

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАФТОВИХ НАСОСІВ З УРАХУВАННЯМ В'ЯЗКОСТІ ТРАНСПОРТОВАНОЇ НАФТИ

М. Д. Середюк

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. 050 1485716,
e-mail: serediukm@gmail.com*

Для вирішення низки завдань проектування та експлуатації магістральних нафтопроводів необхідно мати адекватні математичні моделі графічних характеристик відцентрових насосів, які є основним обладнанням нафтоперекачувальних станцій. Відомі на сьогодні аналітичні залежності описують тільки робочу зону насосів, і тому не можуть бути застосовані за малих подач, якими характеризується експлуатація нафтотранспортних систем України. Крім того, зазначені математичні моделі не враховують вплив в'язкості транспортованої нафти на напірні та енергетичні характеристики нафтових насосів. У роботі удосконалено метод математичного моделювання гідродинамічних характеристик відцентрових насосів магістральних нафтопроводів для повного діапазону робочих подач з урахуванням впливу в'язкості транспортованої нафти. Розглянуто математичні моделі характеристик нафтових насосів, коефіцієнти яких знаходять за координатами двох або трьох точок відповідних графіків, та поліноміальні моделі, коефіцієнти яких визначають методом найменших квадратів за множиною паспортних чи дослідних даних. Запропоновано адекватні математичні моделі для характеристик напору та коефіцієнта корисної дії нафтових насосів, які придатні для створення обчислювальних алгоритмів визначення пропускної здатності та енергоефективності експлуатації магістральних нафтопроводів. Доведено, що для нафтових насосів, які експлуатують за різних схем спільної роботи зі значним недовантаженням, перевагу слід віддавати математичним моделям характеристик, які одержані методом найменших квадратів. При цьому необхідну точність обчислень забезпечують поліноміальні моделі третього степеня. Запропоновано метод введення блоку контролю впливу в'язкості транспортованої нафти на характеристики насосів при визначенні пропускної здатності та енергоефективності експлуатації магістральних нафтопроводів.

Ключові слова: відцентровий насос, коефіцієнт швидкохідності, залежність напору від подачі, залежність коефіцієнта корисної дії від подачі, поліноміальні моделі, метод найменших квадратів, коригування характеристик насосів з урахуванням в'язкості нафти.

Для решения ряда задач проектирования и эксплуатации магистральных нефтепроводов необходимы адекватные математические модели графических характеристик центробежных насосов, являющихся основным оборудованием нефтеперекачивающих станций. Известные аналитические зависимости характеризуют только рабочую зону насосов, поэтому не могут быть использованы при малых подачах, имеющих место при эксплуатации нефтетранспортных систем Украины. Кроме того, эти математические модели не учитывают влияния вязкости транспортируемой нефти на напорные и энергетические характеристики нефтяных насосов. В работе усовершенствован метод математического моделирования гидродинамических характеристик центробежных насосов магистральных нефтепроводов для полного диапазона рабочих подач с учетом влияния вязкости перекачиваемой нефти. Рассмотрены математические модели характеристик нефтяных насосов, коэффициенты которых вычисляют по координатам двух или трех точек соответствующих графиков, а также полиномиальные модели, коэффициенты которых определяют методом наименьших квадратов, используя паспортные или экспериментальные данные. Предложены адекватные математические модели для характеристик напора и коэффициента полезного действия нефтяных насосов, которые можно использовать в вычислительных алгоритмах при определении пропускной способности и энергоэффективности эксплуатации магистральных нефтепроводов. Получено, что для нефтяных насосов, эксплуатируемых по различным схемам совместной работы при значительной недогрузке, преимущество имеют математические модели характеристик насосов, полученные методом наименьших квадратов. При этом необходимую точность расчетов обеспечивают полиномиальные уравнения третьей степени. Предложен метод введения блока контроля вязкости перекачиваемой нефти на характеристики насосов при определении пропускной способности и энергоэффективности эксплуатации магистральных нефтепроводов.

Ключевые слова: центробежный насос, коэффициент быстроходности, зависимость напора от подачи, зависимость коэффициента полезного действия от подачи, полиномиальные уравнения, метод наименьших квадратов, пересчет характеристик насосов с учетом вязкости нефти.

For solving a range of assignments concerning design and operation of main oil pipelines it is necessary to possess appropriate mathematical models of centrifugal pump characteristics as the pumps appear to be the main equipment of pumping stations. Known analytical dependences describe only operating envelope of the pumps and thus can't be applied for low flowrate regimes being inherent to the Ukrainian oil transmission system. In addition, these mathematical models do not take into account the effect of the viscosity of the transported oil on the pressure and energy characteristics of oil pumps. The work features the improved the method of mathematical modeling of the hydrodynamic characteristics of centrifugal pumps of main oil pipelines for the full range of working feeds, taking into account the effect of the viscosity of the pumped oil. It is also given a consideration to mathematical models of oil pumps characteristics, coefficients of which are found by the coordinates of two or three points of corresponding charts, and polynomial models, the coefficients of which are determined by the least squares method by a set of passport or experimental data. Adequate mathematical models for pressure characteristics and efficiency coefficient of oil pumps are proposed that are suitable for creation of computational algorithms for determining the throughput and energy efficiency of operation of main oil pipelines. It has been proved that for oil pumps that are operated under different combining schemes with significant reduction of their operation flowrate the advantage should be given to the mathematical models of the characteristics obtained by the method of least squares. In this case, polynomial models of the third degree provide the necessary accuracy of the calculations. The method of introducing a control unit for the influence of the transported oil viscosity on the characteristics of the pumps is proposed under determining the capability and energy efficiency of operation of main oil pipelines

Key words: centrifugal pump, speed ratio, head dependence on flowrate; the efficiency dependence on flowrate, polynomial models, least squares method, correction of pump characteristics taking into account viscosity.

Вступ. Один із пріоритетних напрямків в Україні – підвищення енергоефективності виробництва. Енергетичним об'єктами трубопроводного транспорту нафти є нафтоперекачувальні станції (НПС), які оснащені відцентровими нафтовими насосами. У процесі експлуатації магістральних нафтопроводів з метою керування обсягами транспортування нафти необхідно здійснювати регулярний технологічний моніторинг пропускної здатності нафтотранспортних систем та режимних параметрів НПС, від яких залежать витрати електроенергії на транспортування нафти. За неповного завантаження нафтопроводів правильний вибір комбінацій працюючих на НПС насосів дає змогу забезпечити виконання транспортної роботи за мінімальних витрат електроенергії, що значно підвищує енергоефективність трубопроводного транспорту нафти [1, 2, 3].

Пропускна здатність магістрального нафтопроводу і витрати електроенергії насосних агрегатів НПС залежать від десятків чинників. Одними із найбільш впливових чинників є гідродинамічні характеристики нафтових насосів, які наведені у паспорті насосів [4, 5]. Зазначені характеристики є результатами стендових випробувань насосів на заводах-виробниках і мають зазвичай вигляд графічних залежностей.

Вирішення завдання прогнозування пропускної здатності та енергоефективності експлуатації магістрального нафтопроводу вимагає розв'язання системи гідродинамічних рівнянь, які описують спільну роботу насосів кожної НПС і лінійної частини нафтопроводу з урахуванням його геометричних характеристик, профілю траси та фізичних властивостей транспортованої нафти. Через складність гідродинамічних

рівнянь пропускну здатність нафтопроводу знаходять методом ітерацій за робочою витратою нафти у нафтопроводі, який реалізують у комп'ютерних програмах [6, 7, 8].

Графічний вигляд характеристик нафтових насосів ускладнює завдання знаходження пропускної здатності магістральних нафтопроводів з урахуванням всіх чинників, тому у сучасних умовах для створення обчислювальних алгоритмів часто використовують математичні моделі характеристик нафтових насосів [9, 10]. Питання адекватного моделювання характеристик нафтових насосів має важливе теоретичне і практичне значення, що визначає актуальність досліджень, результати яких наведено нижче.

Аналіз досліджень і публікацій

Для вирішення зазначених вище завдань достатньо розробити адекватні математичні моделі для опису залежності напору і коефіцієнта корисної дії насоса (ККД) від його подачі. Потужність насоса за конкретного режиму його експлуатації може бути обчислена аналітичним способом.

Питання математичного моделювання характеристик нафтових насосів було предметом досліджень у ряді робіт [1,2,3,8,9,10]. У результаті теоретичних та експериментальних досліджень запропоновано ряд математичних моделей для опису робочої зони нафтових насосів [1,2,9,10]. Зазначимо, що робочою зоною насосів для магістральних нафтопроводів прийнято вважати вузький діапазон подач – від 0,8 до 1,2 його номінальної подачі.

Необхідною умовою експлуатації насосів у робочій зоні є повне завантаження магістрального нафтопроводу і реалізація режимів пере-

качування, які близькі до проектних. Магістральні нафтопроводи України сьогодні працюють зі значним недовантаженням за режимів, які суттєво різняться від проектних. У результаті фактична подача насосів НПС магістральних нафтопроводів України значно менша від подач робочої зони [3,6].

У зв'язку із цим виникла необхідність у визначенні адекватності існуючих математичних моделей для опису залежності напору і ККД нафтових насосів у широкому діапазоні робочих подач.

Робочою рідиною у процесі випробувань насосів з метою одержання його графічних характеристик є вода. За певних умов характеристики нафтового насоса, одержані на воді, можна без корекції застосовувати для розрахунку режимів перекачування нафти. Для кожної марки насоса можна виявити (виключно експериментальним шляхом), граничні значення в'язкості нафти, за яких розпочинається вплив цього чинника на характеристики напору і ККД. Опрацювання результатів унікальних експериментальних досліджень характеристик модельних нафтових насосів дало можливість запропонувати формули перерахунку параметрів їх роботи із води на високов'язку нафту [11]. Однак зазначені формули не описують в явному вигляді залежність напору і ККД насоса від його подачі у випадку перекачування високов'язкої нафти. Тому їх не можна застосувати в обчислювальних алгоритмах визначення пропускної здатності нафтопроводу. Це пояснює необхідність розроблення математичних моделей характеристик насосів, які враховують вплив в'язкості нафти і придатні для обчислювальних алгоритмів комп'ютерних програм проектних та експлуатаційних розрахунків магістральних нафтопроводів.

Метою досліджень є розроблення математичних моделей характеристик нафтових насосів для повного діапазону подач з урахуванням впливу в'язкості транспортованої нафти.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

– запропонувати математичні моделі паспортних характеристик напору і ККД нафтових насосів, які адекватні для повного діапазону робочих подач;

– розробити математичні моделі характеристик напору і ККД нафтових насосів, які враховують вплив в'язкості нафти і придатні для використання в обчислювальних алгоритмах знаходження пропускної здатності нафтопроводу методом ітерації за витратою нафти.

Виклад основного матеріалу

Для опису залежності напору нафтового насоса від його подачі застосуємо такі формули

$$H = a - bQ^2, \quad (1)$$

де a, b – коефіцієнти математичної моделі, які обчислюють за координатами двох точок напірної характеристики насоса;

$$H = a_1 + a_2Q + a_3Q^2, \quad (2)$$

де a_1, a_2, a_3 – коефіцієнти математичної моделі, які є розв'язком системи алгебраїчних рівнянь за координатами трьох точок напірної характеристики насоса;

Q – робоча подача насоса.

Дослідження будемо вести для насоса марки НМ 3600-230 з базовим ротором, оскільки він знайшов найширше застосування на нафтоперекачувальних станціях магістральних нафтопроводів України.

Використовуючи паспортні графічні характеристики зазначеного насоса у форматі А1, знаходимо з максимально можливою точністю дослідні значення напору і ККД через кожні 200 м³/год у діапазоні подач від нуля до 4000 м³/год. Ці значення будемо вважати базою для порівняння точності запропонованих математичних моделей.

У випадку застосування формули (1) для повного діапазону подач одержуємо таку залежність напору насоса (м) від подачі (м³/с):

$$H = 320 - 89Q^2. \quad (3)$$

Застосуємо формулу (1) спочатку для діапазону подач від 0 до 1000 м³/год, в якому значення ККД насоса менше за 50 %, а потім для діапазону від 1000 м³/год до 4000 м³/год. У результаті одержуємо відповідно

$$H = 320 - 220Q^2, \quad (4)$$

$$H = 309 - 80Q^2. \quad (5)$$

Аналогічно, знявши координати трьох точок з напірної характеристики насоса, знаходимо коефіцієнти математичної моделі (2) для повного діапазону подач

$$H = 320 - 27Q - 64,8Q^2, \quad (6)$$

- для діапазону подач від 0 до 1000 м³/год

$$H = 320 - 73,2Q + 43,2Q^2, \quad (7)$$

- для діапазону подач від 1000 м³/год до 4000 м³/год

$$H = 304,4 + 21,8Q - 96Q^2. \quad (8)$$

Формули (3)-(8) передбачають, що подача насоса задана у м³/с. Числові коефіцієнти моделей можна перерахувати для випадку задання подачі насоса у м³/год.

Таблиця 1 – Порівняння адекватності математичних моделей для напірної характеристики насоса НМ 3600-230

| Подача насоса, м ³ /год | Напір із паспортної характеристики, м | Відносне відхилення від паспортного значення напору насоса, обчислене за формулою | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------------------------------|---|-----|------|------|------|------|------|------|
| | | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) | (10) | (11) |
| 0 | 320 | 0 | 0 | | 0 | 0 | | 0,0 | 0,0 |
| 200 | 317 | 0,9 | 0,7 | | 0,4 | -0,3 | | 0,3 | -0,3 |
| 400 | 313 | 1,9 | 1,4 | | 1,0 | -0,2 | | 0,8 | -0,1 |
| 600 | 309 | 2,8 | 1,6 | | 1,5 | 0 | | 1,2 | 0,1 |
| 800 | 306 | 3,1 | 1,0 | | 1,6 | 0 | | 1,2 | 0,0 |
| 1000 | 303 | 3,3 | 0 | 0 | 1,5 | 0 | 0 | 1,1 | -0,1 |
| 1200 | 300 | 3,4 | | 0 | 1,3 | | 0,3 | 0,8 | -0,1 |
| 1400 | 296 | 3,6 | | 0,3 | 1,3 | | 0,8 | 0,8 | 0,1 |
| 1600 | 292 | 3,6 | | 0,4 | 1,1 | | 1,1 | 0,7 | 0,2 |
| 1800 | 288 | 3,4 | | 0,3 | 0,8 | | 1,1 | 0,4 | 0,3 |
| 2000 | 285 | 2,6 | | -0,2 | 0,0 | | 0,7 | -0,3 | -0,1 |
| 2200 | 280 | 2,4 | | -0,3 | -0,2 | | 0,7 | -0,5 | 0,0 |
| 2400 | 275 | 2,0 | | -0,6 | -0,7 | | 0,5 | -0,8 | 0,0 |
| 2600 | 270 | 1,3 | | -1,0 | -1,2 | | 0 | -1,2 | -0,2 |
| 2800 | 264 | 0,8 | | -1,3 | -1,6 | | -0,3 | -1,4 | -0,2 |
| 3000 | 257 | 0,5 | | -1,4 | -1,8 | | -0,4 | -1,4 | -0,2 |
| 3200 | 249 | 0,3 | | -1,3 | -1,7 | | -0,4 | -1,1 | -0,1 |
| 3400 | 240 | 0,3 | | -1,0 | -1,4 | | -0,3 | -0,5 | 0,1 |
| 3600 | 230 | 0,4 | | -0,4 | -0,8 | | 0,1 | 0,4 | 0,4 |
| 3800 | 220 | 0,4 | | -0,1 | -0,3 | | 0,2 | 1,3 | 0,3 |
| 4000 | 210 | 0,1 | | 0,1 | 0 | | 0 | 2,1 | -0,4 |

Для оцінювання адекватності моделей знайдемо відносну різницю розрахованого за моделлю H_m і фактичного значень напору насоса H_ϕ , одержаного із графічної паспортної характеристики, у відповідному діапазоні робочих подач

$$\delta = \frac{H_m - H_\phi}{H_\phi} \cdot 100 \% \quad (9)$$

Результати обчислень зведено у таблицю 1. Як засвідчують дані таблиці 1, у випадку визначення коефіцієнтів математичної моделі (1) для діапазону подач насоса НМ 3600-230 від 0 до 4000 м³/год, одержана формула недостатньо точно описує напірну характеристику за значень, менших від 2400 м³/год, похибка обчислень напору досягає 4 %.

Якщо зазначену формулу застосувати окремо для зони подач від 0 до 1000 м³/год, в якій робота зазначеного насоса є неекономічною, оскільки ККД менший за 50 %, то максимальне відхилення результатів становитиме 1,6 %. У той же час використання моделі (1) для діапазону подач насоса від 1000 м³/год до

4000 м³/год призведе до максимальної похибки знаходження напору насоса – мінус 1,4 %.

При застосуванні математичної моделі (2) та визначенні її коефіцієнтів для повного діапазону подач зазначена формула завищує величину напору насоса за значень подачі до 2000 м³/год максимум на 1,6 %, і в той же час занижує величину напору за значень подачі від 2000 м³/год до 4000 м³/год на 1,8 %.

Використання формули (2) окремо для зони подач від 0 до 1000 м³/год та зони від 1000 м³/год до 4000 м³/год дає змогу зменшити відносне відхилення результатів обчислень напору насоса до 1 %.

Для підвищення адекватності математичного моделювання напірних характеристик нафтових насосів у широкому діапазоні подач можна рекомендувати одержання поліноміальних залежностей методом найменших квадратів за множиною паспортних або дослідних даних. Застосовуючи стандартне програмне забезпечення Microsoft Excel, одержуємо для насоса НМ 3600-230 такі формули залежності напору від годинної подачі $Q_{год}$

$$H = 320 - 9,585 \cdot 10^{-3} Q_{200} - 4,203 \cdot 10^{-6} Q_{200}^2, \quad (10)$$

$$H = 320 - 1,973 \cdot 10^{-2} Q_{200} + 4,057 \cdot 10^{-6} Q_{200}^2 - 1,513 \cdot 10^{-9} Q_{200}^3. \quad (11)$$

Як засвідчують дані таблиці 1, у випадку використання поліному другого степеня максимальне відхилення величин напору від паспортних даних становитиме 1,2 % за малих подач і мінус 1,4 % за значних подач насоса. При застосуванні поліному третього степеня для опису напірної характеристики насоса похибка результатів не перевищує 0,4 %.

Проведемо аналогічні дослідження стосовно адекватності наведених нижче математичних моделей залежності ККД нафтового насоса від його подачі.

$$\eta = \eta_{max} \left[2 \frac{Q}{Q_{ном}} - \left(\frac{Q}{Q_{ном}} \right)^2 \right], \quad (12)$$

$$\eta = c_1 + c_2 Q + c_3 Q^2, \quad (13)$$

де η_{max} – максимальне значення ККД насоса, яке відповідає його номінальній подачі $Q_{ном}$,

c_1, c_2, c_3 – коефіцієнти математичної моделі, які знаходять шляхом розв'язування системи алгебраїчних рівнянь за координатами трьох точок графічної залежності ККД від подачі насоса.

Знаходимо коефіцієнти математичних моделей (12) і (13) для різних діапазонів подач насоса НМ 3600-230. У результаті одержуємо такі вирази:

для діапазону подач від 0 до 4000 м³/год

$$\eta = 86 \left[2 \frac{Q_{200}}{3600} - \left(\frac{Q_{200}}{3600} \right)^2 \right], \quad (14)$$

$$\eta = 208,8Q - 119,9Q^2, \quad (15)$$

для діапазону подач від 0 до 1000 м³/год

$$\eta = 238,8Q - 172,8Q^2, \quad (16)$$

для діапазону подач від 1000 м³/год до 4000 м³/год

$$\eta = 16,8 + 153,4Q - 83,7Q^2. \quad (17)$$

Використовуючи формулу, аналогічну виразу (9), знаходимо відносну різницю розрахованого за моделлю η_m і фактичного значень ККД насоса η_f , одержаного із графічної паспортної характеристики, для відповідного діапазону робочих подач. Результати обчислень зводимо у таблицю 2.

Аналіз даних таблиці 2 засвідчують, що загальноприйнята формула (12) для ККД насоса може бути використана тільки у межах вузько-

го діапазону подач – робочої зони насоса. За менших подач зазначена формула суттєво знижує значення ККД насоса, різниця результатів досягає 28 %.

У випадку використання формули (13) для всього діапазону подач відхилення результатів від паспортних значень ККД насоса досягає мінус 13 % за малих подач і 6 % за значних подач. Застосування цієї формули для діапазону подач від 1000 м³/год до 4000 м³/год дасть змогу звести відхилення результатів обчислень ККД насоса від паспортних значень до 6 %.

Для підвищення адекватності математичного моделювання характеристик ККД нафтових насосів у широкому діапазоні подач також рекомендуємо одержання поліноміальних залежностей методом найменших квадратів за множиною дослідних даних. Застосовуючи стандартне програмне забезпечення Microsoft Excel, одержуємо для насоса НМ 3600-230 такі формули залежності ККД від годинної подачі:

– для діапазону подач від 0 до 4000 м³/год

$$\eta = 6,006 \cdot 10^{-2} Q_{200} - 1,010 \cdot 10^{-5} Q_{200}^2, \quad (18)$$

$$\eta = 7,077 \cdot 10^{-2} Q_{200} - 1,882 \cdot 10^{-5} Q_{200}^2 + 1,598 \cdot 10^{-9} Q_{200}^3, \quad (19)$$

– для діапазону подач від 1000 м³/год до 4000 м³/год

$$\eta = 20,06 + 4,242 \cdot 10^{-2} Q_{200} - 6,703 \cdot 10^{-6} Q_{200}^2, \quad (20)$$

$$\eta = -3,835 + 7,726 \cdot 10^{-2} Q_{200} - 2,187 \cdot 10^{-5} Q_{200}^2 + 2,022 \cdot 10^{-9} Q_{200}^3. \quad (21)$$

Як засвідчують дані таблиці 2, у випадку використання поліному другого степеня для одержання характеристики ККД насоса методом найменших квадратів у повному діапазоні подач насоса НМ 3600-230 максимальне відхилення величин ККД від паспортних даних становитиме мінус 10 % за малих подач і 5 % – за більших подач насоса. При застосуванні поліному третього степеня для опису характеристики ККД насоса похибка результатів не перевищує 2 % за винятком малих подач, за яких робота зазначеного типорозміру насоса нееконічна.

Якщо за даним методом описувати характеристику ККД насоса для подач від 1000 м³/год до 4000 м³/год, то застосування поліному другого степеня дає змогу зменшити величину відхилення результатів обчислень до 3 %. Використання поліному третього степеня дає змогу одержати математичну модель, яка з точністю до 1 % описує паспортну графічну залежність ККД насоса від його подачі.

Таблиця 2 – Порівняння адекватності математичних моделей для характеристики ККД насоса НМ 3600-230

| Подача насоса, м ³ /год | ККД із паспортної характеристики насоса, % | Відносне відхилення від паспортного значення ККД насоса, обчислене за формулою | | | | | | | |
|------------------------------------|--|--|-------|------|------|-------|------|------|------|
| | | (14) | (15) | (16) | (17) | (18) | (19) | (20) | (21) |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | | |
| 200 | 12 | -22,6 | -6,4 | 0,4 | | -3,3 | 11,6 | | |
| 400 | 25 | -27,8 | -13,1 | -0,1 | | -10,4 | 1,4 | | |
| 600 | 35 | -24,9 | -10,1 | 0,0 | | -7,4 | 2,8 | | |
| 800 | 45 | -24,5 | -10,0 | -0,1 | | -7,6 | 0,7 | | |
| 1000 | 53 | -22,4 | -8,0 | 0,0 | 0 | -5,8 | 0,9 | 5,2 | 1,1 |
| 1200 | 61 | -21,7 | -7,7 | | -3,8 | -5,7 | -0,8 | 0,5 | -0,2 |
| 1400 | 67 | -19,6 | -5,9 | | -4,7 | -4,1 | -0,7 | -1,0 | 0,0 |
| 1600 | 73 | -18,6 | -5,3 | | -6,2 | -3,8 | -2,0 | -3,1 | -1,3 |
| 1800 | 77 | -16,2 | -3,3 | | -5,7 | -2,1 | -1,7 | -3,0 | -1,1 |
| 2000 | 79,5 | -13,2 | -0,6 | | -4,1 | 0,3 | -0,6 | -1,8 | -0,1 |
| 2200 | 81 | -9,9 | 2,3 | | -2,0 | 2,7 | 0,7 | -0,1 | 1,0 |
| 2400 | 83 | -7,9 | 3,5 | | -1,3 | 3,5 | 0,6 | 0,3 | 0,7 |
| 2600 | 84 | -5,5 | 5,1 | | 0,0 | 4,6 | 1,0 | 1,2 | 0,9 |
| 2800 | 85 | -3,8 | 5,7 | | 0,6 | 4,7 | 0,8 | 1,5 | 0,5 |
| 3000 | 86 | -2,8 | 5,5 | | 0,7 | 3,8 | 0,1 | 1,2 | -0,3 |
| 3200 | 86 | -1,2 | 5,7 | | 1,3 | 3,2 | 0,1 | 1,4 | -0,3 |
| 3400 | 86 | -0,3 | 5,0 | | 1,3 | 1,6 | -0,2 | 0,9 | -0,6 |
| 3600 | 86 | 0,0 | 3,4 | | 0,7 | -0,8 | -0,7 | -0,1 | -0,9 |
| 3800 | 85 | 0,9 | 2,2 | | 0,6 | -3,1 | -0,2 | -0,6 | -0,1 |
| 4000 | 84 | 1,1 | 0 | | 0 | -6,4 | 0,2 | -1,8 | 0,8 |

Всі наведені вище математичні моделі призначені для опису графічних паспортних характеристик нафтових насосів, одержаних у результаті лабораторних досліджень на воді. Як засвідчили теоретичні та експериментальні дослідження, якщо в'язкість транспортованої нафти не перевищує певне граничне значення, то ці характеристики можна без коригування застосовувати при технологічних розрахунках магістральних нафтопроводів [1,2,11].

Якщо транспортована нафтопроводом нафта є високов'язкою, але при цьому характеризується властивостями ньютонівської рідини, то можуть бути використані такі емпіричні формули перерахунку режимних параметрів нафтових насосів у робочій зоні [11]

$$H_v = H_e \left(1 - \alpha_n \lg \frac{Re_n}{Re} \right), \quad (22)$$

$$Q_v = Q_e \left(\frac{H_v}{H_e} \right)^{1,5}, \quad (23)$$

$$\eta_v = \eta_e \left(1 - \alpha_\eta \lg \frac{Re_\eta}{Re} \right), \quad (24)$$

де H_e, Q_e, η_e – напір, подача і ККД насоса згідно з паспортною характеристикою, яка знята на воді;

H_v, Q_v, η_v – відповідні значення напору, подачі і ККД насоса при роботі на високов'язкій нафті;

Re – число Рейнольдса для умов руху нафти в насосі;

$$Re = \frac{nD_2^2}{\nu}, \quad (25)$$

n – обертова частота ротора насоса;

D_2 – зовнішній діаметр робочого колеса насоса;

ν – кінематична в'язкість транспортованої нафти;

Re_n – граничне число Рейнольдса, яке відповідає мінімальному значенню в'язкості, за якого розпочинається вплив в'язкості на напірну характеристику насоса,

$$Re_n = 3,16 \cdot 10^5 n_s^{-0,305}, \quad (26)$$

n_s - коефіцієнт швидкохідності насоса;

Re_η – граничне число Рейнольдса, яке відповідає мінімальному значенню в'язкості, за якого розпочинається вплив в'язкості на характеристику ККД насоса,

$$Re_\eta = rn_s^\varepsilon, \quad (27)$$

якщо $n_s < 100$, то $r = 6,7 \cdot 10^4$; $\varepsilon = 0,137$;

якщо, $n_s > 100$, то $r = 9,1 \cdot 10^3$; $\varepsilon = 0,573$;

α_n, α_η – коефіцієнти, які характеризують кути нахилу напірної характеристики і характеристики ККД до горизонту в рівняннях перерахунку,

$$\alpha_n = 0,128; \quad \alpha_\eta = n_s^{-0,262}. \quad (28)$$

Виразимо мінімальні значення кінематичної в'язкості, за яких розпочинається вплив зазначеного чинника на характеристику напору і ККД насоса, через відповідні граничні значення чисел Рейнольдса Re_n і Re_η

$$v_{min_n} = \frac{nD_2^2}{Re_n}, \quad (29)$$

$$v_{min_\eta} = \frac{nD_2^2}{Re_\eta}. \quad (30)$$

Для насоса НМ 3600-230 з базовим ротором коефіцієнт швидкохідності $n_s = 131$, обертова частота $n = 50$ об/с, зовнішній діаметр робочого колеса $D_2 = 0,45$ м [1]. Використовуючи формули (26)-(30), визначаємо граничні значення кінематичної в'язкості нафти

$$Re_n = 3,16 \cdot 10^5 \cdot 131^{-0,305} = 7,14 \cdot 10^4;$$

$$Re_\eta = 9,1 \cdot 10^3 \cdot 131^{0,573} = 1,49 \cdot 10^5;$$

$$v_{min_n} = \frac{50 \cdot 0,45^2}{7,14 \cdot 10^4} = 1,42 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$v_{min_\eta} = \frac{50 \cdot 0,45^2}{1,49 \cdot 10^5} = 0,68 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Формули (22) і (24) для перерахунку напору і ККД насоса у його робочій зоні при роботі на в'язкій нафті з урахуванням виразів (25), (29) і (30) набувають вигляду

$$H_v = H_e \left(1 - \alpha_n \lg \frac{v}{v_{min_n}} \right), \quad (31)$$

$$\eta_v = \eta_e \left(1 - \alpha_\eta \lg \frac{v}{v_{min_\eta}} \right). \quad (32)$$

Як зазначалось вище, процес визначення пропускної здатності нафтопроводу та енергетичних витрат на транспортування нафти передбачає застосування методу ітерацій за робо-

чою витратою нафти. У випадку перекачування нафтопроводом високов'язкої нафти безпосередньо застосувати в обчислювальних алгоритмах формул перерахунку характеристик насосів (31), (32) і (23) неможливо. Необхідно за відомою в'язкістю транспортованої нафти перерахувати характеристики напору і ККД насоса, а потім виконати їх математичне моделювання, тобто одержати адекватні аналітичні залежності напору і ККД насоса від його подачі.

Зазначені формули справедливі тільки для вузького діапазону подач – робочої зони насоса. Необхідно запропонувати принцип розширення сфери застосування зазначених формул для всього діапазону робочих подач нафтових насосів.

Експериментальні дослідження, виконані для модельних нафтових насосів, довели, що у разі зростання в'язкості робочої рідини напірні характеристики збільшують свою крутизну при сталому значенні напору за нульової подачі [1,11]. Тому за межею робочої зони, тобто для подач, менших за $0,8Q_{годном}$, пропонуємо такий вираз для перерахунку напірної характеристики насоса

$$H_v = H_e (1 - \beta Q_{год}), \quad (33)$$

де $Q_{год}$ – годинна робоча подача нафти у нафтопроводі;

β – комплекс параметрів;

$$\beta = \frac{\alpha_n}{0,8Q_{годном}} \lg \frac{v}{v_{min_n}}. \quad (34)$$

Рисунок 1 ілюструє одержані нами залежності напору насоса від його подачі для різних значень в'язкості нафти. Верхня крива відповідає мінімальному значенню в'язкості нафти $v_{min_n} = 1,42 \text{ Ст} = 1,42 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, нижня крива – максимальному значенню в'язкості робочої рідини нафтових насосів $v_{max} = 3 \text{ Ст} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ згідно з ГОСТ 12124.

Тут наведено результати математичного моделювання напірних характеристик насоса за різних значень в'язкості нафти засобами Microsoft Excel.

Для визначення пропускної здатності та енергоефективності нафтопроводів з врахуванням впливу в'язкості нафти на характеристики насосів представляємо залежність напору насоса від його подачі у вигляді

$$H = H_o + A_n Q_{год} + B_n Q_{год}^2 + C_n Q_{год}^3, \quad (35)$$

де H_o – напір насоса за нульової подачі;

A_n, B_n, C_n – коефіцієнти математичної моделі напірної характеристики насоса, функції кінематичної в'язкості.

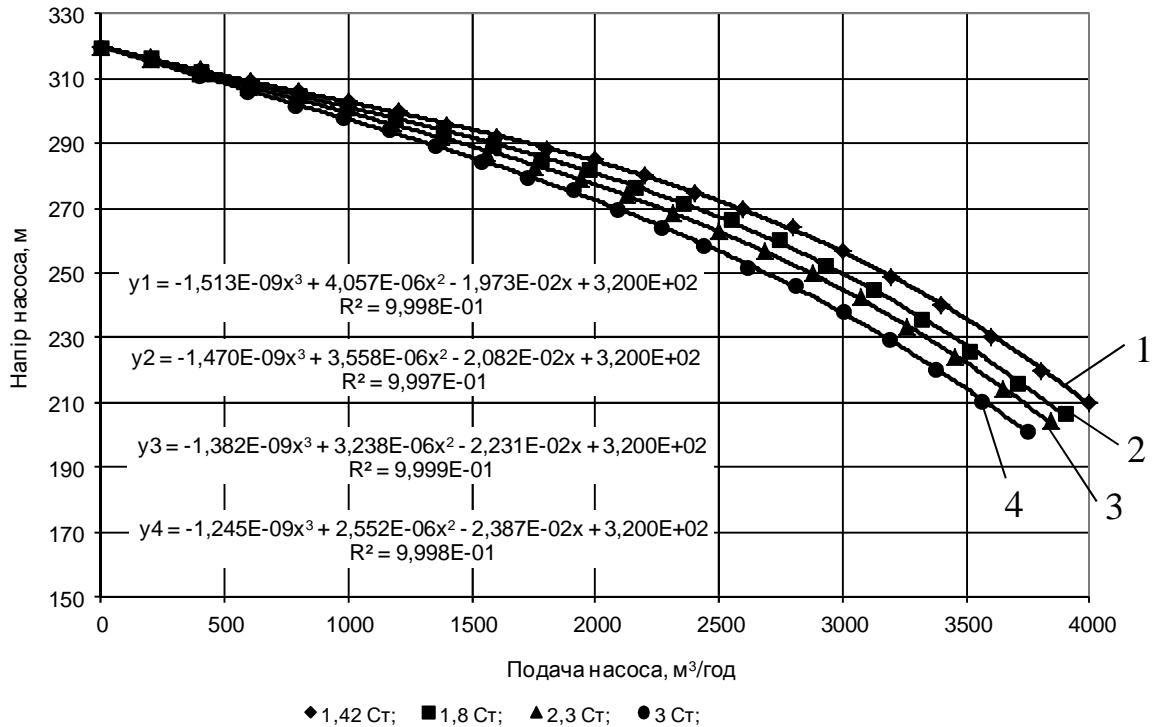


Рисунок 1 – Вплив в'язкості нафти на напірну характеристику насоса НМ 3600-230

Для коефіцієнтів математичної моделі напірної характеристики насоса застосуємо такі математичні вирази

$$A_n = a_{1n} + a_{2n}V + a_{3n}V^2, \quad (36)$$

$$B_n = b_{1n} + b_{2n}V + b_{3n}V^2, \quad (37)$$

$$C_n = c_{1n} + c_{2n}V + c_{3n}V^2, \quad (38)$$

де $a_{1n}, a_{2n}, a_{3n}, b_{1n}, b_{2n}, b_{3n}, c_{1n}, c_{2n}, c_{3n}$ – коефіцієнти математичної моделі, які знаходять методом найменших квадратів залежно від в'язкості нафти.

Для насоса, що досліджують, у діапазоні в'язкості, що зазначений вище, одержуємо такі вирази (кінематична в'язкість у $\text{м}^2/\text{с}$):

$$A_n = -1,433 \cdot 10^{-2} - 43,26 \cdot V + 3,806 \cdot 10^4 V^2, \quad (39)$$

$$B_n = 5,680 \cdot 10^{-6} - 1,266 \cdot 10^{-2} V + 7,611 \cdot V^2, \quad (40)$$

$$C_n = -1,612 \cdot 10^{-9} + 1,946 \cdot 10^{-7} V + 3,436 \cdot 10^{-3} V^2. \quad (41)$$

На рисунку 1 у математичних виразах використані такі позначення:

y – напір насоса у м,

x – подача насоса у $\text{м}^3/\text{год}$,

R^2 – величина вірогідності апроксимації.

Аналогічні дослідження виконуємо для характеристики ККД насоса. Рисунок 2 ілюструє розраховані залежності ККД насоса від його подачі для різних значень в'язкості нафти. Верхня крива відповідає мінімальному значенню

в'язкості нафти $\nu_{\min\eta} = 0,68 \text{ Ст} = 0,68 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$,

нижня крива – максимальному значенню в'язкості робочої рідини нафтових насосів $\nu_{\max} = 3 \text{ Ст} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ згідно з ГОСТ 12124.

Тут же наведено результати моделювання характеристик ККД насоса за різних значень в'язкості нафти.

Для визначення витрат енергії на транспортування нафти нафтопроводом представляємо залежність ККД насоса від його подачі з врахуванням в'язкості нафти у вигляді

$$\eta = A_\eta Q_{\text{зод}} + B_\eta Q_{\text{зод}}^2 + C_\eta Q_{\text{зод}}^3, \quad (42)$$

де A_η, B_η, C_η – коефіцієнти математичної моделі характеристики ККД насоса, функції кінематичної в'язкості нафти.

Для коефіцієнтів математичної моделі характеристики ККД насоса використаємо такі математичні вирази

$$A_\eta = a_{1\eta} + a_{2\eta}V + a_{3\eta}V^2, \quad (43)$$

$$B_\eta = b_{1\eta} + b_{2\eta}V + b_{3\eta}V^2, \quad (44)$$

$$C_\eta = c_{1\eta} + c_{2\eta}V + c_{3\eta}V^2, \quad (45)$$

де $a_{1\eta}, a_{2\eta}, a_{3\eta}, b_{1\eta}, b_{2\eta}, b_{3\eta}, c_{1\eta}, c_{2\eta}, c_{3\eta}$ – коефіцієнти математичної моделі, які знаходять методом найменших квадратів залежно від в'язкості нафти.

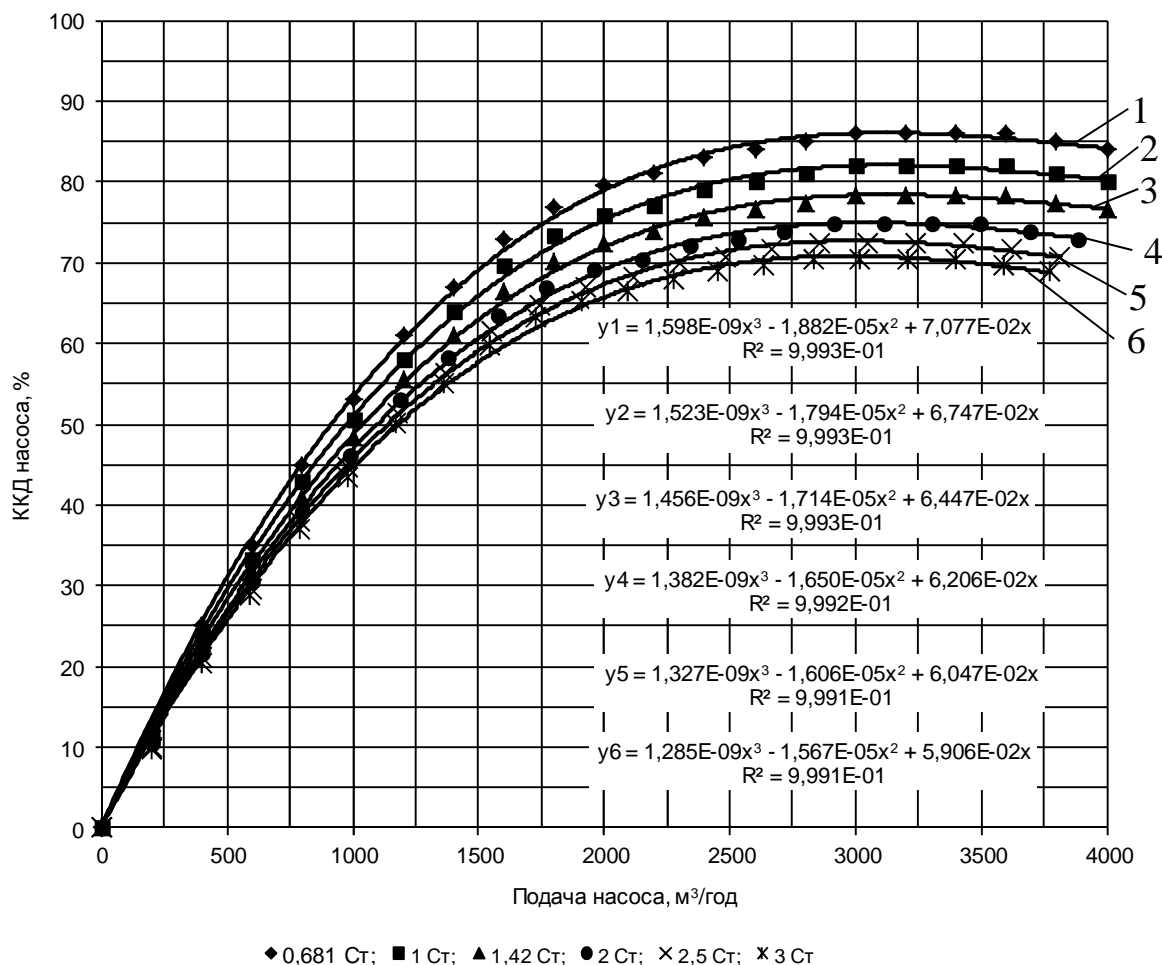


Рисунок 2 – Вплив в'язкості нафти на характеристику ККД насоса НМ 3600-230

Для насоса, який досліджують, одержуємо такі вирази (кінематична в'язкість у м²/с):

- для діапазону в'язкості нафти від $0,68 \cdot 10^{-4}$ м²/с до $1,42 \cdot 10^{-4}$ м²/с, за якого в'язкість нафти впливає тільки на характеристику ККД насоса

$$A_\eta = 8,077 \cdot 10^{-2} - 1,763 \cdot 10^2 v + 4,333 \cdot 10^5 v^2, \quad (46)$$

$$B_\eta = -2,143 \cdot 10^{-5} + 4,560 \cdot 10^{-2} v - 1,072 \cdot 10^2 v^2, \quad (47)$$

$$C_\eta = 1,828 \cdot 10^{-9} - 4,070 \cdot 10^{-6} v + 1,023 \cdot 10^{-2} v^2, \quad (48)$$

- для діапазону в'язкості нафти від $1,42 \cdot 10^{-4}$ м²/с до $3 \cdot 10^{-4}$ м²/с, за якого в'язкість нафти впливає на характеристику напору і ККД насоса

$$A_\eta = 7,209 \cdot 10^{-2} - 63,02 \cdot v + 6,551 \cdot 10^4 v^2, \quad (49)$$

$$B_\eta = -1,898 \cdot 10^{-5} + 1,511 \cdot 10^{-2} v - 13,55 \cdot v^2, \quad (50)$$

$$C_\eta = 1,699 \cdot 10^{-9} - 2,001 \cdot 10^{-6} v + 2,072 \cdot 10^{-3} v^2. \quad (51)$$

Для прикладу використаємо одержані формули для перерахунку режимних параметрів насоса НМ 3600-230 за кінематичної в'язкості нафти $\nu = 2,7 \cdot 10^{-4}$ м²/с. Приймаємо подачу

насоса за межею робочої зони насоса $Q_{год} = 2000$ м³/год.

Використовуючи формули (36)-(38), обчислюємо коефіцієнти математичної моделі напірної характеристики насоса, які залежать від в'язкості нафти

$$A_H = -2,324 \cdot 10^{-2} \text{ м / (м}^3\text{/год)},$$

$$B_H = 2,817 \cdot 10^{-6} \text{ м / (м}^3\text{/год)}^2,$$

$$C_H = -1,309 \cdot 10^{-9} \text{ м / (м}^3\text{/год)}^3.$$

Знаходимо скоригований напір насоса з врахуванням заданої в'язкості нафти за формулою (35)

$$H_v = 320 - 2,324 \cdot 10^{-2} 2000 + 2,817 \cdot 10^{-6} 2000^2 - 1,309 \cdot 10^{-9} 2000^3 = 277 \text{ м.}$$

Використовуючи формули (46)-(48), обчислюємо коефіцієнти математичної моделі характеристики ККД насоса, які залежать від в'язкості нафти

$$A_{\eta} = 5,985 \cdot 10^{-2} \% / (\text{м}^3/\text{Год}),$$

$$B_{\eta} = -1,589 \cdot 10^{-5} \% / (\text{м}^3/\text{Год})^2,$$

$$C_{\eta} = 1,310 \cdot 10^{-9} \% / (\text{м}^3/\text{Год})^3.$$

Визначаємо скоригований ККД насоса за заданих значень подачі та в'язкості нафти

$$\eta = 5,985 \cdot 10^{-2} 2000 - 1,589 \cdot 10^{-5} 2000^2 + 1,31 \cdot 10^{-9} 2000^3 = 67 \ \%.$$

Розроблений метод одержання скоригованих з врахуванням в'язкості нафти аналітичних виразів характеристик насосів для повного діапазону робочих подач може бути застосований для параметричного ряду спіральних нафтових насосів серії НМ, які експлуатуються на нафто-транспортних системах України.

Висновки

1 Використання загальноприйнятої математичної моделі напірної характеристики нафтових насосів, коефіцієнти якої знаходять за координатами двох точок відповідної паспортної характеристики для повного діапазону подач, не забезпечує необхідної точності обчислень. Застосування моделі напірної характеристики нафтових насосів, коефіцієнти якої знаходять за координатами трьох точок паспортної характеристики для повного діапазону подач, дає змогу зменшити величину похибки до 2 %.

2 Використання зазначених математичних моделей окремо для зони подач зі значеннями ККД насоса до 50 %, та зони з вищими значеннями ККД зменшує відносне відхилення результатів обчислень напору від паспортних даних до 1 %.

3 Якщо необхідно застосувати в обчислювальному алгоритмі одну аналітичну залежність напору насоса від подачі для повного робочого діапазону, то доцільно використовувати поліноми третього степеня, одержані методом найменших квадратів за паспортними або фактичними даними.

4 Загальноприйнята формула для ККД насоса, що включає максимальне його значення, може бути використана тільки у межах робочої зони насоса.

5 Застосування математичної моделі характеристики ККД, коефіцієнти якої знаходять за координатами трьох точок відповідної паспортної характеристики для повного діапазону подач, не забезпечує необхідної точності обчислень; використання зазначеної моделі окремо для зони подач зі значеннями ККД насоса до 50 %, та зони з вищими значеннями ККД дає

змогу зменшити відносне відхилення результатів обчислень від паспортних даних до 6 %.

6 З метою підвищення адекватності математичного моделювання характеристик ККД нафтових насосів у широкому діапазоні подач доцільно застосовувати поліноміальні залежності третього степеня, одержані методом найменших квадратів. При цьому буде забезпечена точність обчислень ККД до 2 %.

7 При створенні методик визначення пропускної здатності та енергоефективності нафтопроводів необхідно передбачити введення блоку контролю впливу в'язкості транспортованої нафти на характеристики насосів.

8 Методика, що пропонується, дає змогу для повного діапазону подач нафтових насосів без застосування графічних залежностей знайти скориговані значення напору і ККД насоса як функцію кінематичної в'язкості транспортованої нафти. Вона може бути використана при розробленні методів та обчислювальних алгоритмів проектних та експлуатаційних розрахунків магістральних нафтопроводів.

Література

1. Середюк М. Д., Якимів Й. В., Лісафін В.П. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів : підручник для ВНЗ. Івано-Франківськ, 2002. 517 с.
2. Коршак А. А., Нечваль А. М. Трубопроводный транспорт нефти, нефтепродуктов и газа : учебник для вузов. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2005. 515 с.
3. Середюк М. Д., Грудз В. Я. Шляхи підвищення ефективності та зменшення енерговитратності процесів транспортування та зберігання нафти і газу. *Нафтогазова енергетика*. 2007. № 2(3). С. 24-31.
4. Середюк М. Д., Івоняк А. С. Методика розрахунку режимних та енергетичних параметрів роботи магістральних нафтопроводів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2002. № 1(2). С. 50-54.
5. Середюк М. Д. Методика нормування витрат електроенергії на транспортування нафти магістральними нафтопроводами. *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. 2002. № 2(3). С. 57-60.
6. Середюк М. Д., Яновський С. Р. Вибір енергоефективних режимів експлуатації нафто-транспортної системи України за її неповного завантаження. *Нафтогазова галузь України*. 2017. № 3(27). С. 29-33.

7. Середюк М. Д., Григорський С. Я. Визначення пропускної здатності та енерговитратності двониткових нафтопровідних систем. *Міжнародний науковий журнал*. 2018. Т. 1. № 3(43). С. 81-87.

8. S.erediuk M. D. Peculiarities of calculation of throughput capacity and energy consumption of oil pipeline at parallel operation of pumping units. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2018. Vol. 5. Issue 1. P. 28-31.

9. Kostyshyn V. S., Kurlyak P. O. Simulation of performance characteristics of centrifugal pumps by the electro-hydrodynamic analogy method. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2015. Vol. 2. Issue 1. P. 24-31.

10. Григорський С. Я., Середюк М. Д. Математичне моделювання характеристик нафтових насосів за зміни обертової частоти. *Міжнародний науковий журнал*. 2017. Т. 1. № 1 (23). С. 99-104.

11. РД 39-30-990-84. Методика расчета напорных характеристик и пересчета параметров центробежных насосов магистральных нефтепроводов при изменении частоты вращения и вязкости перекачиваемой жидкости / Аитова Н. З., Еронен В. И., Колпаков Л. Г. Введ. 01.03.1984. 1984. ВНИИСПТнефть. 37 с.

References

1. Seredjuk M. D., Jakymiv J. V., Lisafin V.P. *Truboprovodnyj transport nafty i naftoproduktiv: pidruchnik dlja VNZ*. Ivano-Frankivsk, 2002. 517 p.

2. Korshak A. A., Nechval A. M. *Truboprovodnyj transport nefti, nefteproduktov i gaza : uchebnik dlja vuzov*. Ufa: DyzajnPolyhrafServys. 2005. 515 p.

3. Seredjuk M. D., Hrudz V. Ja. Shljahy pidvyshchennja efektyvnosti ta zmeshennja enerhovytratnosti procesiv transportuvannja ta zberihannja nafty i gazu. *Naftohazova enerhetyka*. 2007. No 2(3). P. 24-31.

4. Seredjuk M. D., Ivonjak A. S. Metodyka rozrahunku rezhymnyh ta enerhetychnyh parametriv roboty mahistralnyh naftoprovodiv. *Naukovyj visnyk Ivano-Frankivskoho nacionalnoho tehničnogo universytetu nafty i hazu*. 2002. No 1(2). P. 50-54.

5. Seredjuk M. D. Metodyka normuvannja vytrat elektroenerhiji na transportuvannja nafty mahistralnymy naftoprovodamy. *Rozvidka ta rozrobka naftovyh i hazovyh rodovyshch*. 2002. No 2(3). P. 57-60.

6. Seredjuk M. D., Janovskij S. R. Vybir enerhoefektyvnyh rezhymiv ekspluataciji nafto-

transportnoji systemy Ukrajinny za jiji nepovnoho zavantazhennja. *Naftohazova haluz Ukrajinny*. 2017. No 3(27). P. 29-33.

7. Seredjuk M. D., Hryhorskij S. Ja. Vyznachennja propusknoji zdattnosti ta enerhovytratnosti dvonytkovyh naftoprovodnyh system. *Mizhnarodnyj naukovyj zhurnal*. 2018. T.1. No 3 (43). P. 81-87.

8. S.erediuk M. D. Peculiarities of calculation of throughput capacity and energy consumption of oil pipeline at parallel operation of pumping units. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2018. Vol. 5. Issue 1. P. 28-31.

9. Kostyshyn V. S., Kurlyak P. O. Simulation of performance characteristics of centrifugal pumps by the electro-hydrodynamic analogy method. *Journal of Hydrocarbon Power Engineering*. 2015. Vol. 2. Issue 1. P. 24-31.

10. Hryhorskij S. Ja., Seredjuk M. D. Matematychno modeljuvannja harakterystyk naftovyh nasosiv za zminy obertovoji chastoty. *Mizhnarodnyj naukovyj zhurnal*. 2017. T. 1. No 1 (23). P. 99-104.

11. RD Z9-30-990-84. Metodyka rascheta napornyh harakterystyk y perescheta parametrov centrobezhnyh nasosov magistralnyh nefteprovodov pri izmenenii chastoty vrashchenija i vjazkosti perekachivaemoj zhidkosti / Aitova N. Z., Eronen V. Y., Kolpakov L. H. Vved. 01.03.1984. 1984. VNYYSPTneft. 37 p.