УДК 622.692.4

Григорський Станіслав Ярославович
кандидат технічних наук,
асистент кафедри транспорту і зберігання нафти і газу
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Григорский Станислав Ярославович
кандидат технических наук,
ассистент кафедры транспорта и хранения нефти и газа
Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа
Grygorskyi S.
PhD, assistant lecturer,
department of transport and storage of oil and gas
Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas

Середюк Марія Дмитрівна
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри транспорту і зберігання нафти і газу
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Середюк Мария Дмитриевна
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой транспорта и хранения нефти и газа
Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа
Serediuk M.
doctor of technical sciences, professor, head of department
department of transport and storage of oil and gas
Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАФТОВИХ НАСОСІВ ЗА ЗМІНИ ОБЕРТОВОЇ ЧАСТОТИ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК НЕФТЯНЫХ НАСОСОВ ПРИ СМЕНЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

MATHEMATICAL MODELING CHARACTERISTICS OF OIL PUMPS FOR CHANGE OF ROTATIONAL FREQUENCY

Анотація. *Удосконалено метод математичного моделювання характеристик насосних агрегатів магістральних нафтопроводів за зміни обертової частоти. Для перерахунку використані графічні характеристики насосів, одержані експериментальним шляхом за номінального значення обертової частоти. Метод базується на застосуванні теорії подібності відцентрових машин.*

Ключові слова: *відцентровий насос, теорія подібності відцентрових машин, номінальний режим, енергоефективність.*

Аннотация. *Усовершенствован метод математического моделирования характеристик насосных агрегатов магистральных нефтепроводов при изменении частоты вращения вала. Для пересчета использованы графические характеристики насосов, полученные экспериментальным путем при номинальном значении частоты вращения вала. Метод основан на применении теории подобия центробежных машин.*

Ключевые слова: *центробежный насос, теория подобия центробежных машин, номинальный режим, энергоэффективность.*

Summary. *The method of mathematical modeling characteristics of pumping units for oil pipelines rotary frequency was improved. For recalculation were used graphic characteristics of pumps, obtained experimentally for the nominal value of rotational frequency. The method is based on the application of similarity theory of centrifugal machines.*

Key words: *centrifugal pump, centrifugal machines similarity theory, nominal mode, energy efficiency.*

Основним обладнанням нафтоперекачувальних станцій (НПС) магістральних нафтопроводів є електроприводні відцентрові насосні агрегати, що споживають 96–98% від загальностанційних витрат електроенергії. Сьогодні на магістральних нафтопроводах України використовують магістральні та підпірні насосні агрегати, що працюють зі сталою обертовою частотою. Для проведення проектних та експлуатаційних розрахунків нафтопроводів використовують характеристики насосів, одержані шляхом опрацювання результатів стендових випробувань насоса на заводі-виробнику.

Характеристика насоса — це графічна залежність напору, коефіцієнта корисної дії (ККД), потужності на валу та допустимого кавітаційного запасу від подачі насоса за сталої обертової частоти і певних фізичних властивостей транспортованої рідини. Всі характеристики магістральних нафтових насосів серії НМ одержані за обертової частоти 3000 об/хв, характеристики підпірних насосів серії НПВ зняті за обертової частоти 1500 об/хв.

Керування процесами експлуатації магістральних нафтопроводів об'єктивно вимагає регулювання режимів транспортування нафти. Для регулювання технологічних режимів перекачування нафти використовують різноманітні технології, серед яких основними є вибір певних комбінацій включених насосів, дроселювання потоку нафти на виході насосів, обточування робочих коліс тощо. Кожен із зазначених способів регулювання має переваги та недоліки і характеризується певною сферою застосування.

Як показує практика експлуатації вітчизняних нафтопроводів, традиційні способи регулювання не завжди здатні забезпечити реалізацію енергоефективних режимів транспортування нафти.

Особливістю відцентрового насоса є те, що параметри його роботи суттєво залежать від обертової частоти вала. Змінюючи обертову частоту, можна на базі конкретного насоса ніби одержувати множину насосів, що характеризуються принципово різними характеристиками. Це дає можливість адаптувати режим експлуатації насоса до умов конкретної нафтопровідної системи і тим самим реалізувати енергоефективну технологію трубопровідного транспорту нафти.

За думкою вітчизняних і закордонних вчених [1, 2, 3, 4], регулювання режимів роботи насосів зміною обертової частоти економічно вигідно, якщо технічно можливо. Відомі три технічні варіанти регулювання обертової частоти насосів: встановлення спеціальних двигунів зі змінною обертовою частотою; використання спеціальних регулюючих муфт; встановлення перетворювачів частоти змінного струму.

У світовій практиці найбільшого застосування набули насосні агрегати з частотно-регульованим електричним приводом [1, 2, 3, 4].

Як зазначалось вище, для проведення гідравлічних розрахунків та визначення пропускної здатності нафтопровідної системи необхідно мати характеристики всіх встановлених на нафтоперекачувальних станціях насосів. Оскільки процедура визначення пропускної здатності нафтопроводу передбачає реалізацію методу послідовних наближень, то графічні характеристики насосів доцільно представляти у вигляді аналітичних виразів — математичних моделей. Методи математичного моделювання характеристик нафтових насосів, які відповідають традиційній сталій обертовій частоті, детально описано у роботах [1, 3, 5]. У той же час недостатньо розроблено інженерні методи прогнозування та математичного моделювання характеристик нафтових насосів за умови зміни у широкому діапазоні обертової частоти ротора.

Метою роботи є удосконалення методу математичного моделювання характеристик нафтових насосів за різних значень обертової частоти валу на основі теорії подібності відцентрових машин.

У процесі досліджень вирішувались такі задачі:

1) математичне моделювання напірної характеристики та кривої ККД насосів серій НМ і НПВ за номінального значення обертової частоти;

2) математичне моделювання напірної характеристики та кривої ККД насосів серій НМ і НПВ за довільного значення обертової частоти;

3) визначення подачі насоса, що відповідає максимальному значенню ККД за довільної величини обертової частоти.

Оскільки характеристики нафтових насосів одержують на стенді лише за номінального значення обертової частоти $n_н$, то іншої бази для прогнозування характеристик за іншого значення обертової частоти немає. А інструментом для перерахунку характеристик насоса за іншої обертової частоти є часткові формули подібності відцентрових машин [5]

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{n}{n_н}, \tag{1}$$

$$\frac{H'}{H} = \left(\frac{n}{n_н}\right)^2, \tag{2}$$

$$\frac{N'}{N} = \left(\frac{n}{n_н}\right)^3, \tag{3}$$

де Q', H', N' — об'ємна подача, напір і потужність на валу насоса за обертової частоти n;

Q, H, N — об'ємна подача, напір і потужність на валу насоса за номінального значення обертової частоти $n_н$.

Введемо поняття відносної обертової частоти за умовою

$$\gamma = \frac{n}{n_н}. \quad (4)$$

З урахуванням (4) формули (1)–(3) набувають вигляду

$$\frac{Q'}{Q} = \gamma, \quad (5)$$

$$\frac{H'}{H} = \gamma^2, \quad (6)$$

$$\frac{N'}{N} = \gamma^3. \quad (7)$$

Оскільки за відомих значень подачі, напору та ККД насоса величина потужності на валу може бути визначена без використання графічної характеристики насоса, то нижче розглянемо метод математичного моделювання напірної характеристики та кривої ККД.

Для математичного моделювання напірної характеристики нафтових насосів за номінального значення обертової частоти використаємо таку поліноміальну залежність:

$$H = a + bQ + cQ^2 + dQ^3, \quad (8)$$

де a, b, c, d — коефіцієнти математичної моделі напірної характеристики насоса за номінального значення обертової частоти.

Коефіцієнти математичної моделі напірної характеристики насоса за номінального значення обертової частоти можна визначити за координатами чотирьох точок робочої зони напірної характеристики насоса. Для підвищення адекватності моделі нами рекомендовано використати метод найменших квадратів з метою опрацювання напірних характеристик нафтових насосів і визначення числових значень математичної моделі (8).

При зменшенні обертової частоти вала насоса його напірна характеристика буде опускатись, що спричинить зміну коефіцієнтів відповідної математичної моделі. Точка напірної характеристики з подачею Q згідно із формулою (5) трансформується у точку з подачею $Q' = Q\gamma$. Тому можна записати таке рівняння напірної характеристики за довільного значення обертової частоти

$$H' = a' + b'Q' + c'(Q')^2 + d'(Q')^3, \quad (9)$$

де a', b', c', d' — коефіцієнти математичної моделі напірної характеристики насоса за довільного значення відносної обертової частоти γ.

Формула (6) з урахуванням виразів (8) і (9) набуває вигляду

$$\gamma^2\left(a + bQ + cQ^2 + dQ^3\right) = a' + b'Q\gamma + c'Q^2\gamma^2 + d'Q^3\gamma^3. \quad (10)$$

Аналізуючи рівняння (10), одержуємо розрахункові формули для визначення коефіцієнтів математичної моделі напірної характеристики насоса за довільного значення відносної обертової частоти γ

$$a' = a\gamma^2, \quad (11)$$

$$b' = b\gamma, \quad (12)$$

$$c' = c, \quad (13)$$

$$d' = d\gamma^{-1}. \quad (14)$$

Для математичного моделювання залежності ККД насоса від його подачі використаємо такий вираз

$$\eta = c_1Q + c_2Q^2 + c_3Q^3, \quad (15)$$

де c_1, c_2, c_3 — коефіцієнти математичної моделі кривої ККД насоса за номінального значення обертової частоти вала насоса.

Коефіцієнти математичної моделі кривої ККД насоса за номінального значення обертової частоти можна визначити за координатами трьох точок відповідної графічної характеристики насоса. Для підвищення адекватності моделі нами також рекомендовано використати метод найменших квадратів з метою опрацювання кривих ККД нафтових насосів і визначення числових значень математичної моделі (15).

При зменшенні обертової частоти вала насоса відбувається зсув кривої ККД вліво в область менших подач. Із рівнянь подібності (5)–(7) випливає, що значення ККД насоса за довільної подачі Q і відносної обертової частоти γ буде відповідати значенню ККД за подачі $Q_ф = Q/\gamma$ і номінальної обертової частоті $\gamma = 1$. У результаті одержуємо таку аналітичну залежність для ККД насоса за робочої подачі Q та відносної обертової частоти вала γ

$$\eta' = c_1'Q + c_2'Q^2 + c_3'Q^3, \quad (16)$$

де c_1', c_2', c_3' — коефіцієнти математичної моделі кривої ККД насоса за довільного значення обертової частоти вала насоса

$$c_1' = c_1\gamma^{-1}, \quad (17)$$

$$c_2' = c_2\gamma^{-2}, \quad (18)$$

$$c_3' = c_3\gamma^{-3}. \quad (19)$$

Окрім того, при зменшенні обертової частоти вала спостерігається деяке зниження ККД насоса внаслідок зменшення числа Рейнольда і зростання впливу механічних втрат енергії у підшипниках. Останнє можна врахувати, використавши формулу фірми Sulzel (формулу Зульцера) [5]

$$\eta'' = \frac{\eta'}{\eta' + (1 - \eta')\gamma^{-0,17}}. \quad (20)$$

При експлуатації нафтових насосів з регульованим електроприводом практичне значення має вирішення питання знаходження для будь-якої обертової частоти робочої зони подач з достатньо високими значеннями ККД.

Для визначення величини подачі $Q_{н_п}$, яка відповідає максимальному значенню ККД для будь-якої обертової частоти необхідно розв'язати таке рівняння

$$\frac{\partial \eta''}{\partial Q} = 0. \quad (21)$$

Після математичних перетворень формула (21) з урахуванням (20) набуває вигляду

$$\frac{\partial \eta''}{\partial Q} = \frac{d\eta'}{dQ} \cdot \frac{\gamma^{-0,17}}{\left[\eta' + (1-\eta')\gamma^{-0,17}\right]^2} = 0. \qquad (22)$$

Після диференціювання та математичних перетворень одержуємо такий вираз для подачі $Q_{н_н}$, яка відповідає максимальному значенню ККД для будь-якої відносної обертової частоти

$$Q_{н_н} = -\frac{\gamma}{3c_3}\left(c_2 + \sqrt{c_2^2 - 3c_1c_3}\right). \qquad (23)$$

Потужність на валу насоса за робочої подачі Q та відносної обертової частоти γ може бути визначена за формулою

$$N = \frac{\rho g Q H'}{\eta''} = \frac{\rho g Q(a\gamma^2 + b\gamma Q + cQ^2 + d\gamma^{-1}Q^3)}{\eta''}. \qquad (24)$$

З використанням запропонованих вище математичних моделей нами розроблено обчислювальний алгоритм і програмне забезпечення, що дають можливість за наявної графічної характеристики насоса, знятої для номінального значення обертової частоти вала насоса, одержати графічні характеристики та їх аналітичні вирази для довільного значення обертової частоти. При опрацюванні графічних характеристик насосів за номінальної обертової частоти використовується метод найменших квадратів, що забезпечує адекватність розроблених математичних моделей.

Як об'єкт апробації розробленого методу вибрано магістральний насос марки НМ 3600–230 з базовим ротором, який знайшов широке застосування на вітчизняних нафтопроводах. Опрацьовані характеристики зазначеного насоса, що відповідають ГОСТ 12124–87 і номінальній обертовій частоті $n_н = 3000$ об/хв. Розрахункова густина транспортованої нафти при моделюванні характеристик насоса приймалась рівною $\rho = 860$ кг/м³.

Досліджено вплив обертової частоти на напір, ККД та потужність на валу насоса у діапазоні подач від 500 до 3500 м³/год. Одержані графічні залежності наведено на рисунках 1, 2 і 3.

На рисунках 4–6 наведено результати перерахунку характеристик насоса НМ 3600–230 з базовим ротором для кількох значень обертової частоти вала.

Рисунок 7 ілюструє залежність питомих витрат електроенергії на перекачування нафти від годинної витрати для чотирьох значень обертової частоти вала насоса у разі його роботи на трубопровід довжиною 100 км.

Із рисунка 7 випливає, що за номінальної обертової частоти вала насоса $n_н = 3000$ об/хв у разі перекачування нафтопроводом 2200 м³/год нафти питомі витрати електроенергії становлять 10 (кВт·год)/(тис.т·км), у той же час зменшення обертової частоти вала насоса до значення $n = 2000$ об/хв дасть змогу скоротити питомі витрати електроенергії на транспортування такого ж об'єму нафти до 4 (кВт·год)/(тис.т·км), тобто в 2,5 рази. Такий висновок справедливий тільки для модельного нафтопроводу, геометричні параметри якого такі, що один працюючий насос спроможний забезпечити витрату нафти 2200 м³/год як за номінальної, так за зменшеної до 2000 об/хв обертової частоти.

Для реальних магістральних нафтопроводів, що мають кілька нафтоперекачувальних станцій які оснащені насосними агрегатами різних типів та з різними роторами, питання енергоефективності використання регульованого енергоприводу вимагає додаткових досліджень. Вони можуть бути реалізовані з використанням запропонованих нами математичних моделей характеристик нафтових насосів за зміни обертової частоти.

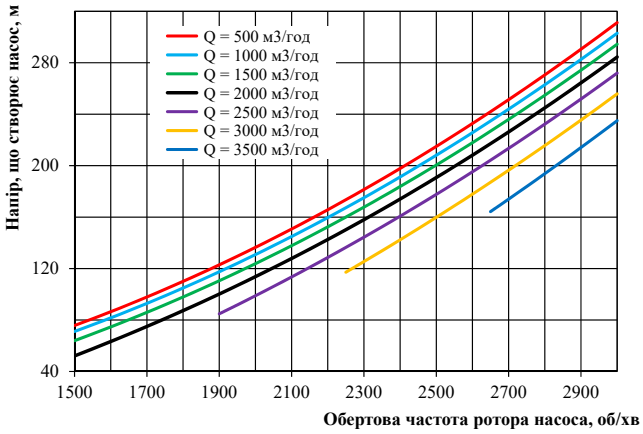

Рисунок 1. Залежність напору насоса НМ 3600–230 від обертової частоти за різних значень його подачі

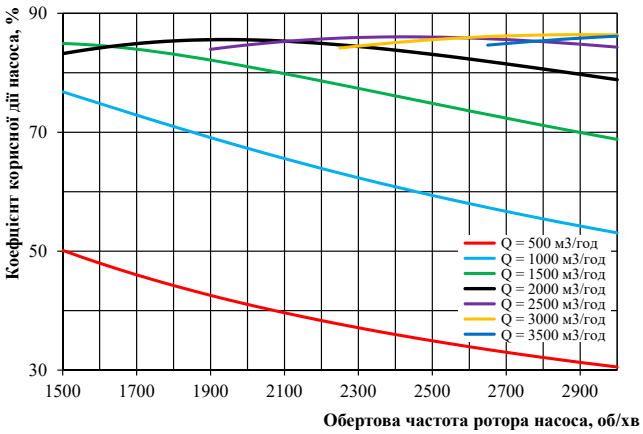

Рисунок 2. Залежність ККД насоса НМ 3600–230 від обертової частоти за різних значень його подачі

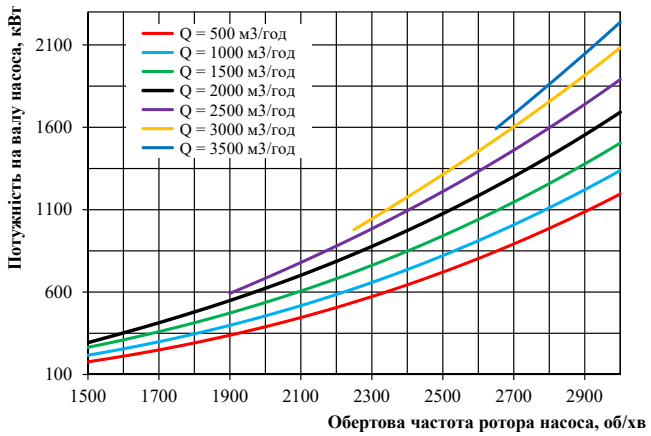

Рисунок 3. Залежність потужності на валу насоса НМ 3600–230 від обертової частоти за різних значень його подачі

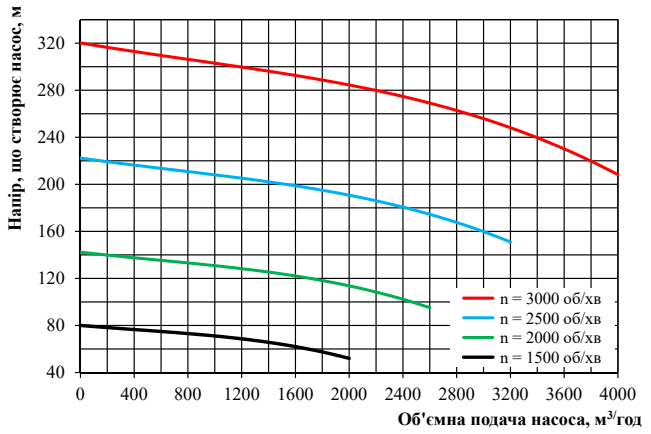

Рисунок 4. Напірна характеристика насоса НМ 3600–230 за різних значень обертової частоти

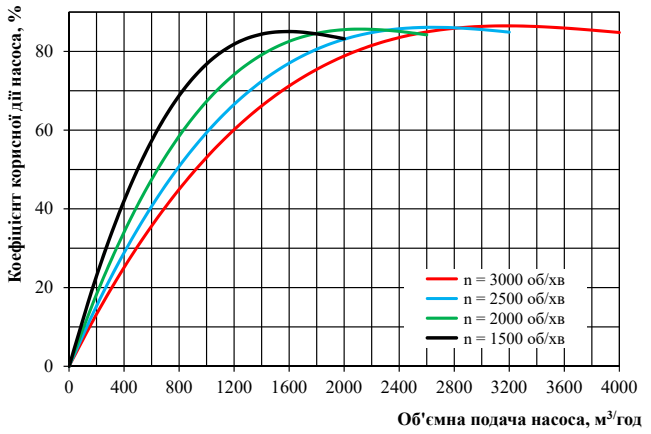

Рисунок 5. Залежність ККД насоса НМ 3600–230 від його подачі за різних значень обертової частоти

Виконані дослідження дали змогу зробити такі висновки:

1. Базою для моделювання характеристик нафтових насосів з регульованим електроприводом є їх

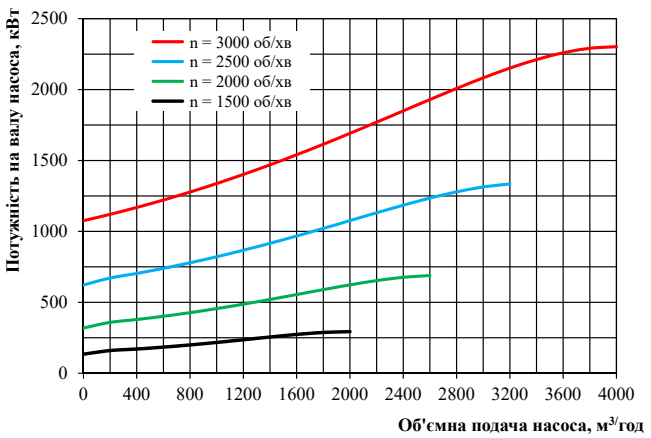

Рисунок 6. Залежність потужності на валу насоса НМ 3600–230 від його подачі за різних значень обертової частоти

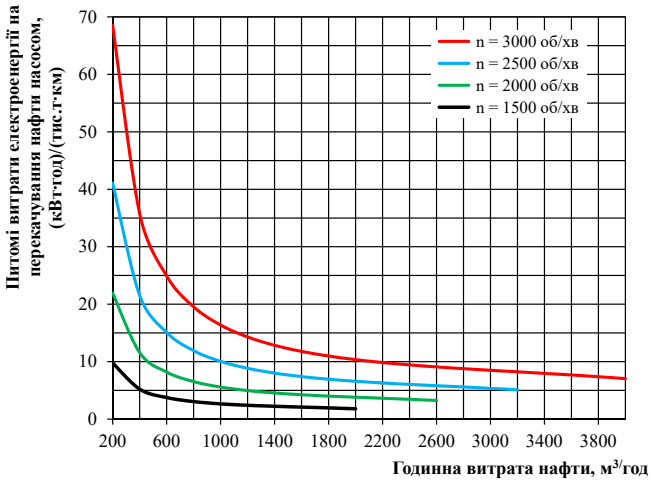

Рисунок 7. Залежність питомих витрат електроенергії від витрати нафти в нафтопроводі, на який працює насос НМ 3600–230, за різних значень обертової частоти

графічні характеристики, одержані для номінального значення обертової частоти.

2. Опрацювання базових графічних характеристик нафтових насосів і побудову математичних моделей доцільно виконувати з використанням методу найменших квадратів.

3. Часткові формули подібності відцентрових машин дають змогу одержати адекватні математичні моделі характеристик нафтових насосів для довільного значення обертової частоти.

4. Енергоефективність застосування насосних агрегатів з регульованим енергоприводом на конкретних магістральних нафтопроводах може бути встановлена лише шляхом дослідження режимних та енергетичних параметрів спільної роботи НПС і лінійної частини.

5. Обов'язковою умовою таких досліджень є наявність адекватних математичних моделей характеристик нафтових насосів за різної обертової частоти, які розроблені у даній роботі.

Література

1. Середюк М. Д. Трубопровідний транспорт нафти і нафтопродуктів / М. Д. Середюк, Й. В. Якимів, В. П. Лісафін: [підручник для ВНЗ]. — Івано-Франківськ. 2002. — 517 с.

2. Колпаков Л. Г. Центробежные насосы магитральных нефтепроводов / Л. Г. Колпаков. — М.: Недра. 1985. — 183 с.

3. Лурье М. В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа / М. В. Лурье. — М.: Нефть и газ, 2003. — 335 с.

4. Колпаков Л. Г. Эксплуатация магистральных центробежных насосов / Л. Г. Колпаков. — Уфа: Уфимский нефтяной институт. 1988. — 116 с.

5. РД 39-014-90. Методика расчета оптимального режима отдельных насосных станций и в целом участка магистрального нефтепровода и нефтепродуктопровода с законченным технологическом циклом при применении регулируемых насосных агрегатов. Уфа: ВНИИСПТнефть. 1990. — 64 с.