

УДК 62-252:532.542:539.215

Ю.В. Науменко, канд. техн. наук, Рівненський державний технічний університет

ШВИДКІСНІ ТА ДИНАМІЧНІ ПАРАМЕТРИ ПРИВОДУ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ БАРАБАННИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАШИН, ЩО ЧАСТКОВО ЗАПОВНЕНІ ОБРОБЛЮВАНИМ МАТЕРІАЛОМ

В будівництві, гірничій та інших галузях промисловості набув застосування досить широкий клас горизонтальних барабанних машин. Робочим органом таких систем є горизонтальний обертовий циліндр, що частково заповнений легкодеформівним оброблюваним матеріалом. Усталений рух матеріалу в порожнині при низьких швидкостях обертання барабана характеризується інтенсивно циркулюючим нетрубчастим режимом, а при високих - малорухливим квазітрубчастим. На підставі аналізу робочих процесів горизонтальних барабанних машин всі види деформівного оброблюваного матеріалу можуть бути зведені до двох найбільш характерних - в'язкої ньютонівської рідини та сипкого тіла. Висока продуктивність, простота конструкції, надійність та універсальність, завдяки можливості реалізації різноманітних технологічних процесів та обробки різних матеріалів, обумовили широке використання таких машин. У таблиці 1 наведено класифікацію сучасних горизонтальних барабанних машин, які застосовуються в будівництві, за зростанням відношення швидкостей ω/ω_T , де R - радіус порожнини барабана, α - ступінь заповнення порожнини матеріалом, ω - робоча швидкість обертання барабана, ω_T - швидкість стаціонарного обертання, при якій нетрубчаста форма руху матеріалу переходить у трубчасту при розбігу барабана.

Таблиця 1. Горизонтальні барабанні будівельні машини

Тип машини	Технологічний процес	Вид матеріалу	R (м)	α	ω (1/с)	ω/ω_T
Печі	нагрівання	сипкий	0,06 - 4	0,05 - 0,2	0,02 - 0,5	0,01 - 0,04
Текучосередовищні сепаратори	розділення за густиною	сипкий	0,25 - 3	0 - 0,25	0,15 - 0,7	0,05 - 0,12
Сушарки	сушіння	сипкий	0,25 - 2,5	0,04 - 0,3	0,1 - 1	0,04 - 0,15
Змішувачі	змішування	сипкий та рідкий	0,25 - 1,5	0,3 - 0,8	1 - 2,5	0,2 - 0,35
Мийки	промивання та миття	сипкий	0,5 - 2	0,03 - 0,2	0,5 - 2	0,15 - 0,4
Грохоти	класифікація за розміром	сипкий	0,25 - 2	0,15 - 0,5	1 - 3	0,3 - 0,45
Обертові транспортуючі труби	переміщення вздовж осі	сипкий	0,1 - 3	0,05 - 0,4	0,5 - 5	0,2 - 0,5
Гранулятори та грудкоутворювачі	агломерація окатуванням	сипкий	0,5 - 5,5	0,03 - 0,2	0,2 - 3	0,1 - 0,6
Млини	подрібнення ударом, стиранням та роздавлюванням	сипкий	0,25 - 6	0,3 - 0,5	1 - 5	0,5 - 0,8
Обертові теплові труби	збирання та розподілення конденсату	рідкий	0,005 - 0,05	0,03 - 0,5	0,5 - 400	0,01 - 2
Відцентрово-ливарні машини	формування рідкого розплаву	рідкий	0,025 - 1,2	0,08 - 0,96	5 - 200	0,2 - 5
Центрифуги для виробів з бетонних сумішей	формування з осаджуванням та фільтрацією	рідкий	0,075 - 1,75	0,1 - 0,6	5 - 100	1,5 - 8
Розділові центрифуги	осаджування та фільтрація	рідкий	0,1 - 1,25	0 - 1	40 - 600	3 - 15

У теперішній час для розрахунку швидкості обертання барабанів із рідиною використовується "коефіцієнт гравітації", який показує у скільки разів відцентрова сила інерції перевищує силу ваги [1]. Технологічні режими барабанних машин із сипким матеріалом розраховуються за допомогою "критичної" швидкості, що відповідає рівності сили інерції і сили ваги на вільній поверхні трубчастого шару [2]. Однак залежності, що використовуються, не враховують процесів взаємодії деформівного оброблюваного матеріалу з циліндричною порожниною барабана, що обертається, внаслідок значної кількості обмежень і припущень не задовольняють вимогам коректності і універсальності, а розрахунки на їх основі не забезпечують необхідної точності.

Тому набуває актуальності розробка єдиного підходу до розв'язання задачі визначення кінематичних та динамічних параметрів приводу всього класу різноманітних горизонтальних барабанних машин на підставі відшукування спільних критеріїв подібності руху системи та узагальнення, одержаних дослідним шляхом.

Експериментальний аналіз режимів руху рідини при малому ступені заповнення порожнини барабана наведено в [3, 4]. Експериментальне та аналітичне дослідження положення вільної поверхні при нетрубчастій формі руху рідини для високої в'язкості представлено в [5] та для великого ступеня заповнення в [6]. Задачу визначення швидкісних режимів руху трубчастого шару ідеальної рідини аналітично було розглянуто в [7]. Чисельний розрахунок параметрів руху трубчастого шару в'язкої рідини з малою, порівняно з радіусом порожнини, товщиною наведено в [8]. В [9] описано характерні режими руху рідини в барабані та зроблено спробу узагальнення результатів у вигляді двопараметричної діаграми.

В [2] наведено методи визначення параметрів руху сипкого матеріалу в горизонтальному обертовому барабані, які ґрунтуються на спрощеній механічній моделі. Однак її теоретичні передумови мають умоглядний характер і входять у протиріччя з експериментальними даними.

Експериментальні результати свідчать, що нетрубчаста течія сипкого матеріалу в обертовому барабані у вигляді гравітаційних потоків відноситься до режиму швидких рухів [10,11], а поведінка його при цьому схожа на поведінку в'язкої рідини в аналогічних умовах. Тому для описування руху матеріалу можуть бути прийняті три критерії подібності усталеної течії рідини - числа Рейнольдса і Фруда на радіальній поверхні порожнини, а також ступінь її заповнення матеріалом:

$$\begin{aligned} Re &= \frac{\omega \cdot R^2}{\nu} \\ Fr &= \frac{\omega^2 R}{g} \quad , \\ \alpha &= \frac{V}{\pi R^2 L} \end{aligned} \quad (1)$$

де ν - кінематичний коефіцієнт в'язкості, g - прискорення сили ваги, V - об'єм матеріалу в порожнині, L - довжина порожнини.

Перший критерій характеризує сили тертя, другий - сили інерції, третій - геометричні параметри руху.

При нетрубчастому русі утворюються характерні зони течії рідини (рис.1,а) та сипкого тіла (рис.1,б), комбінації яких визначають режими руху деформівного матеріалу. Для сипкого матеріалу можна виділити такі характерні режими, пов'язані з реалізацією технологічних процесів [2], за зростанням швидкості обертання: режим без підкидання - містить тільки зони твердотільну та осипання, режим з частковим підкиданням - виникають всі три зони, режим з повним підкиданням - осипання відсутнє, режим неповного центрифугування - на поверхні порожнини виникає твердотільний шар з частини матеріалу з підкиданням іншої частини, трубчастий режим – весь матеріал утворює рівномірний твердотільний пристінний шар.

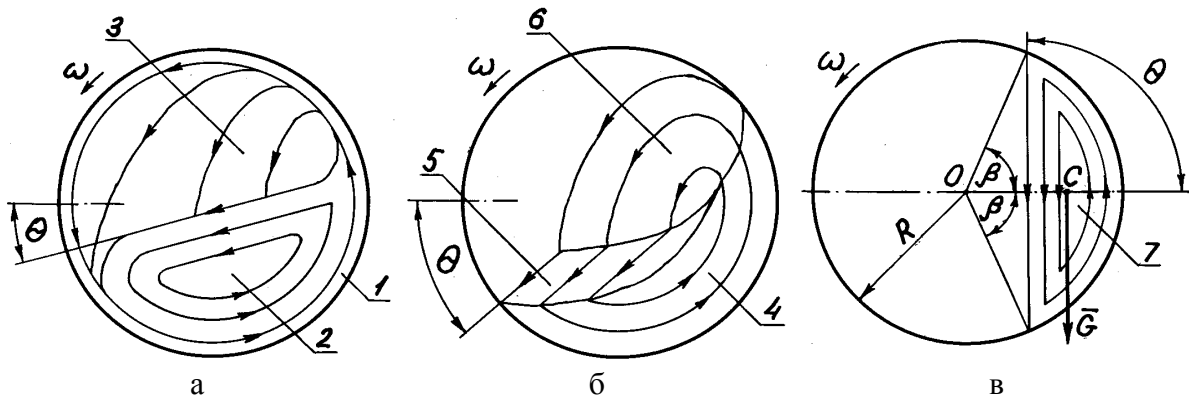


Рис. 1. Схема циркуляційного режиму руху деформівного матеріалу в горизонтальному барабані:

а – характерні зони течії рідини (1 – пристінний шар, 2 – зона циркуляції, 3 – зона відокремлення з падінням, θ - кут нахилу поверхні до горизонталі), б – зони руху сипкого матеріалу (4 – твердотільна зона, 5 – зона осипання, 6 – зона підкидання з падінням, θ - кут природного відкосу в русі), в – утворення умовного максимального моменту опору обертанню барабана (7 – ідеальний сегмент)

Для визначення режимів руху деформівного матеріалу в горизонтальному обертовому циліндрі було виконано серію експериментів [13, 14]. Дослідження проводились на установці, що мала дев'ять змінних барабанів із прозорою торцевою стінкою.

Вимірювались кутові швидкості стаціонарного обертання барабана при утворенні та руйнуванні трубчастого шару в усталеному русі відповідно при плавному розбігу та гальмуванні. Крім того, для сипкого матеріалу визначались швидкості обертання, що відповідають переходам характерних режимів руху. Одержано біля 500 точок для рідкого та більше 700 для сипкого матеріалу. Експериментальні дані для рідини при $\alpha = 0,1$ були близькими до результатів [5, 8].

На рис. 2 показано універсальні діаграми меж переходу трубчастого та нетрубчастого режимів руху рідини в барабані, які побудовано на підставі одержаних експериментальних даних у логарифмічних осях Re та Fr для різних значень α .

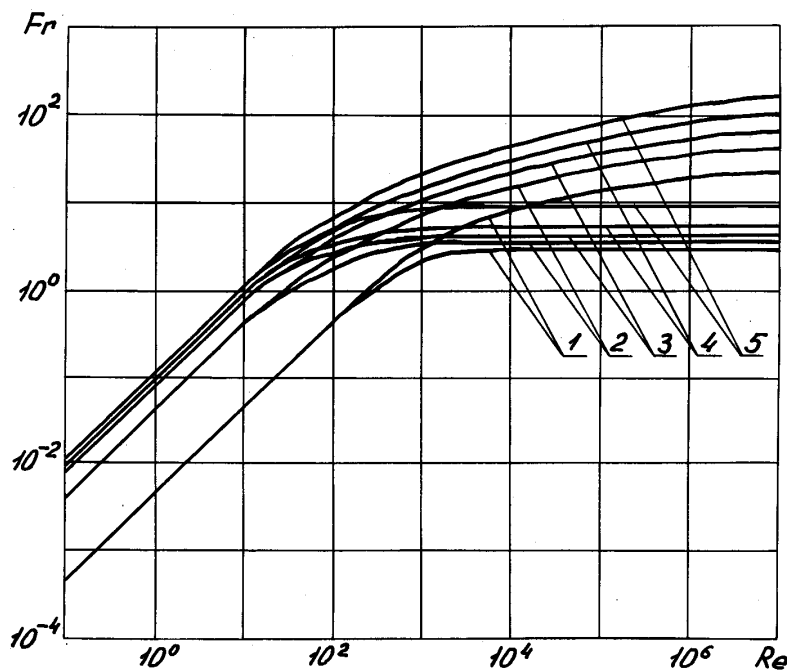


Рис. 2. Універсальні діаграми меж переходу режимів руху рідин в барабані:
1 - $\alpha=0,1$; 2 - $\alpha=0,3$; 3 - $\alpha=0,5$; 4 - $\alpha=0,7$; 5 - $\alpha=0,9$

Зона вище межі відповідає трубчастій формі руху. При великих значеннях Re виникає явище режимного гістерезису – перевищення швидкості обертання при утворенні трубчастого шару під час розбігу барабана над швидкістю руйнування шару при сповільненні [3, 4, 8]. При малих Re – швидкості утворення шару під час розбігу та руйнування під час сповільнення однакові, що обумовлено виникненням вторинних течій [8].

На рис. 3 показано діаграми меж переходу характерних режимів руху сипкого матеріалу в барабані для різних κ . Явище гістерезису тут не виникало. Кожна похила штрихова лінія (рис. 3,а) відповідає барабану незмінного радіуса.

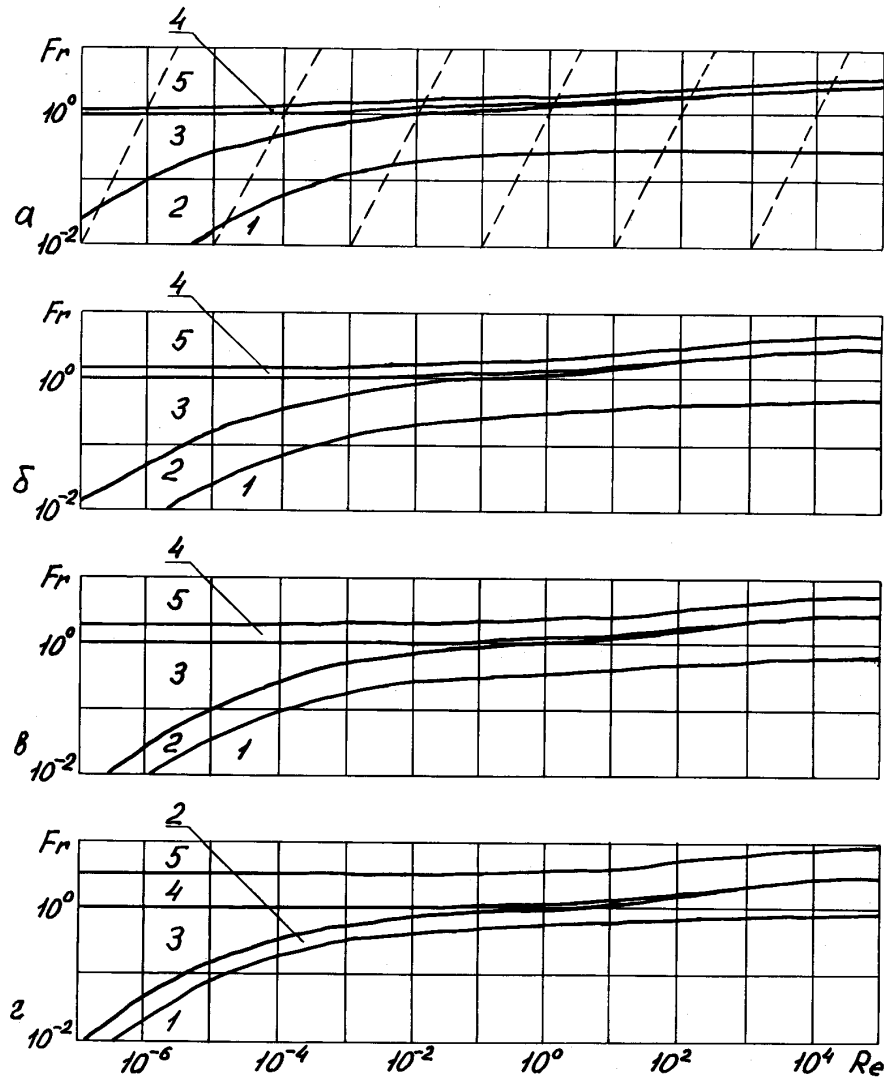


Рис. 3. Універсальні діаграми меж переходу режимів руху сипкого матеріалу в барабані:
 1 – режим без підкидання, 2 – з частковим підкиданням, 3 – з повним підкиданням, 4 – неповного центрифугування, 5 – пристінного шару: $\kappa=0,3$ (а), $\kappa=0,5$ (б), $\kappa=0,7$ (в), $\kappa=0,9$ (г)

На підставі одержаних діаграм запропоновано оптимальні швидкісні режими роботи горизонтальних барабаних машин – спосіб відцентрового лиття трубчастих відливок [14], який базується на використанні явища режимного гістерезису та уточненні меж переходу трубчастого і нетрубчастого режимів течії рідини, а також спосіб подрібнення сипкого матеріалу в барабанному млині [15], який ґрунтується на уточненні меж переходу характерних режимів руху матеріалу.

Істотний прикладний інтерес становить, також, задача визначення моменту опору обертанню горизонтальних барабаних машин. Деформівний матеріал в порожнині створює помітний опір обертанню при нетрубчастому режимі руху. Величина моменту зумовлює значення потужності приводного двигуна, вимоги до точності вибору якої особливо зростають для режиму розбігу ротора [16]. Квазістатична залежність моменту від швидкості обертання барабана визначає вимоги до жорсткості механічної характеристики двигуна, при якій спільне

усталене обертання системи буде стійким. Крім того, величина моменту може характеризувати вид та інтенсивність циркуляційного руху матеріалу та визначати ефективність реалізації технологічного процесу.

Аналіз деяких одержаних експериментально кількісних та якісних залежностей потужності приводу від швидкості обертання барабана з рідким матеріалом представлено в [3, 8]. Системний аналіз значної кількості експериментальних результатів із спробами одержання узагальнених залежностей потужності приводу барабана з сипким матеріалом від низки параметрів наведено в [17, 18].

Для врахування моменту опору у відносних величинах можна використати відносний момент обертання барабана:

$$\Psi = M/M_{\max}, \quad (2)$$

де M – дійсний момент; M_{\max} – умовний максимальний момент, який відповідає розподілу матеріалу в поперечному перерізі у вигляді ідеального твердотілого сегмента, що повернутий разом із барабаном відносно початкового положення на прямий кут θ [19], і дорівнює за величиною добутку ваги матеріалу G на відстань OC від центра ваги C до осі барабана O (рис. 1, в).

$$\text{Тоді} \quad M_{\max} = (2/3)R^3(\sin^3\beta)L\rho g, \quad (3)$$

де ρ – об'ємна густина матеріалу, β – половина центрального кута ідеального сегмента в перерізі, який визначається з рівняння:

$$2\beta - \sin(2\beta) = 2\pi\alpha. \quad (4)$$

Для визначення моменту опору деформівного матеріалу обертання горизонтального циліндра було виконано серію експериментальних досліджень [20, 21] на установці, що мала п'ять змінних барабанів.

Для вимірювання моменту використовувались електромеханічні датчики крутного моменту. Вимірювалось значення моменту опору стаціонарному обертання барабана при усталеному русі матеріалу без врахування втрат у приводі та опорах. Одержано біля 1500 точок для рідини та 800 точок для сипкого тіла. Експериментальні дані були близькими результатам [2-4].

Універсальні трипараметричні графічні залежності моменту Ψ у координатах Re та Fr при різних значеннях α для рідкого матеріалу показано на рис. 4, для сипкого - на рис. 5. Лінії на горизонтальних координатних площинах графіків відповідають межах переходу характерних режимів руху матеріалу.

Аналіз рис. 4 та 5 демонструє близьку подібність руху сипкого матеріалу та рідини з високою в'язкістю. Відмінною особливістю течії рідини є прилипання до стінок, злипання шарів, та явище режимного гістерезису. Особливістю сипкого матеріалу є твердотільний рух поблизу стінки та схилоутворення при осипанні, коли при низькій швидкості ω момент $\Psi \rightarrow 0,5$, що відповідає куту $\theta \approx 30^\circ$.

Таким чином, одержані експериментально з урахуванням прийнятих критеріїв подібності руху універсальні діаграми меж переходу режимів руху та трипараметричні графічні залежності відносного моменту опору в функції чисел Re та Fr для рідини та сипкого матеріалу можуть бути використані для розрахунку, в широкому діапазоні зміни параметрів систем, швидкісних та динамічних параметрів приводу горизонтальних барабанних машин, що частково заповнені легкодеформівним оброблюваним матеріалом.

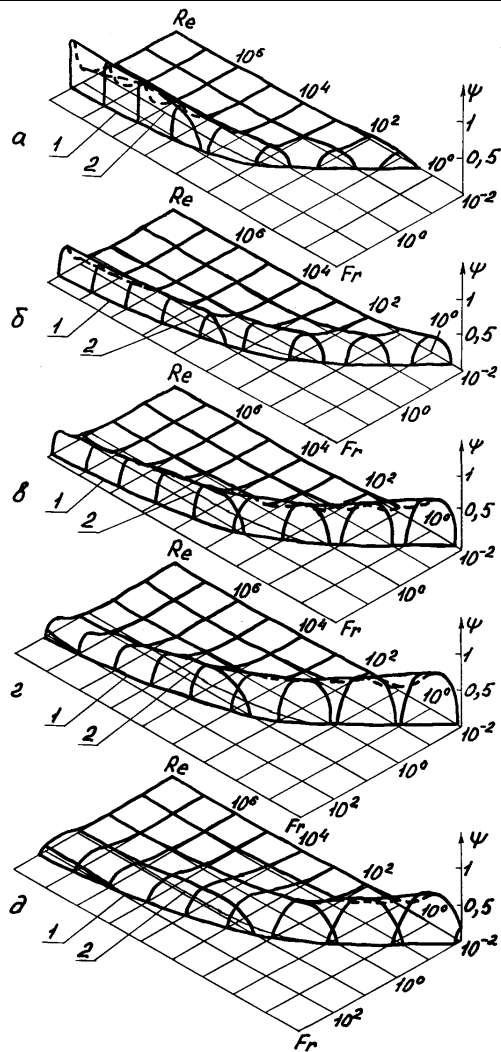


Рис. 4. Універсальні трипараметричні залежності відносного моменту опору обертанню барабана з рідиною при $\kappa=0,1$ (а), $\kappa=0,3$ (б), $\kappa=0,5$ (в), $\kappa=0,7$ (г), $\kappa=0,9$ (д): 1 – межа переходу циркуляційного режиму руху рідини в режим пристінного шару при розгоні барабана, 2 – межа зворотного переходу режимів при сповільненні

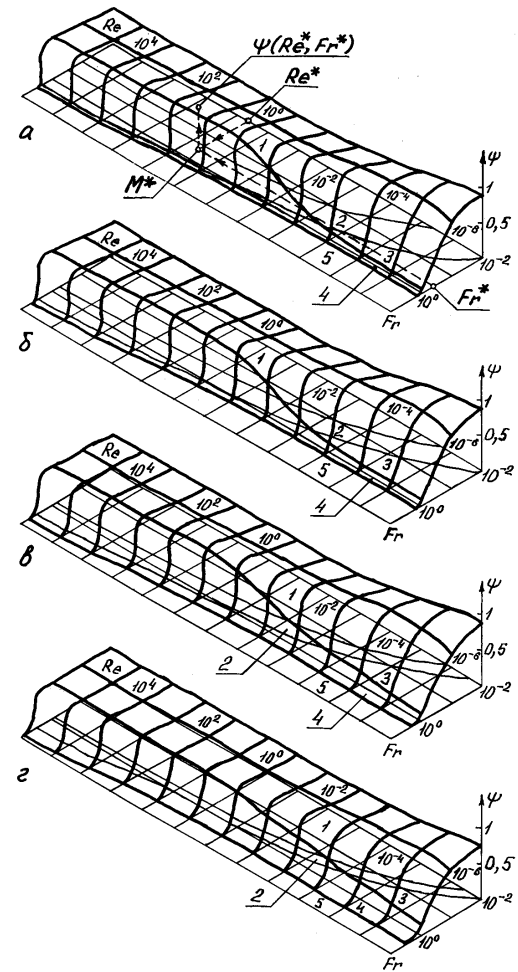


Рис. 5. Універсальні трипараметричні залежності відносного моменту опору барабана з сипким матеріалом при: $\kappa=0,3$ (а), $\kappa=0,5$ (б), $\kappa=0,7$ (в), $\kappa=0,9$ (г) (позначення режимів руху аналогічно рис. 3)

Список літератури

1. Юдин С.Б., Левин М.М., Розенфельд С.Е. Центробежное литье.- М.: Машиностроение, 1972.- 280 с.
2. Перов В.А., Андреев Е.Е., Биленко Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. - М.: Недра, 1990. - 301с.
3. White R.E. Residual condensate, condensate behavior, and siphoning in paper driers // TAPPI. – 1956. - V.39. - №4. - P.228-233.
4. Staud A. Erkenntnisse bei der kondensatabfuhr aus raschlaufenden trokzenzylindern // Voith Forschung und Konstruktion.- 1964. - №11. - S.4.1-4.9.
5. Haji-Sheikh A., Lakshimanarayanan R., Lou D.Y.S., Ryan P.J. Confined flow in a partially-filled rotating horizontal cylinder // Trans. ASME. J.Fluids Engng. -1984. - V.106. - №3. - P.270-278.
6. Gavish J., Chadwick R.S., Gutfinger C. Viscous flow in a partially filled rotating horizontal cylinder // Isr.J.Technol.- 1987. - V.16. - №5-6. - P.264-272.
7. Phillips O.M. Centrifugal waves // J.Fluid Mech. – 1960. - V.7. - №3. - P.340-352.

8. Deiber J.A., Cerro R.L. Viscous flow with a free surface inside a horizontal rotating drum. 1. Hydrodynamics // Ind. Engng Chem.Fundam.- 1976. - V.15. - №2. - P.102-110.
9. Gans R.F., Yalisove S.M. Observation and measurements of flow in a partially-filled horizontally rotating cylinder // Trans. ASME. J.Fluids Engng. – 1982. - V.104. - №3. - P.363-366.
10. Голованов Ю.В., Ширко И.В. Обзор современного состояния механики быстрых движений гранулированных материалов // Механика гранулирован. сред. Теория быстрых движений - М.: Мир, 1985. - С.271-279.
11. Goodman M.A., Cowin S.C. Two problems in the gravity flow of granular materials // J.Fluid Mech.- 1971. - V.45. - №2. - P.321-339.
12. Науменко Ю.В. Скоростные режимы движения вязкой жидкости в горизонтальном вращающемся цилиндре // Инженерно-физ. журн. – 1993. - Т.64. - №5. - С.558-565.
13. Науменко Ю.В. Режимы движения сыпучего материала в горизонтальном вращающемся цилиндре // Изв. вузов. Горн. журн. – 1996. - №2. - С.105-110.
14. А. с. 1423271 (СССР). МКИ В 22 D 13/02. Способ центробежного литья трубчатых отливок / Ю.В.Науменко. - Опубл. 15.09.88. Бюл. №34.
15. А. с. 1323131 (СССР). МКИ В 22 С 19/00. Способ измельчения сыпучего материала в барабанной мельнице / Ю.В.Науменко. - Опубл. 15.07.87. Бюл. №26.
16. Игонин Г.П., Кириллов Е.С., Пикалев А.И. Исследование и анализ статических и динамических моментов трубных шаровых мельниц // Тр. ВНИИ цемент. машиностроения. - 1981. - Вып.24.- С.8-14.
17. Gow A.M., Huggenheim M., Campbell A.B., Coghill W.H. Ball milling // Trans. AIMME.- 1934. - V.112. - P.24-78.
18. Hukki R.T. Tumbling mill capacity and power consumption as related to mill speed // Trans. AIMME. – 1954. - V.199. - P.728-730.
19. Новиков А.А., Филягина Т.И. Выбор установочной мощности гравитационных бетоносмесителей непрерывного действия // Строит. и дор. машины. - 1977. - №2. - С.25-26.
20. Науменко Ю.В. Момент вращения горизонтального цилиндра, частично заполненного вязкой жидкостью // Инженерно-физ. журн. – 1998. - Т.71. - №4. - С.639-642.
21. Науменко Ю.В. Момент сопротивления вращению горизонтального цилиндра, частично заполненного сыпучим материалом // Изв. вузов. Горн. журн. – 1998. - №5-6. - С.95-101.