

УДК 621.926.5:539.215

**Науменко Ю. В., д.т.н., доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

## **В'ЯЗКА ТЕЧІЯ РІДКОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ БАРАБАННОГО ЗМІШУВАЧА**

**Розглянуто режими течії в камері обертового барабана. Проаналізовано інтенсивність циркуляції завантаження. Встановлено умови підвищення ефективності робочого процесу барабанного змішувача.**

**Ключові слова:** барабанний змішувач, рідке завантаження, інтенсивність циркуляції.

**Основним напрямом розвитку** гравітаційних змішувачів є інтенсифікація режимів їх роботи.

**Підвищити доволі низьку** ефективність усереднення в барабанних змішувачах можна на основі урахування всіх чинників робочого процесу.

**Проте отримані результати** [1-3] не дозволяють розробити універсальної методики прогнозування режимів течії оброблюваного матеріалу.

**За мету роботи** було поставлено визначення параметрів руху завантаження на основі експериментального аналізу картин та опору течії.

**При помірній швидкості** обертання барабана виникає циркуляційний режим течії рідини переважно у нижній частині камери. При високій швидкості – режим пристінкового шару. Картина усталеного циркуляційного руху рідини у поперечному перерізі камери стаціонарно обертового барабана може бути умовно розділена на низку характерних зон із якісно відмінними течіями (рис. 1).

У пристінному шарі рідина обертається разом із барабаном із незначним проковзування у вигляді близькому до рівномірного малорухливого шару, що прилягає до циліндричної поверхні камери. Пристінний шар виникає за будь-якого значення швидкості обертання і зумовлений лише властивістю рідини до абсолютного прилипання на твердій стінці. У спокої товщина пристінного шару визначається в'язкістю рідини. Зі збільшенням швидкості обертання, а отже, відцентрових сил інерції, товщина пристінного шару поступово зростає. При досягненні відповідної швидкості обертання та достатнього значення відцентрових сил інерції, рідина з інших зон переходить на радіальну периферію

камери і пристінний шар рідини, зумовлений прилипанням, трансформується у пристінковий шар, що в загальному випадку не є пов'язаним із прилипанням. Слід зазначити, що виникнення режиму течії у вигляді пристінкового шару спричинюється дією відцентрових сил інерції, і може бути реалізованим за відсутності сприяючої властивості текучого середовища до прилипання на поверхню камери.

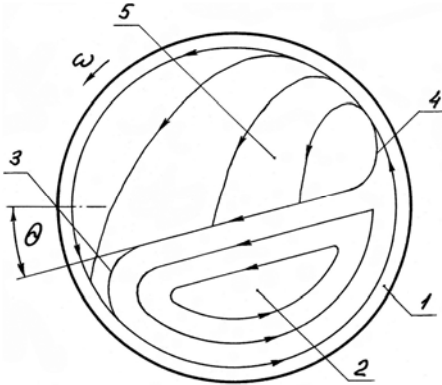


Рис. 1. Схема характерних зон течії у циркуляційному режимі: 1 – пристінний шар, 2 – зона циркуляції, 3 – валик, 4 – меніск, 5 – зона відокремлення із падінням,  $\theta$  – кут нахилу вільної поверхні до горизонталі

У циркуляційній зоні рідина здійснює інтенсивний циркуляційний вихороподібний рух у нижній частині камер зі значними відносними швидкостями зсувного проковзування. У цій зоні шари рідини, що набігають на пристінний шар, утворюють валик, а шари, що збігають – меніск. Вільна поверхня цієї зони за формою може наближатись до площини і бути нахиленою до горизонталі на кут  $\theta$ .

У зоні відокремлення із падінням, що іноді називається зоною «перепліскування» або «дощування», відбувається відокремлення краплин рідини від вільної поверхні пристінного шару або меніску у верхній частині камери та їх падіння із взаємодією між собою.

Характер реалізації зазначених зон течії залежить від параметрів руху завантаженого барабана – радіуса камери  $R$ , ступеня її заповнення рідиною  $\kappa$ , кутової швидкості обертання барабана  $\omega$  та кінематичної в'язкості рідини  $\nu$ .

На рис. 2-4 наведено картини усталеної течії у поперечному перерізі камери стаціонарно обертового барабана для малов'язкої рідини – води ( $\nu=10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с), а на рис. 5-7 – для сильнов'язкої рідини – касторового масла ( $\nu=10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с), де  $\psi_{\omega} = \omega/\omega_{кр}$ ,  $\omega_{кр} = \sqrt{g/R}$  – критична кутова швидкість, при якій відцентрове прискорення на циліндричній поверхні камери дорівнює гравітаційному прискоренню  $g$ .

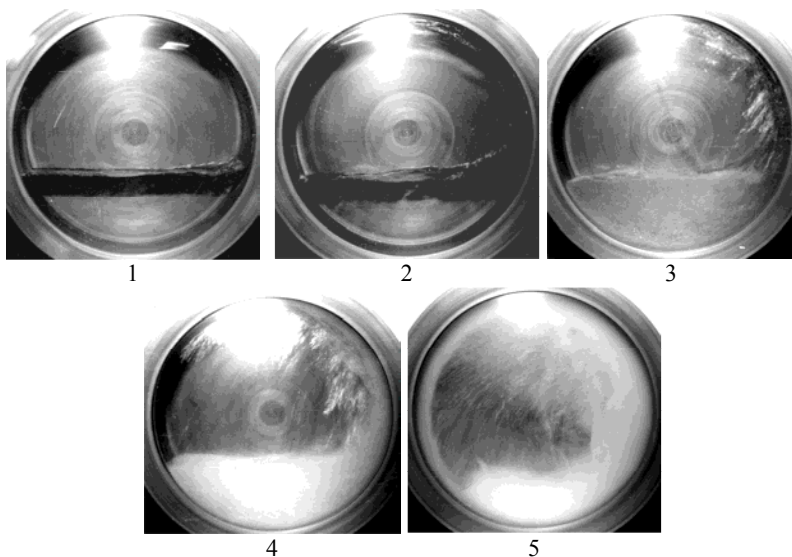


Рис. 2. Картини течії при  $\nu=10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $R=0,15$  м та  $\kappa=0,3$ :  
1 –  $\psi_{\omega}=0,95$ ; 2 –  $\psi_{\omega}=1,9$ ; 3 –  $\psi_{\omega}=2,86$ ; 4 –  $\psi_{\omega}=3,79$ ; 5 –  $\psi_{\omega}=4,79$

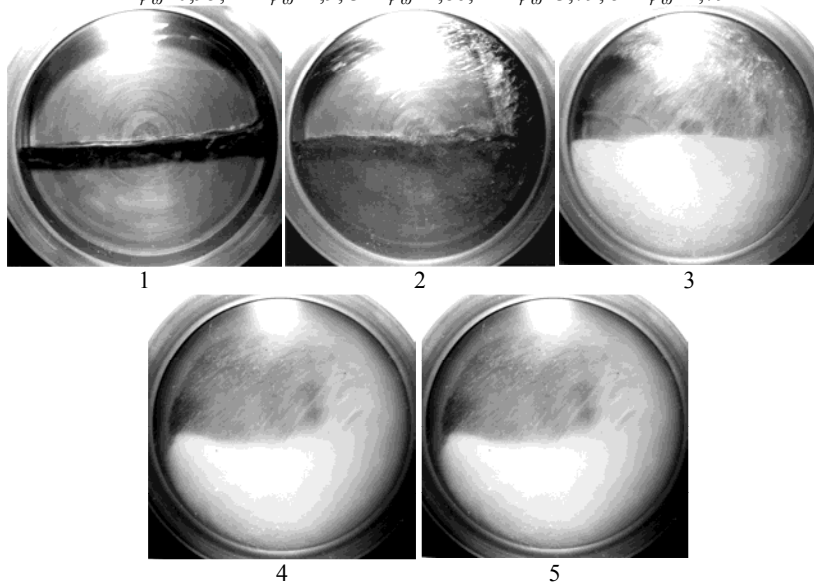


Рис. 3. Картини течії при  $\nu=10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $R=0,15$  м та  $\kappa=0,5$ :  
1 –  $\psi_{\omega}=1,4$ ; 2 –  $\psi_{\omega}=2,12$ ; 3 –  $\psi_{\omega}=3,16$ ; 4 –  $\psi_{\omega}=4,21$ ; 5 –  $\psi_{\omega}=5,28$

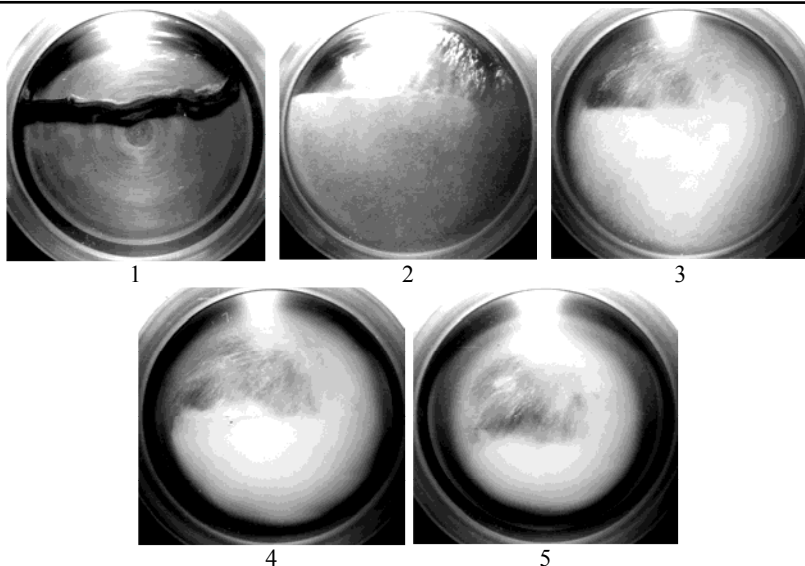


Рис. 4. Картини течії при  $\nu=10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с,  $R=0,15$  м та  $\kappa=0,7$ :  
1 –  $\psi_{\omega}=1,2$ ; 2 –  $\psi_{\omega}=2,4$ ; 3 –  $\psi_{\omega}=3,57$ ; 4 –  $\psi_{\omega}=4,78$ ; 5 –  $\psi_{\omega}=6,01$

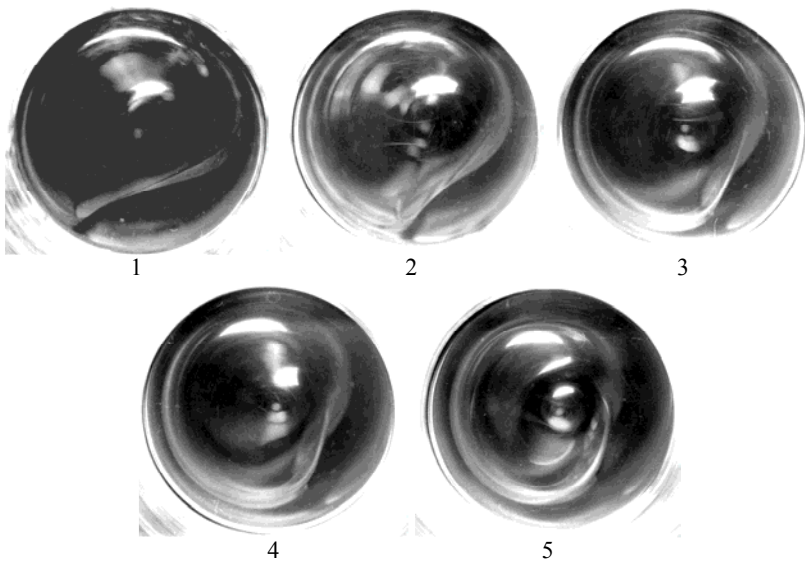


Рис. 5. Картини течії при  $\nu=10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с,  $R=0,0265$  м та  $\kappa=0,3$ :  
1 –  $\psi_{\omega}=0,114$ ; 2 –  $\psi_{\omega}=0,218$ ; 3 –  $\psi_{\omega}=0,327$ ; 4 –  $\psi_{\omega}=0,43$ ; 5 –  $\psi_{\omega}=0,539$

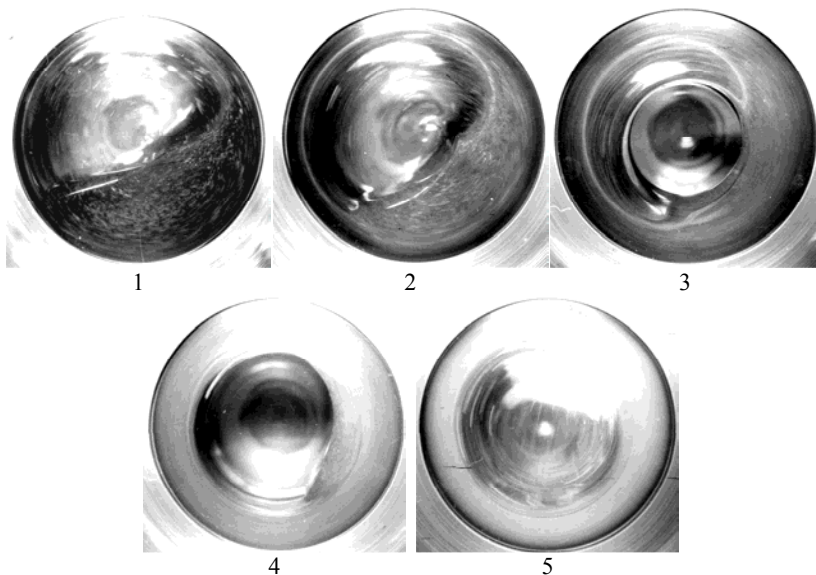


Рис. 6. Картини течії при  $\nu=10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $R=0,053$  та  $\kappa=0,5$ :  
1 -  $\psi_{\omega}=0,32$ ; 2 -  $\psi_{\omega}=0,64$ ; 3 -  $\psi_{\omega}=0,98$ ; 4 -  $\psi_{\omega}=1,31$ ; 5 -  $\psi_{\omega}=1,45$

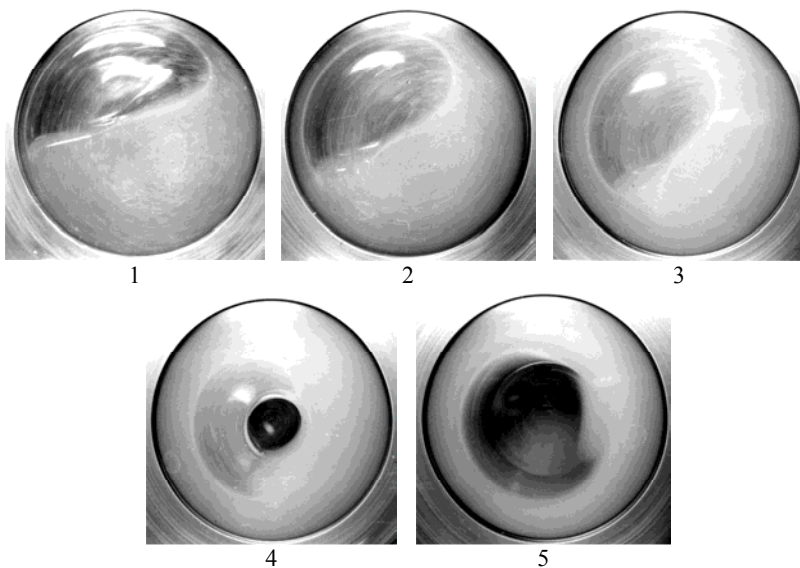


Рис. 7. Картини течії при  $\nu=10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $R=0,053$  та  $\kappa=0,7$ :  
1 -  $\psi_{\omega}=0,34$ ; 2 -  $\psi_{\omega}=0,71$ ; 3 -  $\psi_{\omega}=1,03$ ; 4 -  $\psi_{\omega}=1,42$ ; 5 -  $\psi_{\omega}=1,71$

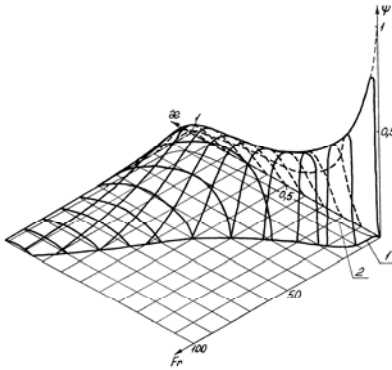


Рис. 8. Залежність відносного моменту опору  $\psi_M$  від  $Fr$  та  $\kappa$  при  $\nu=10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с та  $R=0,106$  м: 1 – перехід циркуляційного в режим пристінкового шару при прискоренні обертання, 2 – зворотній перехід режимів при сповільненні обертання

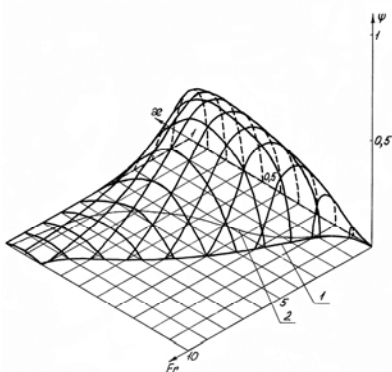


Рис. 9. Залежність відносного моменту опору  $\psi_M$  від  $Fr$  та  $\kappa$  при  $\nu=10^{-3}$  м<sup>2</sup>/с та  $R=0,106$  м (позначення за рис. 8)

Більшість барабаних змішувачів мають довгі камери, коли впливом торцевих поверхонь на течію заповнення, порівняно із впливом циліндричної поверхні, можна знехтувати. За такої умови, як безрозмірні критерії подібності руху традиційно використовуються число Рейнольдса  $Re$  і число Фруда  $Fr$  на циліндричній поверхні камери та ступінь заповнення камери текучим середовищем  $\kappa$ :

$$Re = \omega R^2 / \nu, \quad Fr = \omega^2 R / g, \quad \kappa = w / \pi R^2 L,$$

де  $L$  – довжина камери барабана,  $w$  – об'єм рідини в камері.

На рис. 8 зображено залежність відносного моменту опору обертання барабана  $\psi_M$  від  $Fr$  та ступеня заповнення камери  $\kappa$  при  $R=0,106$  м для малов'язкої рідини – води, а на рис. 9 – для сильнов'язкої рідини – касторового масла. Величина  $\psi_M$  визначає відношення дійсного моменту опору обертання барабана до умовного максимального моменту, що відповідає розподілу середовища у поперечному перерізі камери у вигляді ідеального твердотілого сегмента із нахилом вільної

поверхні до горизонталі на прямий кут. Значення моменту опору при робочій швидкості обертання може характеризувати вид і інтенсивність циркуляційного руху матеріалу та визначати ефективність реалізації технологічного процесу [4, 5].

На рис. 10 наведено універсальні залежності моменту  $\psi_M$  від  $Fr$  та  $Re$ .

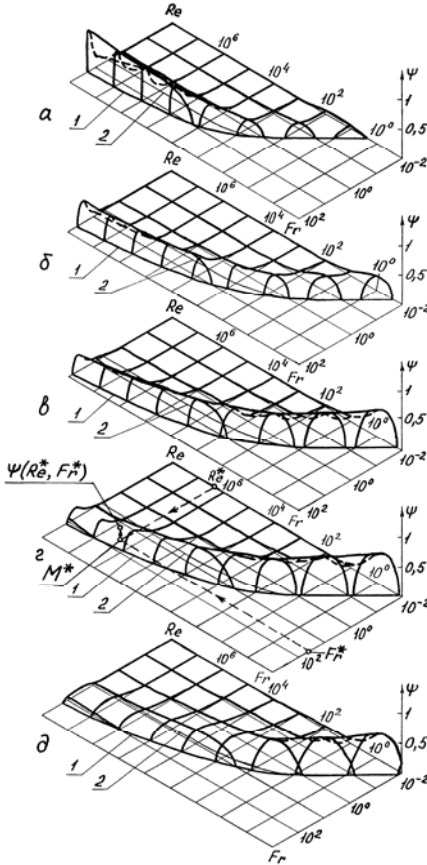


Рис. 10. Універсальні залежності відносного моменту опору  $\psi_M$  від  $Fr$  та  $Re$  при  $\kappa=0,1$  (а),  $\kappa=0,3$  (б),  $\kappa=0,5$  (в),  $\kappa=0,7$  (г) та  $\kappa=0,9$  (д) (позначення за рис. 8)

При малій в'язкості рідини та великому радіусі камери слабо проявляється ефект прилипання рідини до твердої стінки та злипання шарів (рис. 2-4, 8 та 10). Тому за об'ємом переважає циркуляційна зона течії зі слабо вираженими валиком і меніском та незначним нахилом вільної поверхні  $\theta \rightarrow 0$ , а також частково реалізується зона відокремлення із падінням. Зі збільшенням швидкості обертання барабана тов-

щина пристінного шару повільно зростає шляхом налипання за рахунок зменшення циркуляційної зони. На завершальному етапі скорочення зони циркуляції, внаслідок недостатнього злипання шарів поблизу вільної поверхні пристінного шару, виникає зона інтенсивного перепліскування, що перешкоджає остаточному переходу циркуляційної зони у пристінний шар. Нарешті, при досягненні граничної швидкості обертання барабана, циркуляційна та зона відокремлення із падінням остаточно переходять у пристінний шар із виникненням режиму пристінкового шару.

При великій в'язкості рідини та малому радіусі камери прилипання та злипання шарів посилюється (рис. 5-7, 9 та 10). Тому зона відокремлення із падінням практично не виникає, а основний об'єм рідини вже при низькій швидкості обертання зосереджується у пристінному шарі. Невелика циркуляційна зона має збільшенні валик і меніск та значний нахил вільної поверхні, гранично  $\theta \rightarrow 90^\circ$ , а в перерізі набуває форми краплі, що скочується по вільній поверхні пристінного шару. Зі збільшенням швидкості обертання барабана краплеподібна циркуляційна зона підхоплюється пристінним шаром, що піднімається вгору, дещо скорочується в об'ємі, а потім плавно переходить у потовщення пристінного шару, яке згодом поступово зменшується і при великих швидкостях зникає.

При великому ступені заповнення камери рідиною зростає об'єм циркуляційної зони порівняно із пристінним шаром, більш інтенсивно проявляється зона відокремлення із падінням, а валик, меніск та кут нахилу вільної поверхні зменшуються. При малому ступені заповнення зменшується циркуляційна зона, слабо проявляється зона відокремлення із падінням і збільшуються валик, меніск та кут нахилу вільної поверхні.

В режимі течії у вигляді пристінкового шару вся рідина обертається разом з барабаном із певним проковзуванням у вигляді дещо різностінного шару. Оскільки частина шару, що рухається донизу, прискорюється відносно барабана, а протилежна частина, що рухається догори, сповільнюється, товщина верхньої частини шару є дещо більшою за товщину нижньої. Найбільша товщина шару зсунута на певний кут відносно найвищого положення у напрямі обертання барабана. Відносно проковзування та різностінності пристінкового шару набувають максимального значення зі зменшенням швидкості обертання, і прямують до нуля із її збільшенням.

**Таким чином**, інтенсивність циркуляції рідкого завантаження обертального барабана та ефективність процесу змішування підвищуються,



при великих числах Рейнольдса  $Re$  зі зменшення ступеня заповнення камери, а при малих  $Re$  – зі збільшенням заповнення.

1. Макаров Ю. И. Аппараты для смешивания сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с. 2. Кафаров В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов. – М. : Наука, 1985. – 440 с. 3. Першин В. Ф. Переработка сыпучих материалов в машинах барабанного типа / В. Ф. Першин, В. Г. Однолько, С. В. Першина. – М. : Машиностроение, 2009. – 220 с. 4. Науменко Ю. В. Основы теории режимів роботи барабаних млинів: Монографія / Ю. В. Науменко. – Рівне : Видавництво СЦД Зелент О. І., 2009. – 282 с. 5. Напружено-деформований стан будівельних матеріалів в технологічних процесах виробництва / В. Й. Сівко, В. А. Поляченко, М. П. Кузьмінець, С. В. Сівко, Ю. В. Науменко. – К. : НТУ, 2010. – 352 с.

Рецензент: к.т.н., професор Сухарев Е. О. (НУВГП)

---

**Naumenko Y. V., Doctor of Engineering, Associate Professor** (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

## VISCOUS FLOW OF DRUM MIXER LIQUID FILLING

**The viscous filling flow in rotating drum chamber is considered. The fluid filling circulation intensity is examined. The possibilities for raising the value of a drum mixer operating conditions are established.**  
**Keywords:** drum mixer, fluid filling, circulation intensity.

---

**Науменко Ю. В., д.т.н., доцент** (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

## ВЯЗКОЕ ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОЙ ЗАГРУЗКИ БАРАБАННОГО СМЕСИТЕЛЯ

**Рассмотрены режимы течения в камере вращающегося барабана. Проанализована интенсивность циркуляции загрузки. Установлены условия повышения эффективности рабочего процесса барабанного смесителя.**  
**Ключевые слова:** барабанный смеситель, жидкая загрузка, интенсивность циркуляции.

---