

## Будівельні машини і технологічне обладнання

УДК 622.647.4

В.М. Гарнець, к.т.н., проф.;  
О.О.Булавка, аспірант (КНУБА, Київ)

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПОДАЧІ БЕТОННОЇ СУМІШІ ЗА ДОПОМОГОЮ БУНКЕРНИХ ПРИСТРОЇВ БЕТОНОФОРМУЮЧИХ АГРЕГАТІВ

*АННОТАЦІЯ.* Розглянуто дослідження процесу подачі бетонної суміші за допомогою бункерних пристроїв бетоноформуючих агрегатів, що дозволяє визначити раціональний режим витікання суміші з бункера при формуванні поверхневими ковзними віброштампами.

*Ключові слова:* бетоноформуючий агрегат, бункер, ковзний віброштамп, в'язкість, ефективне прискорення

*АННОТАЦИЯ.* Рассмотрено исследование процесса подачи бетонной смеси с помощью бункерных устройств бетоноформирующих агрегатов, что позволяет определить рациональный режим истекания смеси из бункера при формировании поверхностными скользящими виброштампами.

*Ключевые слова:* бетоноформирующий агрегат, бункер, скользящий виброштамп, вязкость, эффективное ускорение.

*SUMMARY.* The research of process of serve of concrete mixture is examined by the bunker devices of бетоноформирующих агрегатов, which allows to define the rational mode of effluence of mixture from a bunker at forming superficial sliding vibroshtampami.

*Key words:* бетоноформирующий агрегат, бункер, скользящий виброштамп, вязкость, эффективное ускорение.

---

#### Вступ

Процеси вільного або примусового витікання бетонної суміші характерні для цілого ряду формувальних агрегатів, які застосовуються як у виробництві збірного залізобетону, так і в монолітному будівництві при подачі суміші до збірної опалубки. Витікання суміші здійснюється під дією сил тяжіння або шляхом зовнішньої, або внутрішньої вібраційної дії на суміш і зниження, таким чином, її в'язкості і наступним ущільненням. Необхідність використання вібраційної дії для інтенсифікації витікання суміші із бункера визначається її специфічними фізико-механічними властивостями: високою вологістю, здатністю до налипання, високими коефіцієнтами зовнішнього і внутрішнього тертя і т.п.

Визначення раціонального режиму витікання суміші із бункерних пристроїв при формуванні поверхневими ковзними віброштампами дозволяє забезпечувати в цілому стабільність процесу ущільнення і формування. Відомі дослідження процесів витікання різних квазігомогенних середовищ [4, 5] із бункерних пристроїв. Але саме реологічні особливості властивостей бетон-

них сумішей не дозволяють використовувати отримані результати для режимно-параметричних розрахунків робочих органів бетоноформуючих агрегатів (БФА).

#### Мета і постановка задачі

Метою даної роботи є дослідження витікання бетонної суміші з бункера, яка дозволить визначити швидкість витікання і витрати суміші під впливом різних факторів, зокрема, геометрії бункера і параметрів вібраційного впливу.

Для вирішення даної задачі розглянемо сили, діючі на шар суміші, який знаходиться в бункері (рис.1). Під дією вібратора в масиві суміші розповсюджуються хвилі напружень, напрямом яких визначається як розташуванням вібратора під певним кутом, так і геометрією бункера. В загальному випадку довільний напрямом плоскої хвилі може бути представлено двома складовими: по горизонталі і вертикалі. В напрямку осі  $Y$  впливом деформаційної хвилі знехтуємо. Для визначення ефективного прискорення  $A_{ef}$  з урахування сил тертя і зчеплення, яке характеризується в'язкістю природою, скористаємося методичним підходом, який враховує взає-

модію частинок “найближчих сусідів”, запропонований в роботі [3] для широкої постановки задачі. Розглянемо рівняння сил, яке діє на частинку масою  $m$  в полі фронту плоскої хвилі:

$$m(g + A^* \omega^2 \sin \omega t) = \eta_{ef} \left( \frac{\partial j}{\partial t} \right) + \sigma \cdot f_{ef}, \quad (1)$$

де  $A^* = A_o \cdot e^{-\alpha(\vec{k} \cdot \vec{r})} \cdot \cos \delta$  - плинне значення амплітуди коливань на відстані  $\vec{r}$  за напрямком  $\vec{k}$  (2);  $\alpha$  - коефіцієнт згасання;

$\omega$  - частота;  $t$  - час;  $\eta_{ef}$  - ефективна в'язкість за моделлю Бінгама – Шведова;

$\sigma$  - напруження в шарі бетонної суміші, що виникає біля стінок бункера;

$\frac{\partial j}{\partial t}$  - швидкість деформації;

$f_{ef}$  - ефективний коефіцієнт тертя.

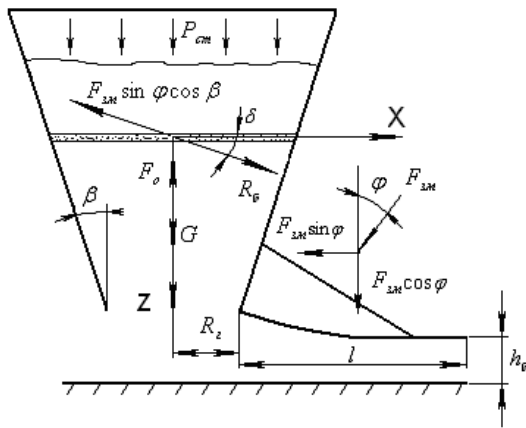


Рис. 1. Розрахункова схема робочого органа БФА з поверхневим ковзним віброштампом:

$F_o$  - сила опору бетонної суміші;  $G$  - сила тяжіння;  $P_{cm}$  - статичне навантаження бетонної суміші;

$R_o$  - гідравлічний радіус вихідного отвору;

$R_o$  - реакція бетону в напрямку коливань;

$F_{3m} \sin \varphi \cos \beta$  - складова змушуючої сили, яка діє на частинку в полі фронту плоскої хвилі;  $l$  - довжина вібролижі;  $h_o$  - висота ущільненої бетонної суміші;  $\beta$  - кут нахилу стінки бункера;  $\delta$  - кут поляризації;  $\varphi$  - кут прикладення змушуючої сили.

Задача витікання зводиться до вирішення рівняння руху аномально – в'язкого середовища, відповідно до моделі Бінгама – Шведова, правомірність якої підтверджується багатьма дослідниками [1, 3, 6].

Ефективна в'язкість для середовища за моделлю Бінгама - Шведова

$$\eta_{ef} = \frac{\tau_o}{\frac{\partial j}{\partial t}} + \eta_o, \quad (2)$$

де  $\tau_o$  - граничне напруження зсуву;

$\eta_o$  - в'язкість гранично зруйнованої структури;  $\frac{\partial j}{\partial t}$  - швидкість деформації.

Коефіцієнт ефективного тертя визначається із співвідношення зусиль, які діють у вертикальній або горизонтальній площинах.

Для вертикальної складової вібрації:

$$F_e // R \quad f_{ef} = \frac{R}{P} = f \left( 1 - \frac{F}{fP} + \frac{C}{fP} \right); \quad (3)$$

для горизонтальної складової:

$$F_e \perp R \quad f_{ef} = \frac{R}{P} = f \left( 1 - \frac{F}{P} + \frac{C}{fP} \right), \quad (4)$$

де  $R$  - опір переміщенню частинки;

$F = F_o \sin \omega t = mA \omega^2 \sin \omega t$  - силова дія на частинку, яка обумовлена вібрацією;

$P$  - тиск;  $C$  - зчеплення;  $f$  - коефіцієнт тертя.

Рівняння плоскої хвилі зміщення, яка розповсюджується в ізотропному середовищі від джерела коливань з урахуванням експоненціального закону згасання, буде

$$U = A \cdot e^{-\alpha(\vec{k} \cdot \vec{r})} \cdot \sin \left( t - \frac{(\vec{k} \cdot \vec{r})}{v} \right), \quad (5)$$

де  $r = (x; z)$ ;  $|\vec{r}| = \sqrt{x^2 + z^2}$  - відстань від центра збудження до точки спостереження

$$(\vec{k} \cdot \vec{r}) = (k_x r_x + k_z r_z). \quad (6)$$

Швидкість коливань частинок середовища визначається як похідна від зміщення, тобто

$$U' = \frac{\partial u}{\partial t} = A \cdot e^{-\alpha(\vec{k} \cdot \vec{r})} \cdot \omega \cdot \cos \omega \left( t - \frac{(\vec{k} \cdot \vec{r})}{v} \right) \quad (7)$$

Процес витікання суміші починається внаслідок послаблення зв'язуючої здатності прошарків. Саме цим проявляється позитивна вібраційна дія для витікання. Позначаючи відстань між частинками через  $\Delta$  і враховуючи взаємодію кожної з них із “найближчими сусідами” [3] для сумарного перепаду швидкості коливань двох ча-

стинок в горизонтальній і вертикальній площинах, отримаємо

$$\begin{aligned}
 U'_{1-2} = & A \cdot \cos \delta \cdot \omega \cdot e^{-\alpha(\mathbf{x} \cdot \vec{r})} \times \\
 & \times \left[ \cos \omega \left( t - \frac{(\mathbf{x} \cdot \vec{r})}{v} \right) - e^{-\alpha(\mathbf{x}(\vec{\Delta} + \vec{\Delta r}))} \times \right. \\
 & \times \left. \cos \omega \left( t - \frac{(\mathbf{x}(\vec{r} + \vec{\Delta} + \vec{\Delta r}))}{v} \right) \right] + \\
 & + k \cdot A \sin(90^\circ - \delta) \omega \cdot e^{-\alpha(\mathbf{x} \cdot \vec{r})} \times \\
 & \times \left[ \cos \omega \left( t - \frac{(\mathbf{x} \cdot \vec{r})}{v} \right) - e^{-\alpha(\mathbf{x}(\vec{\Delta} + \vec{\Delta r}))} \times \right. \\
 & \times \left. \cos \omega \left( t - \frac{(\mathbf{x}(\vec{r} + \vec{\Delta} + \vec{\Delta r}))}{v} \right) \right], \quad (8)
 \end{aligned}$$

де  $k$  – коефіцієнт бокового тиску.

Позначимо вираз в квадратних дужках через  $B$ . Тоді величина швидкості деформації

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial j}{\partial t} = & \frac{U'_{1-2}}{\Delta} = \frac{AB \cdot \cos \delta \cdot \omega \cdot e^{-\alpha(\mathbf{x} \cdot \vec{r})}}{\Delta} + \\
 & + \frac{kAB \sin(90^\circ - \delta) \omega \cdot e^{-\alpha(\mathbf{x} \cdot \vec{r})}}{\Delta} = \\
 = & \frac{AB\omega \cdot e^{-\alpha(\mathbf{x} \cdot \vec{r})}}{\Delta} (\cos \delta + k \sin(90^\circ - \delta)). \quad (9)
 \end{aligned}$$

Ефективний коефіцієнт тертя  $f_{ef}$  визначимо виходячи із співвідношення зусилля для зміщення частинки в довільному напрямку і тиску та з урахуванням коефіцієнта бокового тиску

$$\begin{aligned}
 f_{ef} = & f \left[ 1 + \frac{C}{fmqk} - \frac{A \cdot \omega^2 \cdot e^{-\alpha(\mathbf{x} \cdot \vec{r})}}{qk} \times \right. \\
 & \times \left. \left( \frac{\cos \delta}{f} + \sin(90^\circ - \delta) \right) \cdot \left( 1 - e^{-\alpha(\mathbf{x}(\vec{\Delta} + \vec{\Delta r}))} \right) \right]. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Окремі випадки поляризації хвилі: у вертикальному напрямку  $\delta = 0$ ; у горизонтальному – при  $\delta = \frac{\pi}{2}$ . Аналіз (9) і (10)

показує, що на величину ефективного коефіцієнта тертя і бокового тиску суттєвий вплив має кут поляризації коливань по вертикалі.

Нормальне напруження, яке випробовує частинка в масиві суміші у бункері, складається із статичної і динамічної складових. Тому динамічна складова пропорційна швидкості деформації

$$\begin{aligned}
 \sigma = & \rho q k \Delta r + \frac{1}{2} \rho v A \sin \delta \omega \times \\
 & \times \left[ \frac{e^{-\alpha(\mathbf{x} \cdot \vec{r})} \cdot \cos \omega \left( t - \frac{(\mathbf{x} \cdot \vec{r})}{v} \right)}{\Delta r} \times \right. \\
 & \times \left. \frac{e^{-\alpha(\mathbf{x}(\vec{r} + \vec{\Delta r}))} \cdot \cos \omega \left( t - \frac{(\mathbf{x}(\vec{r} + \vec{\Delta r}))}{v} \right)}{\Delta r} \right], \quad (11)
 \end{aligned}$$

де  $\rho$  – середня за об'ємом бункера щільність суміші.

Розглянемо рівняння рівноваги сил (1) з урахуванням тільки амплітудних значень в'язкісної, сухого тертя і вібраційної складових, які діють на окремо взятую частинку. Отже в членах рівняння, де косинус має  $(\mathbf{x} \cdot \vec{r})$ , доцільно припустити, що  $(\mathbf{x}(\vec{r} + \vec{\Delta} + \vec{\Delta r}))$ ;  $(\mathbf{x}(\vec{r} + \vec{\Delta r}))$  незначно відрізняються від  $\mathbf{x}(\vec{r})$ . Тобто отримані формули справедливі тільки на деякій відстані від джерела коливань.

Тоді маємо

$$\begin{aligned}
 mq + mAe^{-\alpha(\mathbf{x} \cdot \vec{r})} \cdot \cos \omega^2 = & \\
 = \eta_{ef} \frac{(A \cos \delta + kA \sin(90^\circ - \delta)) \times}{\Delta} \times & \\
 \times \omega \cdot e^{-\alpha(\mathbf{x} \cdot \vec{r})} \cdot \left( 1 - e^{-\alpha(\mathbf{x}(\vec{\Delta} + \vec{\Delta r}))} \right) + & \\
 + \left[ \rho q k \Delta r + \frac{1}{2} \rho v A \sin(90^\circ - \delta) \times \right. & \\
 \times \omega \cdot \frac{e^{-\alpha(\mathbf{x} \cdot \vec{r})} (1 - e^{-\alpha(\mathbf{x} \cdot \vec{\Delta r}))}}{\Delta r} \left. \right] \times & \\
 \times f \left[ 1 + \frac{C}{fmqk} - \left( \frac{\cos \delta}{f} + \sin(90^\circ - \delta) \right) \times \right. & \\
 \times \frac{A \omega^2 e^{-\alpha(\mathbf{x} \cdot \vec{r})}}{qk} \cdot \left( 1 - e^{-\alpha(\mathbf{x}(\vec{\Delta} + \vec{\Delta r}))} \right) \left. \right]. & \quad (12)
 \end{aligned}$$

Усреднюючи за об'ємом бункера  $V$  амплітуду коливань  $Ae^{-\alpha(\mathbf{x} \cdot \vec{r})}$  з урахуванням для ізотропного середовища  $\alpha_x = \alpha_z = \alpha$ , і що  $\alpha|\Delta|$ ;  $\alpha|\Delta + \Delta r| \ll 1$ , після деяких перетворень, отримаємо

$$\tilde{a} = \frac{A(e^{\alpha \mathbf{x} \cdot \vec{x} a} - e^{-\alpha \mathbf{x} \cdot \vec{x} a}) (1 - e^{-\alpha \mathbf{x} \cdot \vec{z} H})}{4abH\alpha^3 \cdot \cos \delta \cdot \sin(90^\circ - \delta)}, \quad (13)$$

де  $a, b, H$  – характерні розміри об'єму суміші, що обробляється відповідно до осей  $OX$  і  $OZ$ .

Тоді рівняння рівноваги сил перепишемо в вигляді:

$$mq + m\tilde{a} \cos \delta \omega^2 = \eta_{ef} \left( \frac{\cos \delta + k \sin(90^\circ - \delta)}{\Delta} \right) \times \\ \times \omega \cdot \tilde{a} \cdot \alpha (\Delta + \Delta r) \cdot (\cos \delta + \sin(90^\circ - \delta)) + \\ + f \left[ \rho q k \Delta r + \frac{1}{2} \rho v \sin(90^\circ - \delta) \omega \cdot \tilde{a} \alpha \times \right. \\ \times (\cos \delta + \sin(90^\circ - \delta)) \left. \right] \times \\ \times \left[ 1 + \frac{C}{fmqk} - \left( \frac{\cos \delta}{f} + \sin(90^\circ - \delta) \right) \right] \times \\ \times \omega^2 \tilde{a} \frac{1}{qk} \alpha (\Delta + \Delta r) (\cos \delta + \sin(90^\circ - \delta)) \left. \right]. \quad (14)$$

Позначимо вираз  $(\cos \delta + \sin(90^\circ - \delta)) = K_n$  (коефіцієнт поляризації) і знайдемо ефективне прискорення, що діє на частинку в масиві бетонної суміші, яка знаходиться в бункері під дією вібрації

$$q_{ef} = q + \tilde{a} \omega^2 \cos \delta - \eta_{ef} \omega \cdot \tilde{a} \alpha (\Delta + \Delta r) K_n \times \\ \times \frac{(\cos \delta + k \sin(90^\circ - \delta))}{\Delta m} - \\ - \frac{f}{m} \left[ \rho q k \Delta r + \frac{1}{2} \rho v \sin(90^\circ - \delta) \omega \cdot \tilde{a} \alpha \cdot K_n \right] \times \\ \times \left[ 1 + \frac{C}{fmqk} - \left( \frac{\cos \delta}{f} + \sin(90^\circ - \delta) \right) \right] \times \\ \times \omega^2 \tilde{a} \cdot \frac{\alpha}{qk} (\Delta + \Delta r) K_n \left. \right]. \quad (15)$$

Вираз (15) можна представити у такому вигляді

$$q_{ef} = q + \tilde{a} \omega^2 \cos \delta - W_o, \quad (16)$$

де  $W_o$  - сили опору бетонної суміші.

Вплив параметрів вібраційного впливу  $A, \omega$  і в'язкості бетонної суміші  $\eta$  на відносне прискорення сили, яке діє на частинку в полі плоскої хвилі, знаходимо із графіка, що зображений на рис.2. Із аналізу даних залежностей (крива 1, 2 з рис.2) отримаємо зростання відносного прискорення за сталою амплітудою чи частотою коливань. При цьому залежність від амплітуди проявляється меншою ступеню. Це пояснюється тим, що за збільшення амплітуди чи частоти, сили внутрішнього тертя в масиві бетонної суміші зменшуються і тому відбувається зниження опору руху, що призводить до збільшення прискорення частинки. Разом з тим видно, що за збільшення

в'язкості бетонної суміші в межах  $\eta = 200 \dots 800 \text{ Па} \cdot \text{с}$  (крива 3 рис.2) - відносне прискорення спадає, тобто відбувається уповільнення частинки в масиві бетонної суміші. В'язкість визначалась за результатами аналізу роботи [6].

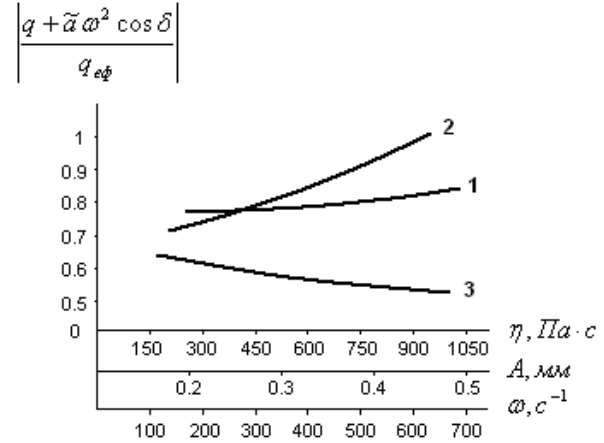


Рис. 2. Графік залежності відносного прискорення від:

1 - амплітуди коливань вібратора; 2 - частоти коливань вібратора; 3 - в'язкості бетонної суміші

З урахуванням (16) для виразу швидкості витікання [1] маємо

$$v = \sqrt{\frac{q_{ef} \cdot R_z}{2tg(90^\circ - \delta)}} \cdot th \left( \sqrt{\frac{2tg(90^\circ - \delta) q_{ef}}{R_z}} \cdot t \right), \quad (17)$$

де  $t$  - поточний час процесу.

Формула для визначення витрати суміші

$$Q = S_{e.o} \sqrt{\frac{q_{ef} \cdot R_z}{2tg(90^\circ - \delta)}} \cdot th \left( \sqrt{\frac{2tg(90^\circ - \delta) q_{ef}}{R_z}} \cdot t \right), \quad (18)$$

де  $S_{e.o}$  - площа вихідного отвору бункера.

На рис. 3 побудовано графік залежності швидкості витікання від гідравлічного радіуса  $R_z$ , кута поляризації  $\delta$  [2], а також від впливу відносного прискорення частинки. Аналіз показує, що за збільшення гідравлічного радіуса і прискорення частинки буде більшою швидкість витікання бетонної суміші із бункера. Але за збільшення кута нахилу стінок бункера від вертикалі швидкість витікання зменшується завдяки збільшенню опору.

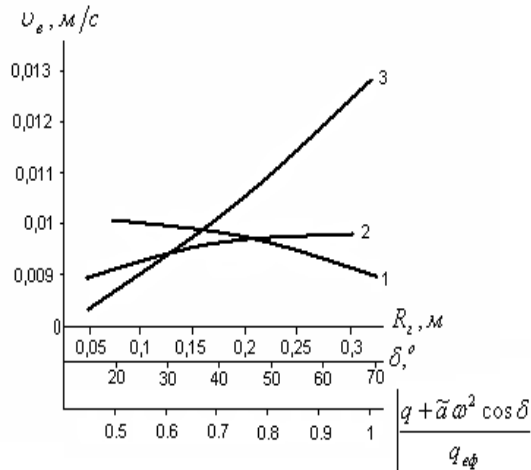


Рис. 3. Графік залежності швидкості витікання від:

1 – кута поляризації; 2 – гідравлічного радіуса бункера; 3 – ефективного прискорення.

Для визначення залежності зміни витрати суміші від геометрії бункера необхідно проаналізувати графік, що зображений на рис.4. Графік дає змогу зрозуміти, що при збільшенні розмірів вихідного отвору бункера витрати суттєво збільшуються.

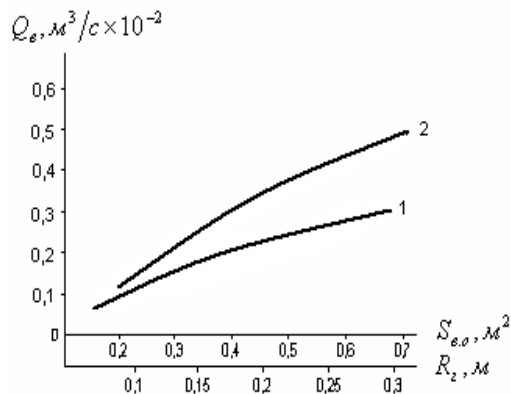


Рис. 4. Графік залежності витрати бетонної суміші від:

1 – гідравлічного радіуса бункера;  
2 – площі вихідного отвору бункера.

### Висновки

1. Таким чином, при вирішенні поставленої задачі отримані залежності для визначення швидкості витікання бетонної суміші з бункера та її витрат.
2. В подальших дослідженнях, необхідно визначати енерговитрати для забезпечення найбільш ефективних режимів вібрації в процесі взаємодії бункера і ковзного віброштампу в конструкції комплексного робочого органа БФА.

### Література

1. Аксельрод Е.З. Исследование процесса формирования тонкостенных железобетонных конструкций скользящими виброштампами; Сб. Теория формирования бетона, ОНТИ НИИЖБ. – М., 1969. – 126-142с.
2. Гарнець В.М., Булавка О.О. Визначення продуктивності процесів при формуванні на БФА/ Зб. №20 Техніка будівництва - Київ, 2007. – 74-76 с.;
3. Гиришель Г.Б. О физической природе вибрационного воздействия на уплотнения смеси; Сб. Технология бетона и железобетонных конструкций. НИИСК Госстроя УССР. - К. : Будівельник, 1972. – 142-148 с.;
4. Гячев Л.В. Движение сыпучих материалов в трубах и бункерах - М. : Машиностроение, 1968. – 184 с.;
5. Зенков Р. Л., Гриневич Г.П., Исаев В.С. Бункерные устройства, – М. : Машиностроение, 1977. – 222 с.;
6. Руденко И.Ф. Формование изделий поверхностными виброустройствами. - М. : Стройиздат, 1972. – 104 с.

Рецензент: І.І. Назаренко, д.т.н., проф.  
(КНУБА)

Отримано: 25.03.2009р.