

КОНСТРУЮВАННЯ НАСОСНИХ УСТАНОВОК З ВИКОРИСТАННЯМ ЕЖЕКЦІЙНИХ НАСОСІВ.

1. БУДОВА І ПРИНЦИП ДІЇ

CONSTRUCTING OF PUMPINGS OPTIONS IS WITH THE USE OF EJECTOR PUMPS.

1. STRUCTURE AND PRINCIPLE OF ACTION

У пропонованих статтях розглядаються принципи і методики конструювання і проектування гідроструминних насосів різного типу і призначення.

Ключові слова: насос, конструювання, ежекція, рідини, струмінь.

Principles and methods of constructing and planning of ejector pumps of different type and setting are examined in the offered articles.

Key word: pump, constructing, ejector, liquidity, undulated.

Гідроструминний насосом це динамічний насос тертя, в якому перекачуване (пасивне) середовище (рідина, газ чи суміш рідини з газом чи твердими частинками) переміщується зовнішнім потоком (струменем) робочої (активної) рідини. Енергія від одного потоку рідини до другого передається силами, діючими на поверхні робочого струменя.

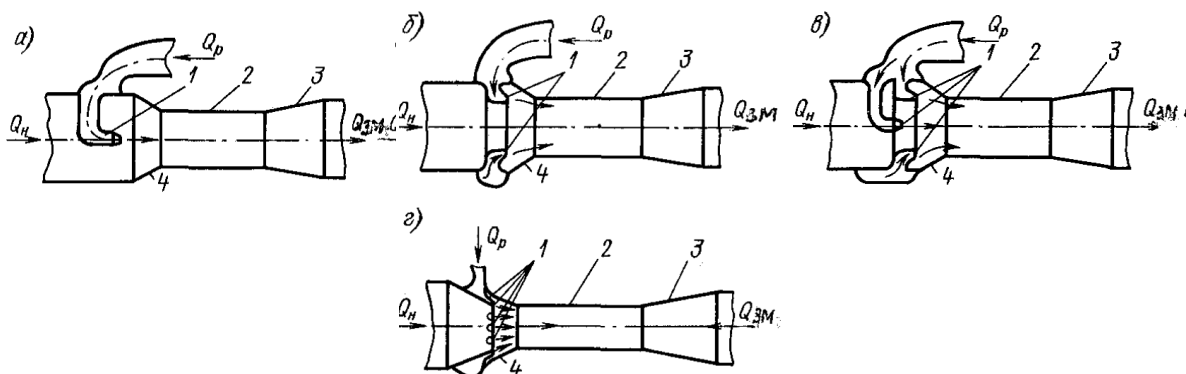


Рис.1. Схеми нерегульованих гідроструминних насосів: а – з центральним соплом; б – з кільцевим соплом; в – з центральним і кільцевим соплами; г – багатосопловий; 1 – сопло; 2 – камера змішування; 3 – дифузор; 4 – конфузор

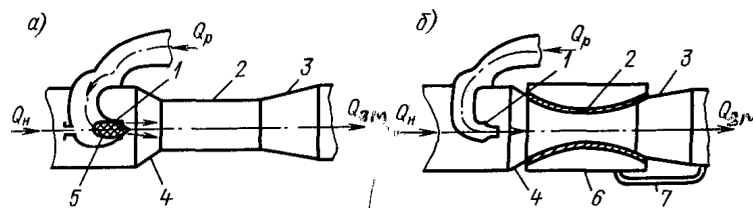


Рис. 2. Схема насосів з регульованими геометричними параметрами: а – з регульованою площею вихідного перерізу сопла; б – з регульованою площею поперечного перерізу камери змішування; 1 – сопло; 2 – камера змішування; 3 – дифузор; 4 – конфузор; 5 – голка для регулювання площі вихідного перерізу сопла; 6 – додаткова порожнина для зміни площі поперечного перерізу камери змішування; 7 – трубопровід для подачі рідини до камери 6

Існує велике розмаїття схем струминних насосів. На рис.1 наведено схеми найбільш відомих і розповсюджених конструкцій нерегульованих гідроструминних насосів, а на рис.2 – гідроструминних насосів з регульованими геометричними параметрами, при цьому регулювання відбувається за рахунок зміни площі вихідного перерізу робочого (активного) сопла чи площі поперечного перерізу камери змішування (горловини). Не дивлячись на розмаїття конструкцій у більшості струминних насосів можна виділити наступні елементи: активне (робоче) сопло, камеру змішування (горловину), дифузор, вхідну ділянку горловини для пропускання пасивного потоку, виконану зазвичай у вигляді конфузору. Робоче кінчне

сопло (насадок) переважно ставиться по осі (по центру) з камерою змішування (рис.1,*a*), а також у вигляді кільця, розташованого по периферії камери змішування (рис.1,*б*) чи комбіновано (рис.1,*в*). У деяких випадках використовують багато сопел гідроструминні апарати (рис.1,*г*). Площина зрізу активного сопла (сопел) повинна знаходитися у вхідному перерізі камери змішування, чи бути висунутою із нього назустріч течії на певну відстань (зазвичай не більше, ніж на 1...3 калібри сопла).

Процес змішування активного і пасивного середовища у гідроструминних насосах з центральним струменем можна умовно розділити на дві ділянки. Течія рідини на початковій ділянці відбувається подібно розповсюдженню затопленого турбулентного струменя. На границях затопленого струменя утворюється розширена зона змішування –турбулентний

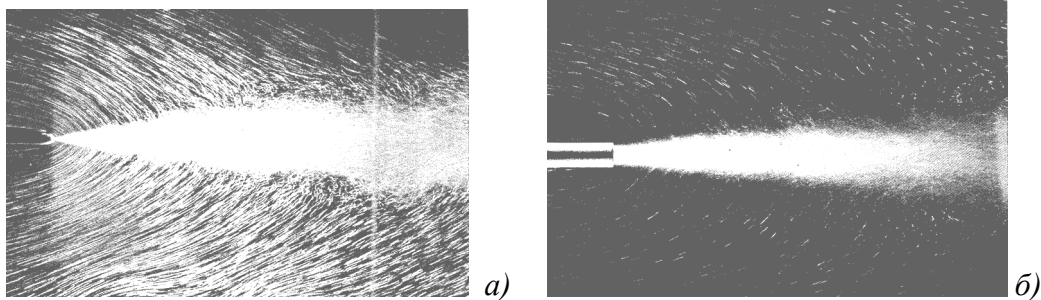


Рис.3. Захоплення рідини: а – плоским турбулентним струменем; б – осесиметричним турбулентним струменем

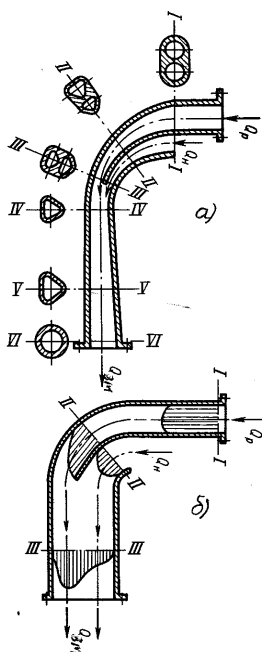
пограничний шар (рис.3). У відповідності з теорією пограничного шару лінії течії, відмічені повітряними бульбашками у воді поза струменем, представляють собою параболоїди обертання (рис.1.3,*б*) чи плоскі параболоїди (рис.3,*a*). Завдяки втягуванню частинок рідини у пограничний шар розтікання струменя у камері змішування відбувається не у товщі нерухокої рідини, а у супутньому підсмоктуванному потоці. При цьому кут розширення струменя буде зменшуватися із збільшенням швидкості підсмоктуваного (супутнього) потоку. Це наглядно видно з рис.3, де на рис.3,*a* швидкість струменя 1 м/с, а на рис.3,*б* – 2 м/с.

Окрім турбулентного пограничного шару має місце зменшення, при віддаленні від сопла, ядро швидкостей рідини, яка витікає із сопла. Завдяки тому, що у пограничний шар безперервно втягуються частинки із перекачуваного середовища, то загальні витрати рідини у струмені при віддаленні його від зрізу сопла збільшуються. У певному перерізі ріст пограничного шару припиняється за рахунок впливу стінок камери змішування. Починаючи

з цього перерізу припиняється надходження нових мас пасивного середовища до струменя активної рідини. Але у цьому перерізі швидкість за радіусом розподіляється ще нерівномірно. Цим викликана необхідність додаткової ділянки стабілізації в камері змішування довжиною 6...10 її діаметрів, де відбувається подальше вирівнювання параметрів потоку.

Після вирівнювання полів тиску і швидкостей змішаний потік, який набув великої швидкості, спрямовується в дифузор, де відбувається перетворення кінетичної енергії швидкості потоку в потенціальну енергію тиску.

Рис.4. Схеми асиметричних струминних насосів: а – авторське свідоцтво 193930 (СРСР); б – патент 3650637 (США): I-I...VI-VI – поперечні перерізи



Підсмоктування пасивного потоку струменем робочої рідини відбувається внаслідок взаємодії сил турбулентного тертя, викликаного появою вихорів у робочому (активному) і підсмоктуваному (пасивному) середовищах у вхідному перерізі камери змішування, де установлюється тиск p , нижчий за тиск пасивного середовища. Додавання вихорового і поступального руху рідини створює, згідно теорії Кута-Жуковського, підйомну силу,

поперечну до напрямку поступального руху. При цьому відбувається перемішування активного і пасивного потоків.

Різними авторами запропоновано ряд нових, відмінних від попередніх конструкцій струминних апаратів. Так на рис.4 наведено конструкції струминних насосів, виконаних у вигляді коліна (повороту) на трубопроводі. При цьому активне середовище, зазвичай, подається по зовнішньому коліну, а пасивна відсмоктується з внутрішнього.

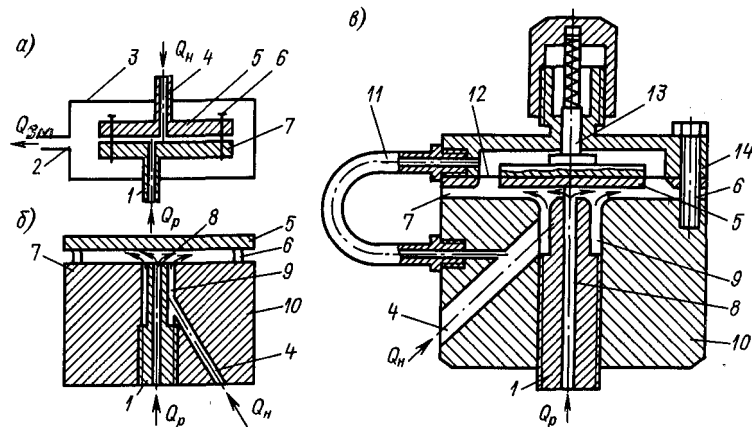


Рис.5. Схема щільних струминних насосів за а.с. СРСР: а – 210663; б –338687; в – 901654

На рис.5 наводиться три конструкції щільних струминних апаратів. Робоча рідина рис.5,а подається по трубці 1 і відбивається від пластини 5, до якої в зоні максимального зменшення гідростатичного тиску приєднано всмоктувальний патрубок 4; суміш середовищ виливається через щілину між пластинами 5 і 7 і далі через кожух 3 і патрубок 2 відводиться до споживача. Пластини 5 і 7 утримуються на заданій відстані за допомогою кріпильних болтів 6.

Струминний апарат поданий на рис.5,б, є удосконалений апарат, приведений на рис.5,а. Робочий струмінь подається трубкою 1 до сопла 8 і, відбиваючись від пластини 5, утворює симетричну кругову зону відбиття. Всмоктувальна порожнина у вигляді проточки 9 використовує всю зону зменшеного тиску, утворену струменем, що витікає із сопла 8. Пасивне середовище відсмоктується патрубком 4, просвердленому в корпусі 10.

Щільний струминний апарат, приведений на рис.5,в, аналогічний за конструкцією апарату, поданому на рис.5,б, але є регульованим, тому що пластина 5, від якої відбивається струмінь, спирається на еластичну діафрагму 12 закріплену між фланцями 14. Пластина 5 спирається також на шток 13 з пружиною. Порожнина над діафрагмою 12 сполучається трубкою 11 із всмоктувальним отвором 4, просвердленому в корпусі насоса 10. При зміні тиску всмоктування пластина 5 може зміщуватися під дією пружини і діафрагми 12.

Варто зауважити, що струминні апарати, зображені на рис.4 і 5 виконані на стадії рішень по винаходах і результати досліджень їх характеристик поки що невідомі. Виходячи з цього у подальшому нами розглядаються традиційні струминні насоси, конструкції яких зображені на рис.1 і 2 (з центральним і кільцевим соплами).

Є і інші пропозиції стосовно конструкцій струминних апаратів. Так на рис.6 зображені спеціальні конструкції струминних насосів для ежекції тонкого шару плаваючої рідини з поверхні іншої, більш важкої рідини, а також для придонної ежекції палива, наприклад із баків літальних апаратів.

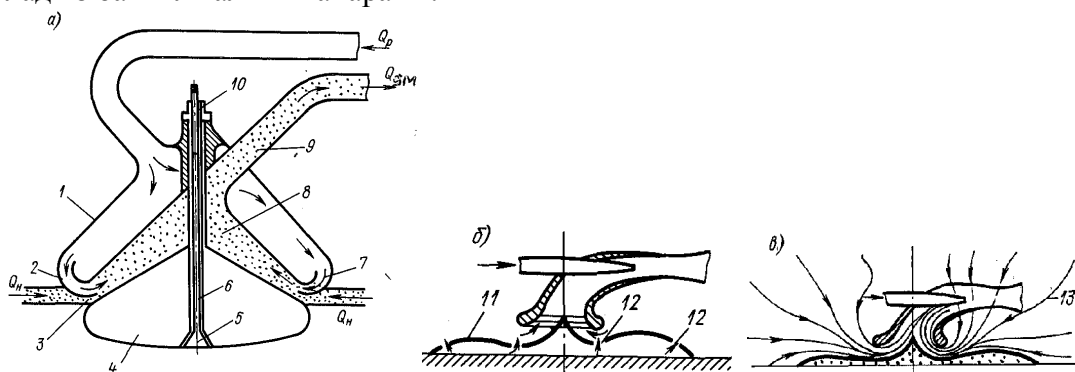


Рис.6. Схеми струминних насосів для ежекції рідин: а – для ежекції легкої рідини з поверхні більш важкої рідини; б – для придонної ежекції рідини; в – розподіл ліній течії біля всмоктувального отвору

У першому з цих апаратів (рис.6,*а*) активне середовище 7 подається до ресиверу 1 і під час проходження через кругове щілинне сопло 2, ежектує з поверхні шар плаваючої рідини 3 і подає суміш робочого і пасивного середовища в дифузор 8 і далі на викид по трубці 9. Розмір кільцевої щілини для пасивного потоку 3 можна регулювати поплавком 4, який переміщується за допомогою штока 6, з потовщенням 5 у нижній частині, а у верхній – різьбою 10.

Струминний апарат, зображений на рис.6,*б*, відрізняється від звичайних струминних насосів тільки конструкцією всмоктувальної порожнини. На підставі попереднього виконаного аналізу ліній течії 13 рідини біля всмоктувального отвору гідроструминного насоса (рис.6,*в*) можна побудувати спеціально спрофільований екран 11 з отворами 12 (рис.6,*б*), який забезпечить максимальне відкачування рідини з дна бака

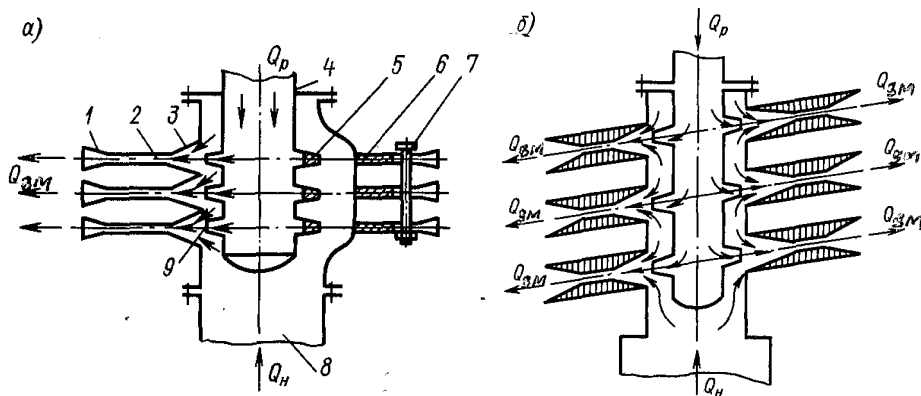


Рис.7. Схема зблокованих струминних щілинних насосів за а.с. СРСР: а – 180290; б – 800434

На рис.7 зображені зблоковані струминні насоси, які дозволяють збільшити подачу відкачуваного середовища. Насос, наведений на рис.7,*а*, зібраний із профільованих тарілок, які утворюють у поперечному перерізі звичайні струминні насоси, що мають дифузор 1, камеру змішування 2, конфузор 3. Робочі сопла 9 зібрані із штампованих чи відлитих деталей, закріплені на трубці 4, по якій підводиться активна рідина. Для організації потоків робочого (активного) і підсмоктуваного (пасивного) середовищ по трубках 4 і 8 частина робочих сопел 5 і камер змішування 6 заглушені. Підсмоктування середовища підводиться знизу трубою 8. Уся конструкція стягнута болтами 7.

Струминний насос, зображений на рис.1.6,*б*, аналогічний за конструкцією попередньому, але для забезпечення технологічності зборки і виготовлення основні його деталі виконані шляхом намотки смуг по спіралі з наступним зварюванням.

Необхідно зауважити, що конструктивне удосконалення гідроструминних насосів в певній мірі йде за рахунок створення регульованих апаратів. Враховуючи, що відношення площі поперечного перерізу камери змішування (горловини) S_2 до площі вихідного перерізу сопла S_c є одним із основних геометричних показників подібності, який визначає тип гідроструминного насоса і вид його гідравлічних характеристик, подібно тому, як коефіцієнт швидкохідності визначає тип лопаткового (відцентрового) насоса, були прийняті багато чисельні спроби сконструювати регульовані струминні насоси. Один із напрямків таких розробок охоплює способи регулювання площі вихідного перерізу сопла. Конструктивні рішення тут розділилися. Ряд дослідників використовують принцип безперервного регулювання: за рахунок введення голки в сопло (див., наприклад, рис.2,*а*), шляхом установки на виході із сопла еластичної порожнистої втулки, яка обтискується під час обертання сопла, та ін. Другі спеціалісти пішли шляхом дискретного регулювання і запропонували ряд конструкцій, які дозволяють швидко міняти сопло одного діаметра на сопло іншого діаметра. Але варто пам'ятати, що коли S_2 / S_c є основним числом геометричної подібності гідроструминних насосів, то всі інші лінійні розміри апарата повинні бути функцією від цього відношення. Таким чином, зміна тільки одного відношення S_2 / S_c не забезпечує оптимальний режим роботи апарата при заміні сопла.

Аналогічне положення виникає і при спробах змінити тільки площу поперечного перерізу камери змішування (див. рис.2,*б*). Виходячи з цього, приймаються спроби зробити

апарати, в яких можна змінювати всю проточну частину. Але такі конструкції, без сумніву, будуть програвати у масі габаритах у порівнянні із звичайними струминними апаратами.

Використання для розрахунку струминних насосів геометричної подібності є обґрунтованим тільки у тому випадку, коли опір окремих конструктивних елементів струминного насоса не залежить від їх абсолютних розмірів, напорів (тиску), витрат, в'язкості, кавітації та ін.

В якості числа динамічної подібності можна використати число Рейнольдса, яке записується у такому вигляді:

$$Re = \frac{d_c v_p}{\nu} = \frac{d_c \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}}}{\nu}, \quad (1)$$

де d_c – діаметр вихідного перерізу сопла; $v_p = \sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}}$ – швидкість витікання робочої рідини із сопла при коефіцієнті швидкості середовища $\varphi_c = 1$; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, м²/с.

Вважається, що при $Re \geq 10^6$ у гідроструминних насосах додержується автотельний режим і вводити поправки на в'язкість під час розрахунків не потрібно.

На рис.8 приведена номограма для визначення числа Рейнольдса в гідроструминних насосах з центральним соплом для різних рідин. На цій номограмі значення $Re = 10^6$ відмічене як критичне ($Re_{кр}$).

Можна записати і інші вирази для числа Рейнольдса, якщо за характерну швидкість прийняти середнє її значення в кінці камери змішування v_{2z} , а за характерний лінійний розмір – діаметр камери змішування (горловини) d_z :

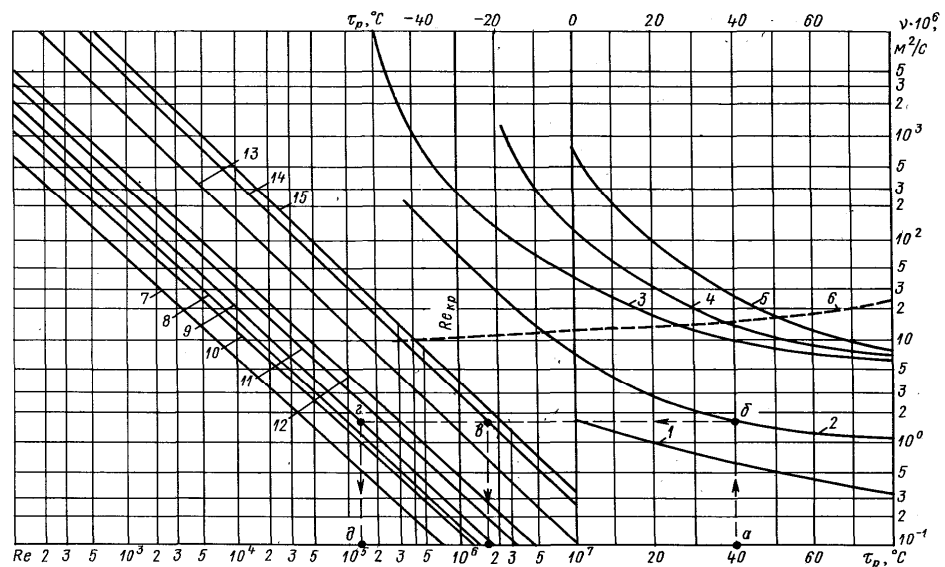
$$Re^* = \frac{d_z v_{2z}}{\nu}. \quad (2)$$

У цьому випадку Re^* залежить від режиму роботи гідроструминного насоса тобто від коефіцієнта підсмоктування. Відношення швидкості рідини у горловині v_{2z} до швидкості на виході з сопла можна записати у вигляді

$$\frac{v_{2z}}{v_p} = \frac{Q_c}{S_z} \cdot \frac{Q_p}{S_c} = \frac{Q_c}{Q_p} \frac{S_c}{S_z}, \quad (3)$$

де Q_c – сумарні витрати рідини, яка виходить із гідро струминного насоса, $Q_c = Q_p + Q_H$; Q_p – витрати робочої рідини; Q_H – витрати рідини, яка відсмоктується; S_z, S_c – відповідно площа поперечного перерізу горловини і сопла насоса.

Рис.8. Номограма для визначення числа Рейнольдса в гідроструминних насосах з центральним соплом у залежності від кінематичної в'язкості рідини ν , її температури τ_p , діаметра робочого сопла d_c , наявного напору робочого тиску Δp_p : 1...6 –



криві $\nu = f(\tau_p)$ для різних рідин і повітря (1 – вода; 2 – гас; 3 – рідина АМГ-10; 4 – масло АУ; 5 – масло веретенне; 6 – повітря); 7...15 – криві $Re = f(\nu, d_c, \Delta p_p)$:

Номер кривої.....7 8 9 10 11 12 13 14 15
 d_c , мм..... 5 5 5 10 10 10 100 100 100

У сучасних конструкціях гідроструминних насосів використовується циліндрична камера змішування. У цьому разі перетворюючи (3), отримаємо:

$$\frac{v_{2z}}{v_p} = \frac{Q_p + Q_n}{Q_p} \frac{S_c}{S_z} = (1 + u) \frac{d_c^2}{d_z^2}. \quad (4)$$

Звідки

$$v_{2z} = v_p (1 + u) \frac{d_c^2}{d_z^2}, \quad (5)$$

де $u = Q_n / Q_p$ – коефіцієнт підсмоктування.

Підставляючи вираз (5) у (2), отримаємо

$$\text{Re}^* = \frac{d_z v_p}{\nu} (1 + u) \frac{d_c^2}{d_z^2} = \frac{d_c v_p}{\nu} \frac{d_c}{d_z} (1 + u), \quad (6)$$

чи в іншій формі запису

$$\text{Re}^* = \text{Re} (1 + u) \frac{d_c}{d_z}. \quad (7)$$

Слід відмітити, що дотримання Re^* при стендових чи промислових випробуваннях гідроструминних насосів пов'язане з великими труднощами. Тому у першому кінцевих розрахунків визначити Re^* за формулою (7).

Аналізуючи номограму (рис.8), бачимо, що при перекачуванні гідроструминним насосом води величина Re при зміні температури в межах $0 \dots 80^\circ\text{C}$ змінюється від $4 \cdot 10^4$ до 10^7 , у той час як для більш в'язких рідин (гас, масла та ін.) величина Re зменшується до $10^2 \dots 10^3$. Це може суттєво погіршити характеристики струминних насосів, а під час розрахунків необхідно вводити поправки на в'язкість рідини.

Аналіз виразу (7) показує, що значення Re^* у камері змішування близьке до значення Re , визначеному за формулою (1.1). Це пояснюється тим, що при малих значеннях відношення d_z/d_c коефіцієнт підсмоктування u зазвичай не перевищує одиниці; при більших значеннях цього відношення ($d_z/d_c = 5 \dots 10$) коефіцієнт підсмоктування може становити $5 \dots 10$. У цьому випадку величина Re^* також близька до значення Re , визначеному за формулою (1.1). Тільки для гідроструминних насосів з більшим значенням d_z/d_c при граничних (великих) значеннях протитиску коли $u \rightarrow 0$, величина Re^* може бути на порядок меншою за $\text{Re}_{кр}$. У тих випадках, коли число Рейнольдса наближається до $\text{Re}_{кр}$ при розрахунках може виникати необхідність введення поправки на в'язкість рідини.