

ГІДРОДИНАМІЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ПОЛІМЕРНИХ РЕАГЕНТІВ У СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДИ: ЛАБОРАТОРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Тетяна Магльована

доктор технічних наук, професор

Черкаський державний технологічний університет, бульв. Шевченка, 460, Черкаси, Україна, 18006,
maglovanatatyana@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6780-9045

Тарас Нижник

кандидат технічних наук, доцент

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, Україна, 03056, taren8@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6499-0670

Тетяна Стрікаленко

доктор медичних наук, професор

Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, Україна, 65039,
alpha.water.55@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5836-6887

Денис Колесніков

кандидат технічних наук, доцент

Національний університет цивільного захисту України, вул. Онопрієнка, 8, Черкаси, Україна, 18034,
dekol76@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4068-3454

Олег Землянський

доктор технічних наук, професор

Національний університет цивільного захисту України, вул. Онопрієнка, 8, Черкаси, Україна, 18034,
omzem1@gmail.com

ORCID: 0000-0002-2728-6972

Сергій Стась

кандидат технічних наук, професор

Національний університет цивільного захисту України, вул. Онопрієнка, 8, Черкаси, Україна, 18034,
stas_serhiy@yahoo.com

ORCID: 0000-0002-6139-6278

Дмитро Копитін

провідний фахівець

Національний університет цивільного захисту України, вул. Онопрієнка, 8, Черкаси, Україна, 18034,
dima_kopytin@ukr.net

ORCID: 0000-0003-2505-9394

У статті досліджено проблему підвищення енергоефективності систем транспортування води шляхом зниження гідродинамічного опору потоку за використання полімерних реагентів. Об'єктом дослідження є водні розчини полігексаметиленгуанідин гідрохлориду (ПГМГ-ГХ) — катіонного поліелектроліту, що застосовується для знезараження води та характеризується антимікробними й антикорозійними властивостями.

Метою роботи є експериментальна оцінка гідродинамічної активності розчинів ПГМГ-ГХ у турбулентному режимі течії та визначення їх потенціалу щодо зниження гідравлічних втрат у трубопровідних системах.

Методологія. Експериментальні дослідження проведено на модельній установці, що імітує роботу гнучкої трубопровідної системи. Модель складалася зі 140 м пожежних рукавів, з'єднаних із ручним пожежним стволом РСК-50. Як базову рідину використовували водопровідну воду загальною твердістю 3,70 мг-екв/дм³. Готували водні розчини ПГМГ-ГХ у концентраційному діапазоні 0,001–0,3 %. Подача рідини здійснювалася насосною установкою з можливістю регулювання тиску. Контроль витрати та напору проводили із застосуванням сертифікованих вимірювальних приладів.

Дослідження виконували у два етапи: визначення залежності витрати від концентрації полімеру за сталого тиску; визначення впливу робочого тиску на витратні характеристики води та розчину ПГМГ-ГХ.

Отримані експериментальні дані статистично оброблено; залежності апроксимовано поліноміальними функціями з оцінкою коефіцієнта детермінації.

Результати. Встановлено, що додавання ПГМГ-ГХ до води зумовлює зростання витрати за сталого тиску, що свідчить про зниження гідравлічних втрат у рукавній лінії. Максимальний ефект спостерігався за концентрації 0,2 % та робочому тиску 2 bar. За цих умов витрати розчину ПГМГ-ГХ збільшувалася на 10–11 % в порівнянні з досліджуваною водою. Отримані залежності мають нелінійний характер із вираженим концентраційним оптимумом. Зростання витрати у діапазоні малих концентрацій інтерпретується як прояв редукції турбулентного тертя (ефект Томса). Подальше збільшення концентрації призводить до обмеження позитивного ефекту, що може бути пов'язано зі зростанням ефективної в'язкості розчину та можливими адсорбційними процесами на внутрішній поверхні трубопроводу. Таким чином, експериментально підтверджено наявність гідродинамічної активності ПГМГ-ГХ у водних розчинах у турбулентному режимі течії.

Оригінальність. Вперше експериментально встановлено, що водні розчини ПГМГ-ГХ проявляють властивості полімерної редукції турбулентного тертя в умовах модельної трубопровідної системи. Встановлено наявність концентраційного оптимуму, за якого досягається максимальний ефект зниження гідравлічного опору. Отримані результати розширюють уявлення про можливість використання катіонних поліелектролітів із біоцидними властивостями як багатофункціональних реагентів, що поєднують санітарно-гігієнічну дію та гідродинамічну ефективність.

Практична цінність. Показано перспективність застосування ПГМГ-ГХ для зниження втрат напору в гнучких трубопровідних системах без необхідності їх конструктивної модернізації. Збільшення витрати за сталого тиску потенційно може бути трансформоване у зменшення енергетичних витрат на перекачування води. Особливий практичний інтерес становить використання реагенту в системах пожежогасіння та аварійного водопостачання, де підвищення пропускної спроможності трубопровідної лінії має критичне значення. Додатковою перевагою є поєднання гідродинамічного ефекту з антикорозійними та дезінфекційними властивостями, що може сприяти підвищенню довговічності інфраструктури та покращенню якості води.

Висновки. Водні розчини ПГМГ-ГХ у дослідженому діапазоні концентрацій проявляють гідродинамічну активність у турбулентному потоці. Максимальне зниження гідравлічних втрат (еквівалентне збільшенню витрати до 11 %) досягається за концентрації близько 0,2 % та тиску 2 bar. Встановлено наявність концентраційного оптимуму, що зумовлений конкуренцією механізмів редукції турбулентного тертя та зростанням ефективної в'язкості. Результати свідчать про потенціал комплексного використання ПГМГ-ГХ у системах водопостачання з поєднанням енергозберігаючої та санітарної функцій. Подальші дослідження доцільно спрямувати на масштабування експериментів, розрахунок коефіцієнтів гідравлічного тертя та оцінку довготривалої стабільності полімерного ефекту в реальних умовах експлуатації.

Ключові слова: гідравлічний опір, редукція турбулентного тертя, рукавна лінія, транспортування води, полігексаметиленгуанідин гідрохлорид, гуанідинові полімери.

Актуальність роботи. Серед сучасних енергозберігаючих заходів для систем водопостачання переважають підходи, спрямовані на зменшення аварійності та втрат води під час її транспортування, продовження строків експлуатації трубопроводів, модернізацію технологічного обладнання, а також впровадження новітніх технічних рішень і технологій очищення, зокрема знезараження води [1-4].

З огляду на системний характер завдань підвищення енергоефективності, важливо забезпечити не лише економічну доцільність впроваджуваних рішень, а й мінімізацію їхнього впливу на довкілля. Одним із перспективних напрямів є застосування гідродинамічно активних речо-

вин у водних потоках, що, за даними літератури, сприяє зменшенню гідравлічного опору та підвищенню швидкості транспортування рідини в трубопровідних мережах, а також продовженню терміну їх експлуатації. Відомо, що розвиток корозії та біобростань у трубах зменшує їхній внутрішній перетин, що, у свою чергу, підвищує енергетичні витрати на транспортування води та збільшує вартість водопостачання для кінцевих споживачів [5-6].

У зв'язку з цим дослідження, спрямовані на вдосконалення технологій водопостачання із застосуванням гідродинамічно активних полімерів, зокрема полігексаметиленгуанідину гідрохлориду (ПГМГ-ГХ), є актуальними. Особливого

значення набуває аналіз їх впливу на параметри системи водопостачання, стан довкілля та потенціал до енергозбереження.

Аналіз джерел інформації проведено за наступними напрямками: корозія та біообростання внутрішньої поверхні трубопроводів і антикорозійні властивості ПГМГ-ГХ [7-10]; вплив ПГМГ-ГХ на довкілля та показники епідемічної безпечності води [11-12]; вплив гідродинамічно активних речовин на гідравлічний опір у трубопроводах (ефект Томса) [13-15]; обґрунтування доцільності проведення експериментальних досліджень технології використання ПГМГ-ГХ та її техніко-економічної ефективності [16-17].

Серйозними проблемами для усіх водотранспортних систем та технологічного обладнання, що працює у водному середовищі, є корозія та утворення біологічної плівки на внутрішніх поверхнях трубопроводів [10].

Сприяють таким змінам, зокрема, кисле середовище, розчинений у воді кисень, окисники та мікрофлора. Вони ж погіршують хімічний склад та епідемічну безпечність води, що потрапляє до споживачів, викликають пошкодження металевих споруд і комунікацій, збільшують кількість аварій та втрат води при транспортуванні, що у підсумку призводить до значних економічних витрат. Процеси корозії особливо активізуються при використанні традиційних біоцидів-окисників (хлору та хлор-вмісних реагентів). Крім того, хлор-резистентність, яка формується у деяких мікроорганізмів, нерідко поєднується із стійкістю до антибіотиків, що не сприяє епідемічній безпечності води, а побічні продукти хлорування підвищують її токсичність [11, 16].

Дослідження, проведені в лабораторних та промислових умовах [8-9], показали, що макромолекулярна природа ПГМГ-ГХ та наявність позитивно заряджених біоцидних гуанідинових груп забезпечують утворення міцних плівок на металевих поверхнях, захищаючи їх від корозії та біообростання. Важливим є висновок, що заміна реагентів-окисників на незаражуючий реагент на основі ПГМГ-ГХ сприяє очищенню старих трубопроводів від накопичень компонентів біоценозу та солей заліза.

Огляд класичних підходів і теорій щодо зниження гідравлічного опору в трубопроводах (ефект Томса) наведено у [13-15, 18-20]. Серед перспективних сполук для зниження турбулентності водних потоків останніх десятиліть ефективними виявились водорозчинні макромолекули природних і синтетичних полімерів (поліетиле-

ноксид, поліакрилова кислота, поліакриламід, полі N-вінілформамід). Однак їх застосування у господарсько-питному водопостачанні обмежене через токсичність, швидку деструкцію під час зберігання та експлуатації [21 - 24].

Вперше у 2019 році була висунута гіпотеза про здатність реагентів на основі ПГМГ-ГХ проявляти гідродинамічну активність у водних розчинах та знижувати гідродинамічний спротив у водопровідній мережі [25]. Навіть невеликі концентрації високомолекулярних полімерів у рідинах здатні значно знижувати опір потоку, що робить їх перспективними для пожежогасіння, перш за все за рахунок зменшення енергії, необхідної для перекачування води [26-27].

Лабораторні віскозиметричні дослідження показали, що прояви гідродинамічної активності ПГМГ-ГХ пов'язані з конформаційними змінами його макромолекул у потоці. Як поліелектроліт, ПГМГ-ГХ має позитивно заряджені макромолекули, скомпенсовані рухливими протийонами (хлорид-йонами), а ефект структурування води при великих швидкостях потоку перешкоджає утворенню турбулентності та зменшує гідродинамічний опір [25].

Невирішеність механізму дії полімерних розчинів обмежує їх застосування у системах водопостачання як у штатних, так і в екстремальних умовах. Тому вивчення процесів зниження гідравлічного опору має як теоретичне, так і практичне значення.

У цьому контексті ми зосередили увагу на ПГМГ-ГХ, одного з представників гуанідинових полімерів, адже його здатність знижувати гідравлічний опір поєднується з іншими властивостями: антикорозійністю [28], стабільністю при зберіганні понад 1 рік [29], вираженою антибактеріальною та віруліцидною активністю [7, 12, 30], безпечністю для людини і довкілля, а також наявністю дозволів МОЗ України та методичних документів для використання у технологіях оброблення питної води [31].

Для вдосконалення інженерно-технічних заходів у водопостачанні в штатних умовах та під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій доцільно провести модельні та натурні випробування ПГМГ-ГХ, щоб визначити умови його ефективного застосування для водопостачання населення та енергозбереження на підприємствах.

Матеріал і результати досліджень. Для експериментальних досліджень використовували водопровідну воду (загальна твердість 3,70 мг-екв/дм³) та водні розчини ПГМГ-ГХ, що

є діючою речовиною реагенту комплексної дії «Акватон-10». Полімер ПГМГ-ГХ (середня молекулярна маса 12 000) отриманий за запатентованою технологією синтезу [32] (виробник — ТОВ НТЦ «Укрводбезпека», м. Київ, Україна), що забезпечує властивості макромолекул, характерні для гідродинамічно активних полімерів. Розчин «Акватон-10» має дозвіл МОЗ України для використання у системах водопостачання, каптажу джерел мінеральних вод, а також у харчовій промисловості [31].

Дослідження виконувалися на базі лабораторної та науково-технічної інфраструктури Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України. Водні розчини ПГМГ-ГХ готували шляхом змішування водопровідної води з заздалегідь приготовленими концентрованими розчинами полімеру відомої концентрації. Використовували розчини через 24 години після приготування.

Моделлю трубопроводу слугували пожежні рукава довжиною 140 м, на яких спостерігаються явища, аналогічні звичайним трубопроводам, такі як втрати напору та гідродари [33]. Вода та водні розчини подавались насосом із ємності об'ємом 1 м³ по рукавній лінії (внутрішній діаметр 125 мм) до ручного пожежного ствола РСК-50 (діаметр насадки 13 мм, кут факелу 30°, робочий тиск 3 bar). Насосна установка (рис.1) забезпечує контроль витрати та напору води. Асинхронний трифазний електричний двигун потужністю 18 кВт у поєднанні з відцентровим рідинним насосом дозволяє подавати воду з витратою до 48 м³/год при напорі до 1 МПа та проводити дослідження з різними типами ручного протипожежного обладнання. Керування електричним двигуном здійснюється за допомогою частотного перетворювача Danfoss VLT 6000 HVAC, що дозволяє підтримувати необхідне значення тиску рідини. Вимірювання тиску проводили за допомогою перетворювача тиску КРТ-Ех (межа вимірювання 2,5 МПа, клас точності 1). Витрату води визначали електромагнітним перетворювачем SDM 1022 (граничні відносні похибки при витраті від 0,65 м³/год ~ 2 %, клас точності 2), який працює у діапазоні витрат від 0,26 до 65 м³/год. Використана приладна техніка системи керування насосною установкою дозволила здійснити вимірювання основних параметрів потоку у живильному трубопроводі та визначити характеристики струменів, такі як коефіцієнти швидкості та витрати [33-34].



Рис. 1. Фото насосної установки

Дослідження проводили у два етапи. На першому етапі визначали зміни витрати води та водних розчинів ПГМГ-ГХ за постійного значення тиску в рукавній лінії та різних концентраціях полімеру. Тиск контролювали за допомогою перетворювача тиску КРТ-Ех. На другому етапі досліджували вплив різних значень тиску в рукавній лінії на витрату води та водних розчинів ПГМГ-ГХ (рис. 2).



Рис. 2. Фото рукавній лінії L= 140м

Узагальнені результати визначення витрат водопровідної води та водного розчину ПГМГ-ГХ за умови сталого тиску в рукавній лінії з використанням пожежного ствола РСК-50 ($d = 13$ мм, кут розпилення 30°, $P = 3$ bar) наведено на рис. 3.

Отримана залежність витрати від концентрації полімеру має виражений нелінійний характер з наявністю максимуму за концентрацій близько 0,2 %. Зростання витрати у діапазоні малих концентрацій свідчить про реалізацію ефекту зниження турбулентного тертя, характерного для розбавлених полімерних розчинів

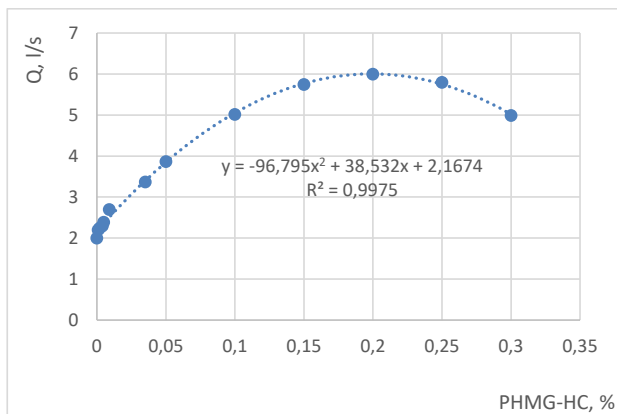


Рис. 3. Залежність витрат водного розчину PNMG-NC від концентрації полімеру у воді при використанні пожежного ствола РСК-50 (діаметр насадки – 13 мм, кут факела розпиленого струменя – 30°, робочий тиск – 3 bar)

Апроксимація експериментальних даних поліномами другого–п’ятого порядку (табл. 1) продемонструвала високий ступінь відповідності моделей експериментальним результатам ($R^2 = 0,9975–0,9979$), що свідчить про точність опису залежності витрати від концентрації полімеру в межах досліджуваного інтервалу.

При цьому квадратична модель є фізично обґрунтованою, оскільки відображає наявність єдиного екстремуму та узгоджується з механізмом процесу. Аналітичне визначення положення максимуму з умови $dy/dx = 0$ дає значення концентрації близько 0,2 %, що відповідає експериментально встановленому оптимуму. Збільшення порядку полінома призводить лише до незначного підвищення коефіцієнта детермінації ($\Delta R^2 < 0,0004$), що не є статистично значущим з огляду точності експериментальних вимірювань. Поліноми четвертого та п’ятого порядку деталізують форму кривої в межах експериментального інтервалу, проте не змінюють її фізичної інтерпретації. Крім того, високі порядки апроксимації є більш чутливими до випадкових похибок експериментальних даних та менш стійкими при екстраполяції, що обмежує їх практичну доцільність. Таким чином, квадра-

тична модель може розглядатися як достатня для інженерних розрахунків у межах досліджуваного діапазону концентрацій.

Зростання витрати водного розчину ПМГГ-ГХ до оптимальної концентрації пов’язане зі зменшенням турбулентних втрат у потоці внаслідок взаємодії макромолекул полімеру з турбулентними пульсаціями швидкості [35]. Для полімеру із середньою молекулярною масою близько 12 000 характерна достатня довжина та гнучкість макроланцюгів, що забезпечує їх ефективну конформаційну перебудову в турбулентному потоці та зниження інтенсивності перенесення імпульсу в пристінній області. Після перевищення оптимальної концентрації спостерігається поступове обмеження позитивного ефекту. Це може бути зумовлено двома взаємопов’язаними факторами: зростанням ефективної в’язкості розчину та адсорбцією поліелектролітичних макромолекул на внутрішній поверхні трубопроводу [35]. Підвищення в’язкості призводить до зменшення числа Рейнольдса, що змінює характеристики турбулентного режиму течії. Одночасно формування адсорбційного шару зменшує ефективний гідравлічний діаметр та впливає на пристінну структуру потоку [28].

Таким чином, максимум на залежності «витрати – концентрація» відображає баланс між ефектом зниження турбулентного тертя та процесами, що збільшують гідравлічний опір при підвищених концентраціях полімеру. Наявність оптимальної концентрації є закономірним наслідком конкуренції зазначених механізмів.

Наступний етап дослідження був спрямований на встановлення впливу робочого тиску в рукавній лінії довжиною 140 м на витратні характеристики водопровідної води та водного розчину ПМГГ-ГХ за концентрації 10 мг/л (рис. 4).

Експериментально встановлено, що за однакових значень тиску витрати водного розчину ПМГГ-ГХ перевищували витрати води. Залежно від рівня тиску приріст витрати становив 3–10 % (рис. 4), причому максимальне збільшення (10–11 %) зафіксовано за тиску 2 bar.

Таблиця 1

Залежність витрат водного розчину ПМГГ-ГХ від концентрації полімеру

Порядок полінома	Залежність витрат водного розчину ПМГГ-ГХ від концентрації полімеру	R^2
2	$y = -96,795x^2 + 38,532x + 2,1674$	0,9975
3	$y = -5,5201x^3 - 94,405x^2 + 38,289x + 2,1694$	0,9975
4	$y = -608,75x^4 + 349,97x^3 - 157,42x^2 + 41,61x + 2,1534$	0,9978
5	$y = 5774x^5 - 4833,5x^4 + 1414,1x^3 - 263,53x^2 + 45,025x + 2,1426$	0,9979

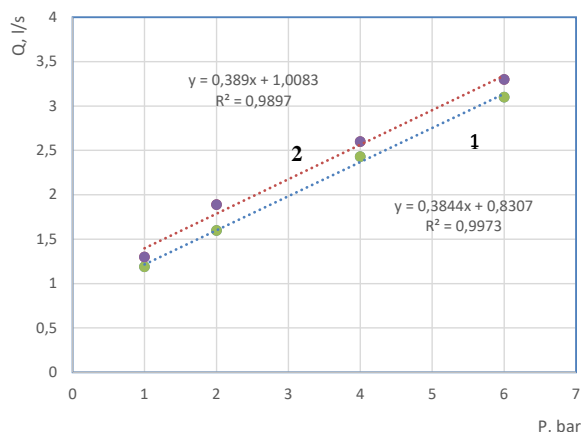


Рис. 4. Витрати води (1) та водного розчину ПГМГ-ГХ (2) за різних значеннях тиску при використанні рукавної лінії пожежного ствола РСК-50

Отримані результати свідчать про зменшення гідравлічного опору в рукавній лінії за наявності ПГМГ-ГХ. Ймовірним механізмом є модифікація пристінної структури турбулентного потоку внаслідок взаємодії поліелектролітичних макромолекул із зсувними напруженнями [35]. З інженерної точки зору, збільшення витрати за сталого тиску еквівалентне зниженню втрат напору на тертя. Відповідно, за умови підтримання сталої витрати це може потенційно трансформуватися у зменшення енергетичних витрат на перекачування. Однак кількісна оцінка енергетичного ефекту потребує окремого аналізу режимів роботи насосного обладнання та повномасштабних гідрав-

лічних розрахунків, що виходить за межі даного дослідження. Використання пожежних рукавів як модельної системи є технічно обґрунтованим, оскільки за характером гідродинамічних процесів (втрати напору по довжині, локальні опори, імпульсні навантаження) вони репрезентують гнучкі трубопровідні системи малого діаметра. Це дозволяє екстраполювати отримані тенденції на аналогічні за режимами течії інженерні системи за умови подальшої валідації.

Висновки.

1. Встановлено, що водні розчини полігексаметиленгуанідин гідрохлориду у досліджуваному діапазоні концентрацій проявляють гідродинамічну активність, що виражається у зниженні гідравлічного опору потоку.

2. За однакового тиску в рукавній лінії додавання полігексаметиленгуанідин гідрохлориду (10 мг/л) забезпечувало збільшення витрати на 3–11 % порівняно з водою, з максимальним ефектом за тиску 2 бар.

3. Встановлено наявність концентраційного оптимуму, за якого ефект редуції гідродинамічного опору досягає максимуму, що свідчить про нелінійний характер взаємодії досліджуваного полімеру з турбулентною структурою потоку.

4. Отримані результати підтверджують потенціал полігексаметиленгуанідин гідрохлориду як модифікатора гідродинамічних параметрів потоку, але для кількісної оцінки можливого енергетичного ефекту необхідні додаткові дослідження в умовах реальних систем транспортування.

ЛІТЕРАТУРА

1. Liberatore M. W., Pollauf E. J., McHugh A. J. J. Shear-induced structure formation in solutions of drag reducing polymers. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2003. Vol. 113, No. 2–3. P. 119–133.

2. Ступін О. Б., Симоненко О. П., Асланов П. В. Гідродинамічна активність водорозчинних полімерних композицій та перспективи їх застосування в енергозбереженні та екології. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теплоенергетика. Інженерне середовище. Автоматизація*. 2013. № 758. С. 98–103.

3. Симоненко А. П., Собко А. Ю., Биковська Н. В., Прохоренко С. Ф. Застосування гідродинамічно активних композицій для підвищення пропускної спроможності колекторів та дренажних систем в надзвичайних ситуаціях. *Вісник автомобільного та дорожнього інституту*. 2012. № 2 (15). С. 189–194.

4. Застосування водорозчинних полімерів для зменшення гідравлічного опору / Т. І. Яснюк та ін. *Вісник*

євразійської науки. 2018. Т. 10, № 3. URL: <https://esj.today/PDF/51NZVN318.pdf>.

5. Ryu H. K., Yoon K. B. Leak failure at the TP316L welds of a water pipe caused by microbiologically influenced corrosion. *Engineering Failure Analysis*. 2021. Vol. 122. 105244. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105244>.

6. Environmentally friendly and broad-spectrum antibacterial poly(hexamethylene guanidine)-modified polypropylene and its antifouling application / B. Qiu et al. *Polymers*. 2023. Vol. 15, No. 6. 1521. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15061521>.

7. Choi H., Kim K.-J., Lee D. G. Antifungal activity of the cationic antimicrobial polymer polyhexamethylene guanidine hydrochloride and its mode of action. *Fungal Biology*. 2017. Vol. 121. P. 53–60. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2016.09.001>.

8. Surface modification of thin film composite RO membrane for enhanced anti-biofouling

- performance / J. Nikkola et al. *Journal of Membrane Science*. 2013. Vol. 444. P. 192–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.05.03>.
9. Obratsov V. B., Rubl'ova E. D., Amirulloeva N. V. Influence of zinc ions on the inhibiting properties of polyhexamethylene guanidine derivatives. *Materials Science*. 2013. Vol. 49. P. 326–333. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9618-y>.
10. Farh H., Hassan M., Ben Seghier M., Taiwo R., Zayed T. Analysis and ranking of corrosion causes for water pipelines: A critical review. *npj Clean Water*. 2023. Vol. 6. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41545-023-00275-5>.
11. Improving the epidemiological and chemical safety of water as a task of selecting new disinfectant reagents / V. F. Mariievskiy et al. *Preventive Medicine*. 2009. № 3 (7). P. 53–62.
12. Wang J., Yu Y., Dong Y. Disinfection of ready-to-eat lettuce using polyhexamethylene guanidine hydrochloride. *Microorganisms*. 2020. Vol. 8, No. 2. 272. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020272>.
13. Picardo J. R., Plan E. L. C. V. M., Vincenzi D. Polymers in turbulence: Stretching statistics and the role of extreme strain rate fluctuations. *Journal of Fluid Mechanics*. 2023. Vol. 969. A24. DOI: <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.524>.
14. Drag reduction by polymer additives: State-of-the-art advancements in experimental and numerical approaches / S. S. Baakeem et al. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2024. Vol. 63, No. 17. P. 7485–7506. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c00202>.
15. Graham M. D. Drag reduction and the dynamics of turbulence in simple and complex fluids. *Physics of Fluids*. 2014. Vol. 26. 101301. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4895780>.
16. Прокопов В. О., Липовецька О. Б., Зоріна О. В. та ін. Проблема хлороорганічних сполук у питній воді в працях українських науковців: огляд літератури та власні дослідження. *Environment and Health*. 2020. № 3 (96). С. 65–73.
17. Методичні вказівки щодо використання «Аква-тон-10» для дезінфекції об'єктів водопостачання та води в централізованих, автономних і децентралізованих системах водопостачання : наказ МОЗ України № 16-2010 від 26.02.2010. Київ, 2010.
18. Xi L. Turbulent drag reduction by polymer additives: Fundamentals and recent advances. *Physics of Fluids*. 2019. Vol. 31. 121302. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5129619>.
19. Zhang X., Duan X., Muzychka Y. S. Drag reduction by polymers: A brief review of the history, research progress, and prospects. *International Journal of Fluid Mechanics Research*. 2021. Vol. 48, No. 6. P. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1615/InterJFluidMechRes.2021038352>.
20. Kamel A., Shah S. N. Effects of salinity and temperature on drag reduction characteristics of polymers in straight circular pipes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2009. Vol. 67, No. 1–2. P. 23–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2009.02.004>.
21. Edson J. S. Review of mechanical degradation and de-aggregation of drag reducing polymers in turbulent flows. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2020. Vol. 276. 104225. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2019.104225>.
22. Pereira A. S., Soares E. J. Polymer degradation of dilute solutions in turbulent drag reducing flows in a cylindrical double gap rheometer device. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2012. Vol. 179–180. P. 9–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2012.05.001>.
23. Effect of salinity on drag reduction of additives and mixtures under turbulent flow / K. Hashlamoun et al. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2023. Vol. 62, No. 35. P. 14084–14099. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c02104>.
24. Turbulent drag reduction of polyacrylamide solutions: Effect of degradation on molecular weight distribution / M. W. Liberatore et al. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2004. Vol. 123, No. 2–3. P. 175–183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2004.08.006>.
25. On the hydrodynamic activity of a disinfectant reagent based on polyhexamethylene guanidine hydrochloride / T. Y. Nizhnik et al. *World Science*. 2019. No. 4 (44), Vol. 1. P. 11–15. DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30042019/6465.
26. Zhartovsky S., Maglyovana T. Rationale of use guanidine surfactants for fire extinguishing in natural ecosystems. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. No. 4. P. 124–129. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/124>.
27. Figueredo R. C. R., Sabadini E. Firefighting foam stability: The effect of the drag reducer poly(ethylene) oxide. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2003. Vol. 215. P. 77–86. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(02\)00425-9](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00425-9).
28. Improving the efficiency of water fire extinguishing systems operation by using guanidine polymers / T. Maglyovana et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1, No. 10 (103). P. 20–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.196881>.
29. Методичні вказівки щодо використання «Аква-тон-10» для дезінфекції об'єктів водопідготовки та води у централізованих, автономних і децентралізованих системах водопостачання : наказ МОЗ України № 16-2010 від 26.02.2010. Київ, 2010.
30. Zhou Z., Wei D., Lu Y. Polyhexamethylene guanidine hydrochloride shows bactericidal advantages over chlorhexidine digluconate against ESKAPE bacteria. *Biotechnology and Applied Biochemistry*. 2015. Vol. 62, No. 2. P. 268–274. DOI: <https://doi.org/10.1002/bab.1255>.
31. Реагент комплексної дії «Аква-тон-10» : ТУ У 24.1-25274537-005-2003 зі змінами № 1 та № 2 : висновок державної санітарно-епідеміологічної експертизи № 05.03.02-04/58289 від 02.07.2013. Київ, 2013.
32. Method for obtaining polyguanidines : Patent UA No. 79720 / Nyzhnyk Y. V. et al. 2007.
33. Destabilization of flow in a channel with variable discharge along its length / D. V. Kolesnikov et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. Vol. 3, No. 7 (69). P. 45–49.

34. Zhang Y., Zhou F., Kang J. Flow and heat transfer in drag-reducing polymer solution flow through the corrugated tube and circular tube. *Applied Thermal Engineering*. 2020. Vol. 174. 115185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115185>.

35. Магльована Т. В., Нижник Т. Ю., Жартовський С. В. Екологічні аспекти використання гуанідинових полімерів в умовах надзвичайних ситуацій : [монографія]. 2-ге вид. Черкаси : ФОРМ Гордієнко Є. І., 2017. 210 с.

HYDRODYNAMIC EFFICIENCY OF POLYMER REAGENTS IN WATER TRANSPORTATION SYSTEMS: LABORATORY MODELING

Tetiana Maglyovana

Doctor of Technical Sciences, Professor
Cherkasy State Technological University, 460 Shevchenko blvr., Cherkasy, Ukraine, 18006,
maglovanatatyana@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6780-9045

Taras Nyzhnyk

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Beresteiskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03056, taren8@gmail.com
ORCID: 0000-0001-6499-0670

Tatyana Strikalenko

Doctor of Medical Sciences, Professor
Odesa National University of Technology, 112 Kanatna str., Odesa, Ukraine, 65039, alpha.water.55@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5836-6887

Denys Kolesnikov

PhD in Technical Sciences, Associate Professor
National University of Civil Defence of Ukraine, 8 Onoprienko str., Cherkasy, Ukraine, 18034, dekol76@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4068-3454

Oleh Zemlianskyi

Doctor of Technical Sciences, Professor
National University of Civil Defence of Ukraine, 8 Onoprienko str., Cherkasy, Ukraine, 18034, omzem1@gmail.com
ORCID: 0000-0002-2728-6972

Serhii Stas

PhD in Technical Sciences, Professor
National University of Civil Defence of Ukraine, 8 Onoprienko str., Cherkasy, Ukraine, 18034, stas_serhiy@yahoo.com
ORCID: 0000-0002-6139-6278

Dmytro Kopytyn

Leading Specialist
National University of Civil Defence of Ukraine, 8 Onoprienko str., Cherkasy, Ukraine, 18034, dima_kopytin@ukr.net
ORCID: 0000-0003-2505-9394

Purpose. The purpose of the study is to experimentally evaluate the hydrodynamic activity of aqueous polyhexamethylene guanidine hydrochloride (PHMG-HC) solutions under turbulent flow conditions and to determine their potential for reducing hydraulic losses in flexible pipeline systems.

Methodology. Experimental investigations were carried out using a laboratory-scale model simulating a flexible pipeline system consisting of a 140 m hose line connected to a manual fire nozzle (RSK-50 type). Tap water with a

total hardness of 3.70 mg-eq/dm³ was used as the reference fluid. PHMG-HC aqueous solutions were prepared within a concentration range of 0.001–0.3 wt.%. Flow rate and pressure were controlled using certified measuring instruments. The study included two stages: evaluation of the flow rate dependence on polymer concentration at constant pressure, and assessment of the influence of operating pressure on hydraulic performance. Experimental data were statistically processed and approximated using polynomial functions with determination coefficients (R²).

Findings. The addition of PHMG-HC resulted in an increase in flow rate under constant pressure, indicating a reduction in hydraulic losses. The maximum effect was observed at a concentration of 0.2 wt.% and an operating pressure of 2 bar, where the flow rate increased by 10–11% compared to water. The dependencies were nonlinear with a pronounced concentration optimum. The effect at low concentrations can be interpreted as a manifestation of polymer-induced turbulent drag reduction, while further concentration increase limits the positive impact due to increased effective viscosity and possible adsorption phenomena.

Originality. For the first time, the hydrodynamic efficiency of PHMG-HC solutions has been experimentally demonstrated under the conditions of a model flexible pipeline system. A concentration optimum corresponding to maximum hydraulic loss reduction has been identified. The results expand the understanding of multifunctional cationic polyelectrolytes combining biocidal properties with hydrodynamic performance.

Practical value. The application of PHMG-HC represents a promising approach to reducing pressure losses in flexible pipeline systems without structural modification. An increase in flow rate at constant operating pressure may be converted into reduced energy consumption for water pumping. The results are particularly relevant for firefighting and emergency water supply systems, where enhanced hydraulic performance and increased throughput are of critical importance. The combination of hydrodynamic efficiency with disinfecting and anticorrosive properties provides additional operational and environmental advantages, potentially improving infrastructure durability and water quality.

Conclusions. PHMG-HC aqueous solutions within the investigated concentration range exhibit hydrodynamic activity in turbulent flow conditions. The maximum reduction of hydraulic losses (equivalent to up to 11% flow rate increase) occurs at approximately 0.2 wt.% and 2 bar. The identified concentration optimum results from the balance between turbulent drag reduction mechanisms and increased effective viscosity. The results indicate the potential for integrated energy-saving and sanitary applications in water transport systems.

Key words: hydraulic resistance, turbulent drag reduction, hose line, water transportation, polyhexamethylene guanidine hydrochloride, guanidine polymers.

REFERENCES

1. Liberatore, M. W., Pollauf, E. J., & McHugh, A. J. (2003). Shear-induced structure formation in solutions of drag reducing polymers. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 113(2–3).
2. Stupin, O. B., Symonenko, O. P., & Aslanov, P. V. (2013). Hydrodynamic activity of water-soluble polymer compositions and perspectives of their application in energy saving and ecology. *Visnyk of National University "Lviv Polytechnic": Thermal Power Engineering. Environmental Engineering. Automation*, 758.
3. Symonenko, A. P., Sobko, A. Y., Bykovska, N. V., & Prokhorenko, S. F. (2012). Application of hydrodynamically active compositions to increase the capacity of sewer collectors and drainage systems in emergency situations. *Bulletin of the Automobile and Road Institute*, 2(15), 189–194.
4. Yasniuk, T. I., Vyazkova, E. A., Anisimova, E. Y., et al. (2018). Application of water-soluble polymers to reduce hydraulic friction resistance. *Bulletin of Eurasian Science*, 10(3).
5. Ryu, H. K., & Yoon, K. B. (2021). Leak failure at the TP316L welds of a water pipe caused by microbiologically influenced corrosion. *Engineering Failure Analysis*, 122, 105244. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105244>
6. Qiu, B., Wang, M., Yu, W., Li, S., Zhang, W., Wang, S., & Shi, J. (2023). Environmentally friendly and broad-spectrum antibacterial poly (hexamethylene guanidine)-modified polypropylene and its antifouling application. *Polymers*, 15(6), 1521. <https://doi.org/10.3390/polym15061521>
7. Choi, H., Kim, K.-J., & Lee, D. G. (2017). Antifungal activity of the cationic antimicrobial polymer polyhexamethylene guanidine hydrochloride and its mode of action. *Fungal Biology*, 121, 53–60. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2016.09.001>
8. Nikkola, J., Liu, X., Li, Y., Raulio, M., Alakomi, H.-L., Wei, J., & Tang, C. Y. (2013). Surface modification of thin film composite RO membrane for enhanced anti-biofouling performance. *Journal of Membrane Science*, 444, 192–200. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.05.03>
9. Obratsov, V. B., Rublova, E. D., & Amirulloeva, N. V. (2013). Influence of zinc ions on the inhibiting properties of polyhexamethylene guanidine derivatives. *Materials Science*, 49, 326–333. <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9618-y>
10. Farh, H., Hassan, M., Ben Seghier, M., Taiwo, R., & Zayed, T. (2023). Analysis and ranking of corrosion causes for water pipelines: A critical review. *npj Clean Water*, 6, Article 75. <https://doi.org/10.1038/s41545-023-00275-5>
11. Mariievskiy, V. F., Danilenko, I. I., Baranova, A. I., et al. (2009). Improving the epidemiological and chemical safety of water as a task of selecting new disinfectant reagents. *Preventive Medicine*, 3(7), 53–62.
12. Wang, J., Yu, Y., & Dong, Y. (2020). Disinfection of ready-to-eat lettuce using polyhexamethylene guanidine

- hydrochloride. *Microorganisms*, 8(2), 272. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8020272>
13. Picardo, J. R., Plan, E. L. C. V. M., & Vincenzi, D. (2023). Polymers in turbulence: Stretching statistics and the role of extreme strain rate fluctuations. *Journal of Fluid Mechanics*, 969, A24. <https://doi.org/10.1017/jfm.2023.524>
14. Baakeem, S. S., Hashlamoun, K., Hethnawi, A., Mheibesh, Y., & Nassar, N. N. (2024). Drag reduction by polymer additives: State-of-the-art advancements in experimental and numerical approaches. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63(17), 7485–7506. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.4c00202>
15. Graham, M. D. (2014). Drag reduction and the dynamics of turbulence in simple and complex fluids. *Physics of Fluids*, 26, 101301. <https://doi.org/10.1063/1.4895780>
16. Prokopov, V. O., Lypovetska, O. B., Zorina, O. V., et al. (2020). The problem of chlorinated organic compounds in drinking water in the works of Ukrainian scientists: A review of literature and own research. *Environment and Health*, 3(96), 65–73.
17. Ministry of Health of Ukraine. (2010). Guidelines for the use of “Akvaton-10” for disinfection of water treatment facilities and water in centralized, autonomous, and decentralized water supply (Order No. 16-2010, February 26, 2010). Kyiv, Ukraine.
18. Xi, L. (2019). Turbulent drag reduction by polymer additives: Fundamentals and recent advances. *Physics of Fluids*, 31, 121302. <https://doi.org/10.1063/1.5129619>
19. Zhang, X., Duan, X., & Muzychka, Y. S. (2021). Drag reduction by polymers: A brief review of the history, research progress, and prospects. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 48(6), 1–21. <https://doi.org/10.1615/InterJFluidMechRes.2021038352>
20. Kamel, A., & Shah, S. N. (2009). Effects of salinity and temperature on drag reduction characteristics of polymers in straight circular pipes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 67(1–2), 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2009.02.004>
21. Edson, J. S. (2020). Review of mechanical degradation and de-aggregation of drag reducing polymers in turbulent flows. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 276, 104225. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2019.104225>
22. Pereira, A. S., & Soares, E. J. (2012). Polymer degradation of dilute solutions in turbulent drag reducing flows in a cylindrical double gap rheometer device. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 179–180, 9–22. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2012.05.001>
23. Hashlamoun, K., Hethnawi, A., Bakir, M., Baakeem, S. S., Mheibesh, Y., & Nassar, N. N. (2023). Effect of salinity on drag reduction of additives and mixtures under turbulent flow. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(35), 14084–14099. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c02104>
24. Liberatore, M. W., Baik, S., McHugh, A. J., & Hanratty, T. J. (2004). Turbulent drag reduction of polyacrylamide solutions: Effect of degradation on molecular weight distribution. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 123(2–3), 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2004.08.006>
25. Nizhnik, T. Y., Baranova, A. I., Maglevanaya, T. V., Zhartovsky, S. V., & Strikalenko, T. V. (2019). On the hydrodynamic activity of a disinfectant reagent based on polyhexamethylene guanidine hydrochloride. *World Science*, 4(44), 11–15. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30042019/6465
26. Zhartovsky, S., & Maglyovana, T. (2020). Rationale of use guanidine surfactants for fire extinguishing in natural ecosystems. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 4, 124–129. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-4/124>
27. Figueredo, R. C. R., & Sabadini, E. (2003). Firefighting foam stability: The effect of the drag reducer poly(ethylene) oxide. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 215, 77–86. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(02\)00425-9](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00425-9)
28. Maglyovana, T., Nyzhnyk, T., Stas, S., Kolesnikov, D., & Strikalenko, T. (2020). Improving the efficiency of water fire extinguishing systems operation by using guanidine polymers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10), 20–25. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.196881>
29. Ministry of Health of Ukraine. (2010). Guidelines for the use of “Akvaton-10” for disinfection of water treatment facilities and water in centralized, autonomous, and decentralized water supply (Order No. 16-2010, February 26, 2010). Kyiv, Ukraine.
30. Zhou, Z., Wei, D., & Lu, Y. (2015). Polyhexamethylene guanidine hydrochloride shows bactericidal advantages over chlorhexidine digluconate against ESKAPE bacteria. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 62(2), 268–274. <https://doi.org/10.1002/bab.1255>
31. Ministry of Health of Ukraine. (2013). Technical specifications of Ukraine (TU U 24.1-25274537-005-2003) with amendments No. 1 and No. 2: “Complex action reagent ‘Akvaton-10’” (Conclusion of the State Sanitary and Epidemiological Examination No. 05.03.02-04/58289, July 2, 2013). Kyiv, Ukraine.
32. Nyzhnyk, Y. V., Baranova, A. I., Mariievskiy, V. F., Fedorova, L. N., Nadtocha, O. N., & Nyzhnyk, T. Y. (2007). Method for obtaining polyguanidines (Patent No. 79720). Ukrainian Patent Office.
33. Kolesnikov, D. V., Yakhno, O. M., Seminskaya, N. V., & Stas, S. V. (2014). Destabilization of flow in a channel with variable discharge along its length. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7), 45–49.
34. Zhang, Y., Zhou, F., & Kang, J. (2020). Flow and heat transfer in drag-reducing polymer solution flow through the corrugated tube and circular tube. *Applied Thermal Engineering*, 174, 115185. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115185>
35. Maglyovana, T. V., Nizhnyk, T. Yu., & Zhartovsky, S. V. (2017). Ecological aspects of the use of guanidine polymers under emergency conditions [Monograph, 2nd ed.]. Cherkasy: FOP Hordiienko Ye. I. – 210 p. – ISBN 978-966-9730-54-1.

Дата першого надходження статті до видання: 23.02.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.03.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)