостей руху в'язких рідин і процеси їх змішування з іншими компонентами та між собою. Чисельне моделювання дозволяє отримувати такі дані, які важко або неможливо здобути експериментально або шляхом аналітичних обчислень, а також проводити проектні розрахунки змішувального обладнання, наприклад розрахунок необхідної для досягнення заданої рівномірності розподілу компонентів довжини змішувальної зони, а також дослідження теплообміну під час процесу змішування з врахуванням дисипативної складової.

Список літератури

1. Седов Л.И. Механика сплошной среды.// – Москва :Наука, т.1 (т.2) – 1970, 492 (568) с.
2. Киричевский В. В., Сахаров А. С. Нелинейные задачи термомеханики конструкций из слабосжимаемых эластомеров. – К.: Будівельник, 1992. – 216 с.
3. Метод конечных элементов в механике твердых тел. / Под общ. ред. А.С. Сахарова и И.Альтенбаха – К.: Вища школа, 1982. – 480 с.
4. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров.- М.: Химия, 1977, 461 с.
5. Сівецький В.І., Кривошесв В. С., Сахаров О. С., Кушнір М. С., Нікітенко Н. М. Реологічні властивості модельних рідин.Тези доповідей науково-практичної конференції студентів, аспірантів та науковців кафедри хімічного, полімерного і силікатного машинобудування. Ресурсоенергозберігаючі технології і обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів. К., 2010. - ст.25.