

<https://doi.org/10.30857/2786-5371.2024.3.8>

УДК 678.7:
661.1:615.4

¹ВАХІТОВ Р. А., ²КАЛАФАТ К. В., ²ТАРАН Н. А.,
^{1,2}БЕССАРАБОВ В. І., ²РАСНКО Г. Ф., ²ШОЛОГОН В. І.,
^{2,3}КОРОТКИХ М. І., ²ВАХІТОВА Л. М.

¹ Київський національний університет технологій та дизайну, Україна

² Інститут фізико-органічної хімії та вуглехімії ім. Л.М. Литвиненка НАН України, Київ, Україна

³ Інститут органічної хімії НАН України, Київ, Україна

ЕТЕРИ ЦЕЛЮЛОЗИ ЯК МОДИФІКАТОРИ РЕОЛОГІЇ ВОГНЕЗАХИСНИХ ФАРБ РЕАКТИВНОГО ТИПУ

Мета. Дослідження впливу етерів целюлози на реологічні властивості інтумесцентної вогнезахисної фарби та визначення структур загусників, які максимально удосконалюють експлуатаційні властивості лакофарбового матеріалу.

Методика. За модельну інтумесцентну систему обрано вогнезахисне покриття реактивного типу, яке містить у своєму складі поліфосфат амонію, меламін, пентаеритрит, діоксид титану та полімер. У якості полімерної складової вивчали водні дисперсії співполімерів вінілацетату від різних виробників. Як целюлозні загусники використовували гідроксіетил- та гідроксипропіл етери целюлози, які визнані найбільш вдалим модифікаторами реології фарб на основі вінілацетатних полімерів. В'язкість вогнезахисних композицій вимірювали на віскозиметрі Брукфілда, розрахунок реологічних параметрів здійснювали за рівнянням Кассона.

Результати. В дослідженні визначено вплив природи целюлозного загусника та полімеру на реологічні параметри, відповідальні за зберігання та нанесення лакофарбового матеріалу. Встановлено, що структура етеру целюлози має значення при регулюванні в'язкості досліджених інтумесцентних композицій. Найбільші значення в'язкості демонструє високомолекулярна гідроксіетилметил целюлоза (Bertocoll EM 7000 FQ). Гідроксипропіл метил целюлози є менш ефективними загусниками інтумесцентних фарб складу поліфосфат амонію/меламін/пентаеритрит/полімер. Природа полімерної складової, у свою чергу, майже не впливає на в'язкість досліджених композицій, що не містять загусника чи містять Bertocoll EM 7000 FQ. Для вивчених полімерних складових інтумесцентних композицій спостерігаються практично ідентичні реологічні профілі. Розрахунок реологічних параметрів – в'язкості при високих швидкостях зсуву, напруги зсуву, межі текучості із залученням рівняння Кассона дозволяє зробити висновок, що загущення вогнезахисних фарб інтумесцентного типу етерами целюлози є ефективним для запобігання седиментації при зберіганні та майже не впливає на збільшення товщини шару фарби, що можливо нанести за один прохід. Шляхом випробувань вогнезахисної ефективності покриттів в умовах міні-печі показано, що присутність етерів целюлози не зменшує вогнестійкість металевих пластин.

Наукова новизна. Вперше визначено вплив структури целюлозних загусників на реологічні параметри вогнезахисної фарби інтумесцентного типу, відповідальні за зберігання та нанесення.

Практична значимість. Отримані результати дозволяють визначити доцільні структури етерів целюлози, які можуть застосовуватися у промисловому виробництві інтумесцентних фарб.

Ключові слова: вогнезахист; покриття реактивного типу; в'язкість вогнезахисних фарб; етери целюлози; реологічний профіль.

Вступ. Вогнезахисні реактивні (інтумесцентні, такі, що спучуються) покриття для металевих конструкцій є найбільш поширеними серед засобів вогнезахисту, що застосовуються у світовій практиці пожежної безпеки [1, 2]. За даними аналітичних досліджень світового ринку вогнезахисту з 2020 по 2027 роки для інтумесцентних покриттів прогнозується річний темп зростання на 5,2% [3]. Така ситуація пояснюється, перш за все, тим, що саме тонкошарові покриття не порушують архітектурні форми та дизайнерські проекти, які спираються на естетичні можливості та переваги сталі у будівництві [1, 4]. Відмічається [3, 5], що в європейських країнах за останні 20 років спостерігається зростання застосування

покриттів реактивного типу з 50 до 80%. Така ситуація є наслідком систематичних та направлених наукових досліджень з питань удосконалення властивостей та ефективності інтумесцентного вогнезахисту [6, 7]. Більшість реактивних фарб, які випускаються промислово, містять у своєму складі обов'язкову тріаду компонентів (поліфосфат амонію (APP), меламін (MA), пентаеритрит (PE)), пігмент (діоксид титану TiO_2), полімер, антипірени, наповнювачі, реологічні домішки тощо [8, 9]. Збалансований склад забезпечує ефективність вогнезахисної дії, універсальність, легкість та швидкість нанесення, естетичні та експлуатаційні характеристики покриттів реактивного типу.

Розвиток інновацій та наукових розробок у галузі інтумесцентних технологій вогнезахисту обумовив за останні 10 років зростання показника межі вогнестійкості сталевих конструкцій R з 90 до 180 хв. Звичайно це призводить до збільшення товщини реактивного покриття, яка може забезпечити відповідне значення R. Аналіз технічної документації покриттів, які присутні на ринку вогнезахисту України, демонструє, що в середньому для забезпечення межі вогнестійкості сталевій конструкції R180 товщина вогнезахисного покриття має бути не меншою за 8–10 мм. Для отримання такої товщини необхідно нанести не менше 15 шарів фарби, бо згідно з технічними рекомендаціями виробників, товщина мокрого шару не може перевищувати 0,7–1,2 мм. Багаторазове нанесення шарів для досягнення регламентованої товщини реактивного покриття значно підвищує вартість вогнезахисної обробки об'єкта будівництва, а також робить металеве будівництво економічно невиправданим і надає перевагу одноманітним бетонним конструктивам [10–12]. Одним із наукових підходів збільшення товщини покриття, яке можливо наносити за один прохід без супутніх дефектів (стікання та провисання фарби, підтрьоків, раковин, здуттів та відшарування від поверхні) є удосконалення реологічних властивостей фарби. В першу чергу це стосується пошуку систем загущення лакофарбового матеріалу [13, 14] для підвищення тиксотропних властивостей та збільшення в'язкості в області високих зсувів, які спостерігаються при нанесенні фарби механізованими методами.

Постановка завдання. У водорозчинних полімерних композиціях реологія є ключовою властивістю для зберігання, ефективного виробництва, транспортування та нанесення фарб. Відповідний контроль реологічних властивостей (в'язкості, текучості, седиментації, стікання та провисання) досягається шляхом правильного вибору загусника чи системи загусників лакофарбового продукту. Інформація про методи загущення водно-дисперсійних вогнезахисних композицій в науковій літературі відсутня. Дані, отримані з патентного пошуку, дозволяють визначити в наведених рецептурах реактивних засобів вогнезахисту лише одну речовину, відповідну за реологічну поведінку. Це целюлозні загусники (естери целюлози), ефективність яких полягає у здатності «знерухомлювати» воду та запобігати седиментації твердих компонентів інтумесцентної системи.

Метою дослідження є дослідження впливу естерів целюлози на реологічні властивості інтумесцентної вогнезахисної фарби та визначення структур загусників, які максимально удосконалюють експлуатаційні властивості лакофарбового матеріалу.

Матеріали та обладнання. Для приготування фарб застосовували поліфосфат амонію Exolit AP 422 (Clariant, Німеччина), пентаеритрит Charmor PM40 від Perstorp Holding AB (Швеція), меламін виробництва Borealis Agrolinz Melamine GmbH (Австрія). Як пігмент використовували діоксид титану марки Ti-Pure R-902 (DuPont, США). Полімерні дисперсії співполімерів вінілацетату різних виробників представлені у табл. 1.

Вибір полімерів для досліджень продиктований, перш за все, тим, що саме ці продукти найчастіше використовуються для виготовлення європейських засобів реактивного вогнезахисту. На жаль, виробники вінілацетатних дисперсій не розкривають відповідні структурні формули полімеру, склад стабілізаційних систем, співвідношення мономерів у

полімерних ланцюгах. Властивості вихідних полімерних дисперсій за даними відкритої та доступної технічної документації наведені у табл. 2.

Таблиця 1

Перелік полімерних компонентів інтумесцентних систем

Хімічна структура співполімеру	Скорочена назва	Виробник
Вінілацетат-етилен Vinnapas® EZ 3010	EZ 3010	Wacker, США
Вінілацетат-етилен Dairen DA 101	DA 101	Dairen Chemical Corporation, Китай
Вінілацетат-етилен-вініловий етер Vinnapas® EZ 3112	EZ 3112	Wacker, США
Вінілацетат-етилен-вінілверсатат Exodisp V2209	V2209	EOC Group, Бельгія

Таблиця 2

Властивості вінілацетатних полімерів

Скорочена назва	Вміст нелетких речовин, %	В'язкість, 25 °C, Па·с	pH
EZ 3010	54–56	2,7–5,9	4,5–5,5
DA 101	54–56	1,5–2,5	4,5–6,5
EZ 3112	49–51	1,8–4,0	4,5–5,5
V2209	54–56	3,4–4,5	3,5–4,5

Незважаючи на різний мономерний склад та деякі розбіжності у характеристиках полімерних компонентів (табл. 2), ІЧ-спектри, що відповідають дослідженим співполімерам, є майже ідентичними та такими, що не дозволяють визначити суттєву різницю їх хімічних структур залученим спектральним методом (рис. 1).

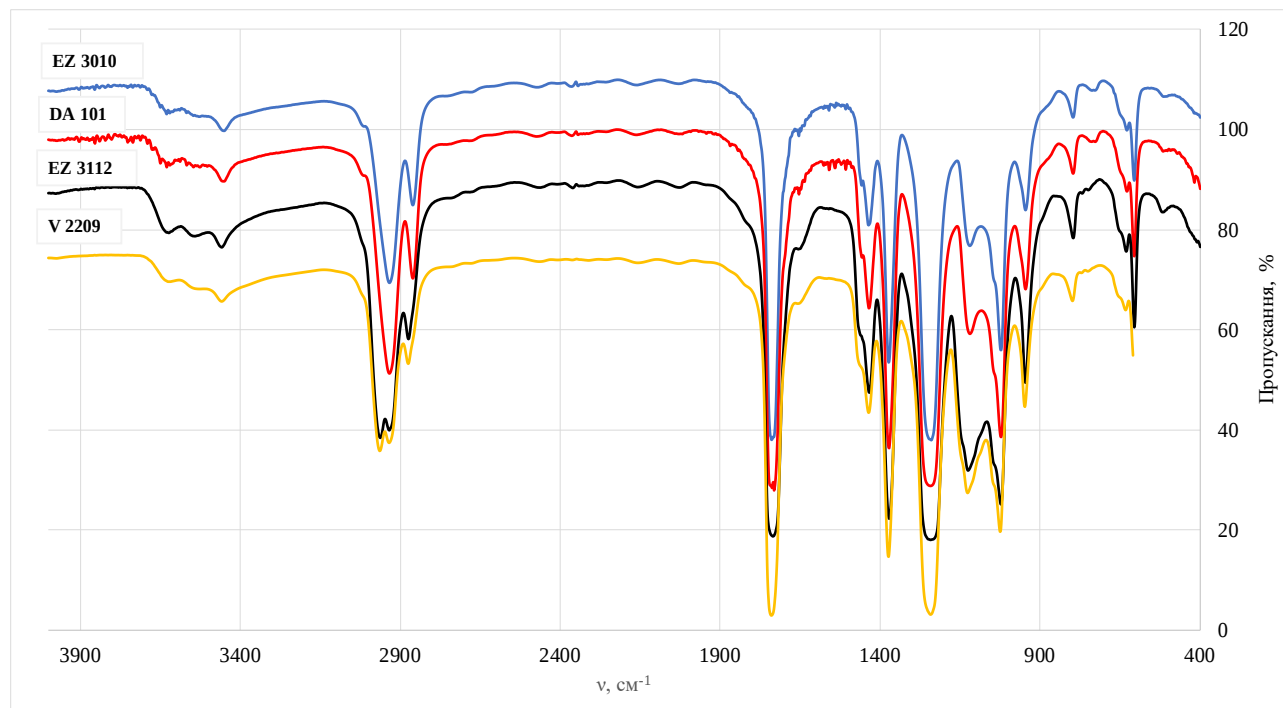


Рис. 1. ІЧ-спектри плівок вінілацетатних співполімерів

Целюлозні загусники представлені товарними зразками етерів целюлози та наведені у табл. 3. Були досліджені найбільш поширені у виробництві водно-дисперсійних фарб целюлозні загусники: гідроксіетилметил целюлоза (HEMC-1 та HEMC-2, табл. 3) та гідроксипропілметил целюлоза (HPMC-1 та HPMC-2).

Таблиця 3

Етери целюлози, що використані в дослідженні¹⁾

Торговельна марка	Назва	pH	В'язкість при 20 °С, 1% розчин, Па с
Bermocoll M 30, HEMC-1	Гідроксіетилметил целюлоза	7,0–8,0	1,5–2,5
Bermocoll EM 7000 FQ, HEMC-2	Гідроксіетилметил целюлоза	5,0–7,0	3,5–5,5
Wekcelo MAT 2024, HPMC-1	Гідроксипропілметил целюлоза	5,0–8,0	3,5–5,0
Mecellose FMC 8821, HPMC-2	Гідроксипропілметил целюлоза	7,0–10,0	4,5–5,5

¹⁾За даними технічної документації виробника продукту.

Для приготування інтумесцентних композицій в лабораторний дисольвер з об'ємом робочої чаші 1 дм³ поміщали 200 г води, необхідну кількість целюлозного загусника та гідроксид натрію для регулювання pH в інтервалі 8–9. Суміш перемішували протягом 30 хв до утворення прозорого гелю. Додавали компоненти інтумесцентної системи: 330 г поліфосфату амонію (APP), 110 г пентаеритриту (PE), 110 г меламіну (MA), 90 г оксиду титану (TiO₂). Суміш перемішували протягом 30 хв. при швидкості фрези 900–1000 об/хв. До отриманої пасти додавали 200 г відповідної водної дисперсії полімеру (табл. 1) та перемішували при швидкості фрези 500–600 об/хв. протягом 30 хв. Готову інтумесцентну фарбу зберігали у герметичній ємності.

Дослідження впливу етерів целюлози на реологічні властивості інтумесцентних композицій здійснювали на моделях вогнезахисних водних фарб, позначення яких представлені у табл. 4. За виключенням компонентів, зазначених у табл. 4, досліджені склади IFR мали спільну інтумесцентну основу APP/MA/PE/TiO₂/вода у співвідношенні 3:1,1:1,1:0,9:2, до якої додавали 2 ваг. част. відповідного полімеру. Вміст целюлозних загусників був незмінним – 1% від маси інтумесцентної фарби.

Таблиця 4

Позначення вогнезахисних фарб з різними целюлозними загусниками

Назва фарби	Целюлозний загусник	Полімер
IFR(EZ 3010)	-	EZ 3010
IFR(DA 101)	-	DA 101
IFR(EZ 3112)	-	EZ 3112
IFR(V 2209)	-	V 2209
IFR1	Bermocoll M 30, HEMC-1	EZ 3010
IFR2	Bermocoll EM 7000 FQ, HEMC-2	EZ 3010
IFR3	Wekcelo MAT 2024, HPMC-1	EZ 3010
IFR4	Mecellose FMC 8821, HPMC-2	EZ 3010
IFR5	Bermocoll EM 7000 FQ, HEMC-2	DA 101
IFR6	Bermocoll EM 7000 FQ, HEMC-2	EZ 3112
IFR7	Bermocoll EM 7000 FQ, HEMC-2	V 2209

Дослідження реологічних властивостей інтумесцентних композицій здійснювали на ротаційному реометрі Brookfield DV-III. Вогнезахисну ефективність IFR-композицій, представлених у табл. 4, визначали в умовах стандартної пожежі у міні-печі, як описано в [15].

Результати дослідження. В'язкість (η , Па с) інтумесцентних композицій IFR та IFR1 – IFR7 (табл. 4) вимірювали на віскозиметрі Brookfield DV-III, який забезпечує максимальну швидкість обертів шпинделю 250 об/хв. (швидкість зсуву $\gamma = 52,25 \text{ с}^{-1}$).

Вплив структури целюлозних загусників на реологію інтумесцентної фарби вивчали на прикладі композицій, що містять полімерну дисперсію вінілацетат-етилен (Vinnapas® EZ 3010) IFR – IFR4 (табл. 4) у відсутності (IFR (EZ 3010), табл. 4) та присутності 1% целюлозного загусника (табл. 3). На рис. 2 представлені значення динамічної в'язкості композицій IFR (EZ 3010) та IFR1 – IFR4, що були визначені із застосуванням шпинделю N6 в діапазоні швидкостей обертів шпинделю 10 с^{-1} – 250 с^{-1} при температурі $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в ємності 1 дм^3 з діаметром 120 мм. Маса фарби при вимірюваннях в'язкості завжди дорівнювала $(1000 \pm 100) \text{ г}$.

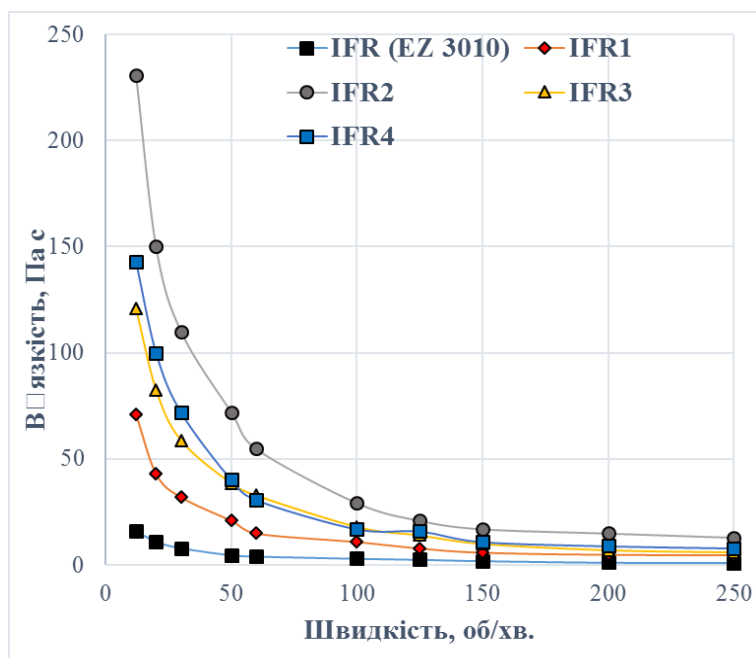


Рис. 2. Значення динамічної в'язкості вогнезахисних інтумесцентних композицій IFR (EZ 3010) та IFR1 – IFR4

Продемонстрована на рис. 2 залежність динамічної в'язкості композицій IFR (EZ 3010) та IFR1 – IFR4 від швидкості обертів шпинделю свідчить, мінімум, про такі безсумнівні факти:

- досліджені фарби є неньютонівськими рідинами та характеризуються псевдопластичною течією: в'язкість суттєво зменшується зі збільшенням швидкості зсуву;
- значення динамічної в'язкості є чутливим до структури целюлозного загусника особливо в інтервалі низького зсуву (до 150 об/хв.);
- додавання ефективного целюлозного загусника в вогнезахисну фарбу складу APP/MA/PE/TiO₂/полімер майже у 30 разів підвищує в'язкість вихідної фарби IFR (EZ 3010).

В табл. 5 наведені значення $\Delta\eta$ – відношення значень в'язкості IFR2 та IFR1 у присутності НЕМС-2 (ефективне загущення) та НЕМС-1 (незначне загущення) до значення в'язкості IFR (EZ 3010) без загусника (рис. 2) протягом зростання швидкості зсуву.

Вінілацетатні полімери, залучені у цьому дослідженні (табл. 2), мають ідентичні структури (рис. 1), а їх дисперсії у воді характеризуються близькими значеннями рН (4,5–5,5). Тим не менш, розчини полімерних дисперсій у присутності целюлозного загусника з високим

ступенем загущення НЕМС-2 (1% від маси полімеру) демонструють різницю реологічних профілів в інтервалі 10-250 об/хв. (рис. 3).

Загальною тенденцією за даними рис. 3 є той факт, що полімери вінілацетат-етилен (EZ 3010, DA 101) демонструють більшу схильність до загущення, ніж їх гідрофобні аналоги EZ 3112 та V2209.

Таблиця 5

**Відношення значень в'язкості IFR2 та IFR1 до значень в'язкості IFR (EZ 3010) ($\Delta\eta$)
в залежності від швидкості обертів шпинделя**

Швидкість, об/хв.	10–30	50–100	60–100	120–250
$\Delta\eta$ для IFR2	24–29	15–22	15–21	11–12
$\Delta\eta$ для IFR1	7–8	5–6	5	5–6

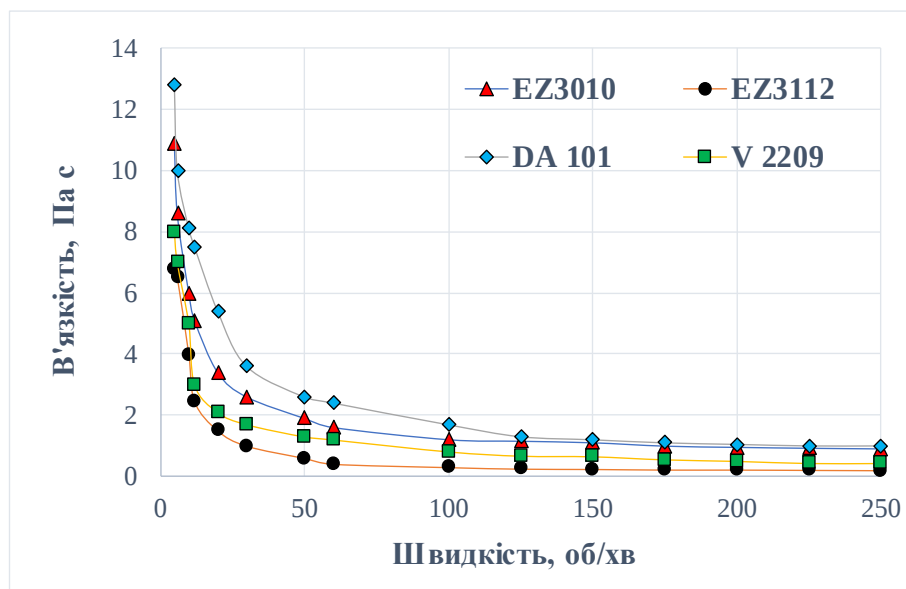


Рис. 3. Значення динамічної в'язкості полімерних дисперсій у присутності Bermocoll EM 7000 FQ

Вплив полімеру на в'язкість інтумесцентної фарби IFR у відсутності целюлозного загусника продемонстровано на рис. 4а. За представленими даними слід констатувати невелику різницю визначених значень в'язкості: 14–16 Па·с (10 об/хв.), 4–6 Па·с (50 об/хв.), 1–2 Па·с (200 об/хв.). Очікувано, що структура полімеру не впливає й на в'язкість фарб IFR2 та IFR5-IFR7, загущених НЕМС-2 (рис. 4б).

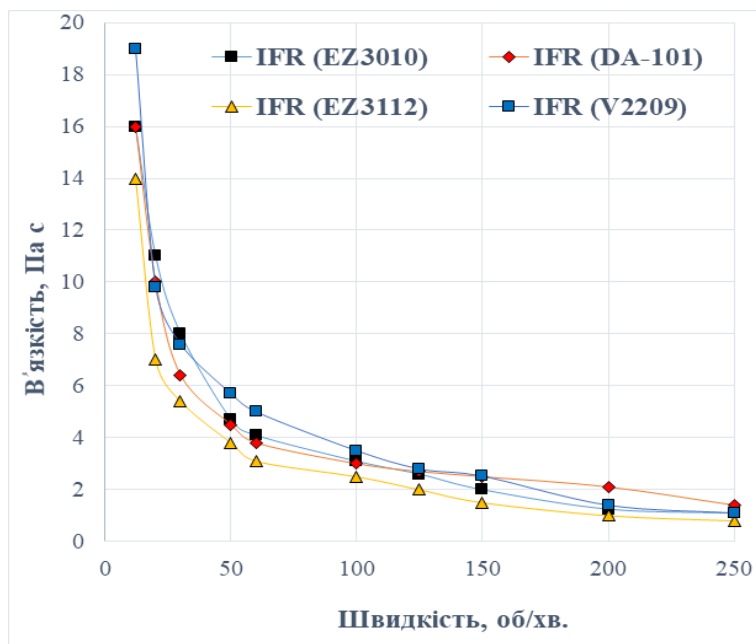
Така ситуація пояснюється високим наповненням композицій IFR нелеткими речовинами (70%), серед яких частка полімерного сполучного складає лише 10%. В той же час, механізм загущення естерами целюлози полягає у зв'язуванні води IFR, якої в досліджуваних композиціях приблизно однакова кількість – 30%. Цей факт обумовлює залежність в'язкості такої складної багатокомпонентної системи лише від ефективності загусника. В свою чергу, мірою ефективності етеру целюлози є його молекулярна маса, що, наприклад, обумовлює в'язкість 1% розчину (табл. 3).

Реологія лакофарбового матеріалу визначає умови та час зберігання, товщину нанесення і поведінку шару покриття під час його формування. Як основні реологічні параметри фарби слід розглядати:

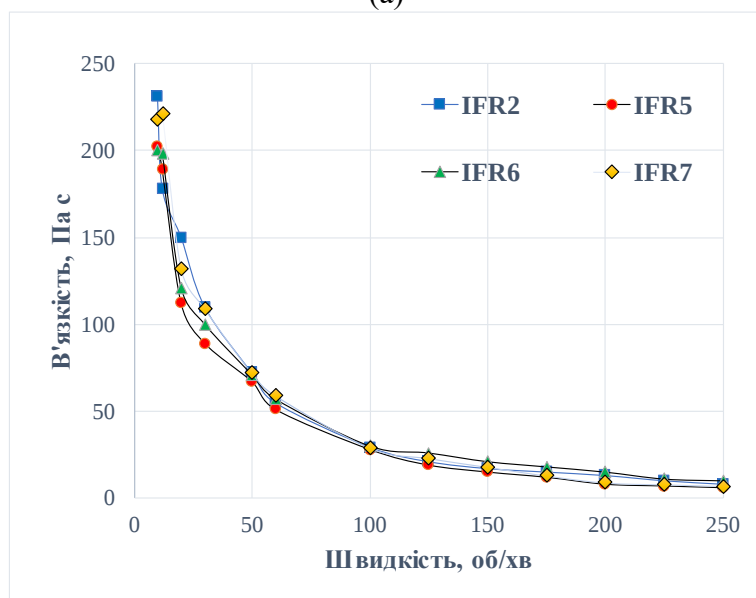
- η_0 (Па·с) – в'язкість системи у стані спокою (зберігання продукту);
- η (Па·с) – в'язкість при певній швидкості зсуву (нанесення, виробництво);
- η_∞ (Па·с) – в'язкість при високих швидкостях зсуву (нанесення);

- γ (с^{-1}) – швидкість зсуву;
- τ (Па) – напруга зсуву;
- τ_0 (Па) – межа текучості.

Однак не існує єдиного розуміння, як знання фундаментальних реологічних властивостей можна використовувати для контролю конкретних властивостей реального продукту. Тому застосування математичних кореляційних моделей, що описують співзалежність реологічних характеристик матеріалу, дають можливість накопичувати теоретичний матеріал для формування уніфікованого підходу до налаштування загального балансу реології фарби.



(а)



(б)

Рис. 4. Значення динамічної в'язкості вогнезахисних інтумесцентних без загусника (а) та композицій IFR2, IFR5– IFR7 (б)

В цьому дослідженні для прогнозування параметрів реології IFR-систем в широкому інтервалі швидкості зсуву пропонується використання рівняння Кассона [15]:

$$\eta^{1/2} = \eta_{\infty}^{1/2} + \tau_0^{1/2}/\gamma^{1/2}. \quad (1)$$

Із застосуванням рівняння (1) було визначено значення межі текучості τ_0 ($\gamma \rightarrow 0$) та в'язкість η_{∞} , що визначається на приладах ІСІ в інтервалі високих швидкостей зсуву. В табл. 6 наведені реологічні характеристики вогнезахисних фарб IFR(EZ 3010)-IFR7, які були отримані як результат лінеаризації значень « $\eta^{1/2}$ від $\gamma^{-1/2}$ » (експериментальні дані рис. 2 та рис. 4). За значення η_0 приймали експериментально виміряну в'язкість при швидкості зсуву $\gamma = 1,045 \text{ с}^{-1}$. Приклад залежності в координатах « $\eta^{1/2}$ від $\gamma^{-1/2}$ » наведено на рис. 5.

Таблиця 6

Показники реології фарб реактивного типу

Фарба	τ_0 , Па	η_{∞} , Па·с	r	η_0 , Па·с
IFR (EZ 3010)	37,2	0,096	0,993	32
IFR 1	146	0,136	0,997	84
IFR 2	605	0,103	0,990	205
IFR 3	289	0,152	0,987	124
IFR 4	296	0,160	0,987	142
IFR 5	529	0,123	0,972	176
IFR 6	552	0,122	0,971	215
IFR 7	530	0,101	0,970	252

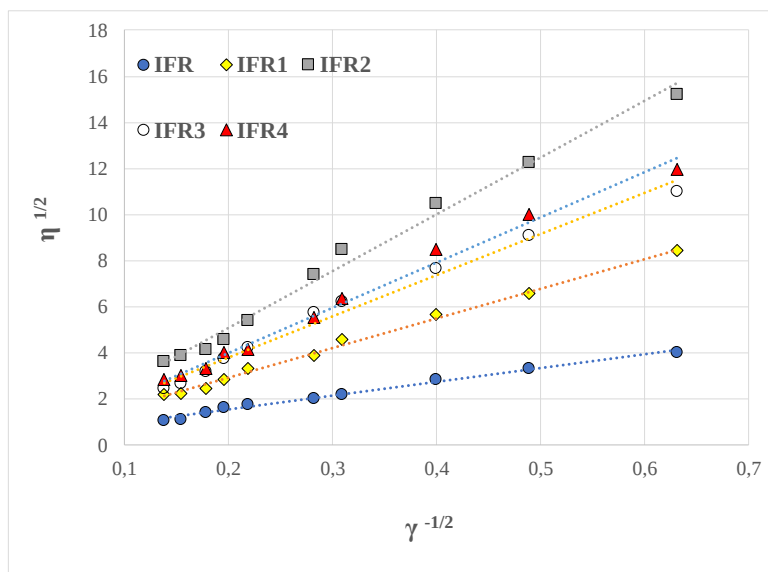


Рис. 5. Лінеаризовані залежності в'язкості IFR від швидкості зсуву

Раніше [15] нами були розроблені практичні рекомендації щодо оптимальної реології водно-дисперсійних вогнезахисних фарб інтумесцентного типу складу АРР/МА/РЕ/ТіО₂/ЕВА/наноглина (табл. 7). Згідно із запропонованими рекомендаціями відповідність продукції, що виробляється, може бути проконтрольована вимірюваннями в'язкості за Брукфілдом при вказаних швидкостях зсуву. Наведені в табл. 7 параметри розраховані для можливості нанесення фарби товщиною 1,5 мм за один прохід.

Порівняння розрахованих параметрів реології, що створюють етери целюлози (табл. 6), з рекомендованими (табл. 7) дозволяє констатувати, що значення в'язкості фарб при високих швидкостях зсуву (механічне нанесення), загущених тільки етерами целюлози (η_{∞} , табл. 6), майже в 10 разів менше рекомендованого значення (η_{∞} , табл. 7). Це означає, що фарби

інтумесцентного типу, загущені лише загусниками целюлозного типу, не можуть бути нанесені шаром в 1,5 мм за один прохід. Прогнозоване значення максимального шару фарби, яке можливо без подальших дефектів нанести механізованим способом за один прохід, складає не більше 0,5 мм.

Тим не менш, високі значення межі текучості τ_0 500-600 Па (табл. 6) роблять загусники целюлозного типу безальтернативними для зберігання фарби без розшарування та седиментації. Високі значення η_0 (табл. 6) досліджених композицій, що містять загусники НЕМС, свідчить про очікування значного внеску загусника в запобігання стікання чи провисання нанесеної фарби.

Таблиця 7

Реологічні параметри водно-дисперсійних IFR

Етап застосування фарби	Швидкість зсуву, γ , с^{-1}	В'язкість, η , Па·с	Межа текучості, τ_0 , Па
Зберігання (умови низького зсуву)	0,3	$\eta_0 > 100^1$	$\tau_0 > 30$
	1,045 (N = 5 rpm)	> 45	$\tau_0 > 30$
Нанесення механізованим способом	$> 10^3$	$\eta_\infty 1 - 1,5$	$\tau > 1000$
Мінімальне стікання	1	$\eta_0 > 100$	$\tau_0 > 25$

¹⁾ Розраховано за формулою $\eta_0 = \tau_0 / \gamma$; $\gamma = 0,3 \text{ с}^{-1}$

Для перевірки впливу етерів целюлози на вогнезахисну ефективність були приготовані IFR, склад яких зазначено у табл. 4. Випробування здійснювали в міні-печі в умовах стандартної пожежі за методикою [15]. Товщина покриття на пластинах дорівнювала в середньому 1,7-1,8 мм. Метою цих випробувань є визначення межі вогнестійкості (R, табл. 8) сталевій пластині, яка відповідає часу її прогріву (хв.) до 500 °С.

Таблиця 8

Межа вогнестійкості сталевих пластин з покриттями IFR, визначена у міні-печі

Назва композиції	Товщина покриття, мм	R, хв.
IFR(EZ 3010)	1,74	28
IFR1	1,80	32
IFR2	1,79	30
IFR3	1,70	29
IFR4	1,84	33
IFR5	1,66	27
IFR6	1,73	30
IFR7	1,68	27

Результати цього експерименту демонструють відсутність негативного впливу на межу вогнестійкості домішок етерів целюлози в інтумесцентну фарбу. Значення визначених R (хв.) відрізняються в межах похибки експерименту.

Висновки. В дослідженні продемонстровано позитивний вплив етерів целюлози на реологічні властивості фарби реактивного типу в області низьких швидкостей зсуву. Показано, що загусники целюлозного типу відповідають за підтримку в'язкості продукту для запобігання седиментації при зберіганні та провисання шару фарби при нанесенні.

Встановлено, що значення динамічної в'язкості є чутливим до структури целюлозного загусника особливо в інтервалі низького зсуву, а природа полімеру не впливає на в'язкість інтумесцентних композицій. Шляхом випробувань вогнезахисної ефективності покриттів в умовах міні-печі показано, що присутність етерів целюлози не зменшує межу вогнестійкості металевих пластин.

Очевидно, що етери целюлози не можуть бути єдиними модифікаторами реології інтумесцентних композицій, бо не забезпечують необхідної в'язкості продукту в умовах високих зсувів при нанесенні. Для удосконалення реологічного профілю інтумесцентних фарб необхідна комбінація досліджених етерів целюлози з додатковими загусниками асоціативного типу.

References

1. de Silva, D., Nuzzo, I., Nigro, E., Occhiuzzi, A. E. (2022). Intumescent coatings for fire resistance of steel structures: current approaches for qualification and design. *Coatings*, 12(5), 696.
2. Lucherini, A., Maluk, C. (2019). Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *Journal of Constructional Steel Research*, 162, 105712.
3. Passive Fire Protection Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Intumescent Coatings, Cementitious Materials), By Application (Construction, Warehousing), And Segment Forecasts, 2020 – 2027. *Market Analiz Report*. 2020. <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/passive-fire-protection-market/toc>.
4. Beh, J. H., Yew, M. C., Saw, L. H., Yew, M. K. (2020). Fire Resistance and Mechanical Properties of Intumescent Coating Using Novel BioAsh for Steel. *Coatings*, 10, 1117.
5. Fire protecting structural steelwork. Steel Construction.info. The free encyclopedia for UK steel construction information. URL: https://www.steelconstruction.info/Fire_protecting_structural_steelwork.
6. Mariappan, T. (2016). Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of Fire Sciences*, 34 (2), 120–163.
7. Yasir, M., Ahmad, F., Yusoff, P. S. M. M., Ullah, S., Jimenez, M. (2019). Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: a review. *Surface Engineering*, 36 (4), 334–363.
8. Puri, R. G., Khanna, A. S. (2017). Intumescent coatings: A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14, 1–20.
9. Mohd Sabee, M. M. S., Itam, Z., Beddu, S., Zahari, N. M., Mohd Kamal, N. L., Mohamad, D., Zulkepli, N. A., Shafiq, M. D., Abdul Hamid, Z. A. (2022). Flame Retardant Coatings. Additives, Binders, and Fillers. *Polymers*, 14, 2911.
10. Saket, S., Sumit, S., Sudheer, S., Prabhu, S. V. (2019). Performance of intumescent coatings in cone calorimeter and open pool fires. *Fire Research*, 3:45, 1–7. DOI: 10.4081/fire. 2019.45.
11. Horacek, H. (2009). Reactions of stoichiometric intumescent paints. *Journal of Applied Polymer*

Література

1. de Silva D., Nuzzo I., Nigro E., Occhiuzzi A. E. Intumescent coatings for fire resistance of steel structures: current approaches for qualification and design. *Coatings*. 2022. 12(5). 696.
2. Lucherini A., Maluk C. Intumescent coatings used for the fire-safe design of steel structures: A review. *Journal of Constructional Steel Research*. 2019. 162. 105712.
3. Passive Fire Protection Market Size, Share & Trends Analysis Report By Product (Intumescent Coatings, Cementitious Materials), By Application (Construction, Warehousing), And Segment Forecasts, 2020–2027. *Market Analiz Report*. 2020. URL: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/passive-fire-protection-market/toc>.
4. Beh J. H., Yew M. C., Saw L. H., Yew M. K. Fire Resistance and Mechanical Properties of Intumescent Coating Using Novel BioAsh for Steel. *Coatings*. 2020. 10. 1117.
5. Fire protecting structural steelwork. Steel Construction.info. The free encyclopedia for UK steel construction information. URL: https://www.steelconstruction.info/Fire_protecting_structural_steelwork.
6. Mariappan T. Recent developments of intumescent fire protection coatings for structural steel: A review. *Journal of Fire Sciences*. 2016. № 34 (2). P. 120–163.
7. Yasir M., Ahmad F., Yusoff P. S. M. M., Ullah S., Jimenez M. Latest trends for structural steel protection by using intumescent fire protective coatings: a review. *Surface Engineering*. 2019. № 36 (4). P. 334–363.
8. Puri R. G., Khanna A. S. Intumescent coatings: A review on recent progress. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2017. № 14. P. 1–20.
9. Mohd Sabee M. M. S., Itam Z., Beddu S., Zahari N. M., Mohd Kamal N. L., Mohamad D., Zulkepli N. A., Shafiq M. D., Abdul Hamid Z. A. Flame Retardant Coatings. Additives, Binders, and Fillers. *Polymers*. 2022. 14. 2911.
10. Saket S., Sumit S., Sudheer S., Prabhu S. V. Performance of intumescent coatings in cone calorimeter and open pool fires. *Fire Research*. 2019. № 3 (45). P. 1–7. DOI: 10.4081/fire. 2019.45.
11. Horacek H. Reactions of stoichiometric intumescent paints. *Journal of Applied Polymer*

- Science, 113(3), 1745–1756. DOI: 10.1002/app.29940.
12. Kalafat, K., Taran, N., Plavan, V., Bessarabov, V., Zagoriy, G., Vakhitova, L. (2020). Comparison of Fire Resistance of Polymers in Intumescent Coatings for Steel Structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(10), 45–54.
13. Butt, M. A. (2022). Thin-Film Coating Methods: A Successful Marriage of High-Quality and Cost-Effectiveness – A Brief Exploration. *Preprints*, 2022070177.
14. Zheng, S. X., Chen, H. S. (2023). Correlations of rheological methods to coatings' performance. *Progress in Organic Coating*, 177, 107403.
15. Vakhitova, L., Kalafat, K., Vakhitov, R., Drizhd, V., Taran, N., Bessarabov, V. (2023). Nano-clays as rheology modifiers in intumescent coatings for steel building structures. *Chemical Engineering Journal Advances*, 16. 100544.
- Science. 2009. № 113 (3). P. 1745–1756. DOI: 10.1002/app.29940.
12. Kalafat K., Taran, N., Plavan V., Bessarabov V., Zagoriy G., Vakhitova L. Comparison of Fire Resistance of Polymers in Intumescent Coatings for Steel Structures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 4 (10). P. 45–54.
13. Butt M. A. Thin-film coating methods: a successful marriage of high-quality and cost-effectiveness – A Brief Exploration. *Preprints*. 2022. 2022070177
14. Zheng S. X., Chen H. S. Correlations of rheological methods to coatings' performance. *Progress in Organic Coatings*. 2023. Vol. 177. 107403.
15. Vakhitova L., Kalafat K., Vakhitov R., Drizhd V., Taran N., Bessarabov V. Nano-clays as rheology modifiers in intumescent coatings for steel building structures. *Chemical Engineering Journal Advances*. 2023. Vol. 16. 100544.

VAKHITOV RAMIL

Postgraduate, Department of Applied Ecology,
Technology of Polymers and Chemical Fibers,
Kyiv National University of Technologies
and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-9657-5743>
Scopus Author ID: 58183912100
Researcher ID: rid30607
E-mail: vahitov89@gmail.com

TARAN NADIYA

Candidate of Chemical Sciences, Senior researcher,
Department of Nucleophilic Reactions Research,
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal
Chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1043-5596>
Scopus Author ID: 15119449100
E-mail: N.A.Taran@nas.gov.ua

RAYENKO GENNADIY

Candidate of Chemical Sciences, Senior researcher,
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal
Chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1923-7895>
Scopus Author ID: 8443383300
Researcher ID: J-9402-2016
E-mail: rayenko@nas.gov.ua

KOROTKIKH MYKOLA

Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Department of Nucleophilic Reactions Research,
L.M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal
Chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0774-6588>
Scopus Author ID: 56072453300
Researcher ID: X-7107-2018
E-mail: M.I.Korotkikh@nas.gov.ua

KALAFAT KOSTIANTIN

Candidate of Technical Sciences, Researcher,
Department of Nucleophilic Reactions Research,
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal
Chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6165-0005>
Scopus Author ID: 5719302971
E-mail: kalafat@nas.gov.ua

BESSARABOV VOLODYMYR

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Department of Industrial Pharmacy, Kyiv National
University of Technologies and Design, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0637-1729>
Scopus Author ID: 36917184700
Researcher ID: D-3425-2017;
E-mail: v.bessarabov@kyivpharma.eu

SHOLOGON VIKTOR

Candidate of Chemical Sciences,
Department of Nucleophilic Reactions Research,
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal
Chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-6249-5390>
Scopus Author ID: 6507045182
E-mail: Shologon@nas.gov.ua

VAKHITOVA LIUBOV

Candidate of Chemical Sciences, Senior researcher,
Department of nucleophilic reactions research,
L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal
Chemistry of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-1923-7895>
Scopus Author ID: 8443383300
Researcher ID: J-9402-2016
E-mail: L.M.Vakhitova@nas.gov.ua

¹VAKHITOV R. A., ²KALAFAT K. V., ²TARAN N. A., ^{1,2}BESSARABOV V. I.,
²RAYENKO G. F., ²SHOLOHON V. I., ^{2,3}KOROTKIKH M. I., ²VAKHITOVA L. M.

¹ Kyiv National University of Technologies and Design, Ukraine

² L.M. Lytvynenko Institute of Physical and Organic Chemistry and Coal Chemistry
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

³ Institute of Organic Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

CELLULOSE ETHERS AS RHEOLOGY MODIFIERS OF REACTIVE FIRE RETARDANT PAINTS

Purpose. To study the effect of cellulose ethers on the rheological profile of intumescent fire retardant paint with the determination of optimal structures for improving the performance properties of the paint and varnish material.

Methodology. The model intumescent system was chosen as a reactive fire protection coating containing ammonium polyphosphate, melamine, pentaerythritol, titanium dioxide, and polymer. As a polymeric component, aqueous dispersions of vinyl acetate copolymers from different manufacturers were studied. Hydroxyethyl and hydroxypropyl cellulose ethers were used as cellulose thickeners, which are recognised as the most successful rheology modifiers for paints based on vinyl acetate polymers. The viscosity of the flame retardant compositions was measured using a Brookfield viscometer, and the rheological parameters were calculated using the Kesson equation.

Findings. In the study, the influence of the nature of the polymer and cellulose thickener on the rheological parameters responsible for the storage and application of the paint material was investigated through the Brookfield viscosity of the fire retardant. It was found that the structure of the cellulose ester is important in regulating the viscosity of the studied intumescent compositions. The highest viscosity values are demonstrated by high molecular weight hydroxyethyl methyl cellulose (Bermocoll EM 7000 FQ). Hydroxypropyl methyl cellulose is a less effective thickener for intumescent paints of the ammonium polyphosphate/melamine/pentaerythritol composition. The nature of the polymer, in turn, has almost no effect on the viscosity of the studied compositions containing no thickener or containing Bermocoll EM 7000 FQ. Almost identical rheological profiles are observed for the studied polymer components of the intumescent compositions. The calculation of rheological parameters - viscosity at high shear rates, shear stress, yield strength using the Kesson equation - allows us to conclude that thickening of intumescent fire retardant paints with cellulose ethers is effective in preventing sedimentation during storage and has almost no effect on increasing the thickness of the paint layer that can be applied in one pass. By testing the fire protection efficiency of the coatings in a mini-oven, it was shown that the presence of cellulose ethers does not affect the fire resistance of metal plates.

Originality. The influence of the cellulose thickeners structure on the rheological parameters of intumescent fire retardant paint responsible for storage and application was studied for the first time.

Practical value. The obtained results make it possible to determine the optimal structures of cellulose ethers that can be used in the industrial production of intumescent paints.

Keywords: fire protection; reactive-type coating; viscosity of fire retardant paints; cellulose ethers; rheological profile.