

сопротивления потоку нагнетаемой жидкости, так как их суммарная площадь превышает площадь поперечного сечения НКТ.

Технология с постоянным комплексом устройств, которая эффективна как при первичных, так и при повторных ГРП, при этом возникновении дополнительных длинных трещин, процесс конгруэнции частей полимеров и создание гидроизолирующих пробок в таких трещинах происходит автоматически без изменения схемы сборки устройства.

Капитальные вложения, необходимые для доработки обсаженного скважины с целью реализации акустической технологии, мизерны. Такое устройство в конструктивном отношении несложное, оно требует дополнительных эксплуатационных затрат на техническое обслуживание и капитальный ремонт.

Поэтому внедрение предлагаемой акустической технологии предполагает высокий экономический эффект.

Список использованной литературы:

1. Волновое воздействие на пласт // СМИ Республики Коми / автор В.Сергеева; //Komipress.ru: инф портал Республики Коми URL:<http://www.komipress.ru/smi/issue.php>; дата обращения 25.03.2011
2. Бергман Л.Ультразвук и его применение в технике Л.Бергман е изд. - М.: Изд-во Иностранной литературы, 1957. - 726 с.
3. Борьба с шумом на производстве. Справочник/ Е.Я. Кинин, Л.А.Борисов, И.В.Горенштейн и др.; Под общ. ред. Е.Я.Юдин. М.: Машиностроение, 1985.- 400 с.
4. Способ акустического выравнивания фронта заводнения нефтяного пласта: пат. 2447273 Рос. Федерации. № 2010137447/03; здани 08.09.2010; опубл. 10.04.12, Бюл. № 10. - 13 с.

© Н.В. Шаталова, Ю.А. Савицк, 2014

УДК 514.18:517.972

Б.М. Шаталов,

д.т.н., проф., зав. кафедрой,

Харьковский национальный университет строительства и архитектуры

О.М. Семисин,

к.т.н., доц., проректор,

Национальный университет гражданской защиты Украины,

г. Харьков, Украина

О ПРЕИМУЩЕСТВАХ РОТОРНОГО ГРУНТОМЕТАТЕЛЯ С КРИВОЛИНЕЙНЫМИ ОПТИМАЛЬНЫМИ ЛОПАТКАМИ

Введение. При создании ряда технологических (технологических) устройств возникает задача выбора оптимальной формы направляющих, в которых движутся частицы (например, грунт) под действием центробежных сил. В частности, актуальной является проблема создания грунтометальных механизмов, используемых для гашения пожаров в местностях, где отсутствуют источники воды [1-7]. Аналогичные механизмы используются в дорожных, сельскохозяйственных машинах и т.д. Рядом достоинств обладают роторные грунтометатели [1-6], которые выбрасывают грунт в зону возгорания с помощью лопаток, расположенных на вращающемся роторе. Методы выбора формы, расположения лопаток, анализа движения частиц грунта по ним в настоящее время разработаны не достаточно. Исследования по решению этих задач, направленные на повышение технологические характеристики устройств, имеют актуальный характер.

В работах [3, 8] проведены комплексные исследования по выбору рациональных параметров грунтометателя с прямолинейными лопатками. Перспективным представляется использование в грунтометателях криволинейных лопаток. Методами выбора их формы и анализа движения частиц грунта по ним посвящены работы [1, 2, 5, 6]. В указанных статьях показано, что задача выбора оптимальной формы лопатки может быть схематизирована, как задача определения формы кривой в поле центробежных сил инерции, которая обеспечивает минимальное время движения материальной точки (задача о брахистохроне в поле центробежных сил).

Целью данной статьи являются исследования по сопоставлению параметров схода частиц грунта с прямолинейной и криволинейной лопаткой грунтотомателя, определяющих его технологические показатели. Результаты указанных исследований позволяют осуществить качественное сравнение лопаток по эффективности заполнения их грунтом, усилиям по внедрению в грунт, динамическим нагрузкам на ротор и лопатки, энергозатратам и т.д.

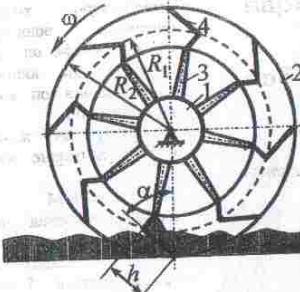


Рис. 1. Схема грунтотомательного механизма

Предполагается, что метатель вращается с угловой скоростью ω против хода часовых стрелок. Плоскость рабочей лопатки отклонена от радиуса на угол α , который отсчитывается в том же направлении. Радиусы R_1 и R_2 представляют собой радиусы окружностей, проходящих соответственно через заднюю и переднюю кромки лопатки; h – длина лопатки. Указанные параметры связаны очевидным соотношением

$$R_1^2 = h^2 + R_2^2 - 2hR_2 \cos\alpha. \quad (1)$$

Варьируя α , по формуле (1) для фиксированных значений h и R_2 , можно, например, определить R_1 .

В работе [3] получено дифференциальное уравнение движения частицы грунта по прямолинейной лопатке (начало отсчета координаты x находится на задней кромке лопатки)

$$\ddot{x} + 2\omega f \dot{x} - \omega^2 x = H_0 + H \sin(\omega t + \psi), \quad (2)$$

Математические модели движения частиц грунта по прямолинейной и криволинейной лопаткам. На рис. 1 показана схема грунтотомателя: 1–стуница; 2–кольцо; 3–спицы; 4–прямолинейная лопатка.

где $H_0 = \omega^2 R_1 (\cos\beta + f \sin\beta)$; $H = \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}$
 $\sin\beta = \frac{R_2}{R_1} \sin\alpha$; $\cos\beta = \sqrt{1-\sin^2\beta}$; $f = \mu g$
 μ – коэффициент трения скольжения; g – ускорение свободного падения.

Его общее решение имеет вид

$$x = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} - \frac{H_0}{\omega^2} + A \sin(\omega t + \varepsilon), \quad (3)$$

$$\text{где } \lambda_1 = \omega \sqrt{1+f^2} - f; \quad \lambda_2 = -\omega \sqrt{1+f^2} + f; \\ A = \frac{H}{2\omega^2 \sqrt{1+f^2}}; \quad \varepsilon = \psi - \pi + \arcsin \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}.$$

Для постоянных интегрирования справедливы выражения

$$C_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(x_0 + \frac{H_0}{\omega^2} - \frac{\dot{x}_0}{\lambda_2} \right) - \frac{A \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left[\sin \varepsilon - \frac{\omega}{\lambda_2} \cos \varepsilon \right], \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \left(x_0 + \frac{H_0}{\omega^2} - \frac{\dot{x}_0}{\lambda_1} \right) - \frac{A \lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \left[\sin \varepsilon - \frac{\omega}{\lambda_1} \cos \varepsilon \right],$$

которые получены в предположении, что при $t = 0$ $x = x_0$,

$$\dot{x} = \dot{x}_0.$$

Время схода τ частицы с лопатки на основании (3) должно определяться из уравнения

$$C_1 e^{\lambda_1 \tau} + C_2 e^{\lambda_2 \tau} - \frac{H_0}{\omega^2} + A \sin(\omega \tau + \varepsilon) = h. \quad (5)$$

После определения τ просто записываются начальные условия движения частицы грунта в воздухе.

Положение лопатки удобно определять углом Ψ , отсчитываемым от наименьшего положения передней кромки лопатки (вертикальная линия на

Теперь, полагая, что угол Ψ в момент схода частицы равен Ψ_0 , имеем при равномерном вращении:

частцы с лопатки равен Ψ_0 , имеем при равномерном вращении:

формула

$$v_{0e} = \omega R_2, \quad (11)$$

проекции которой на указанные выше оси:

$$v_{0ex} = v_{0e} \cos \psi_0; \quad (12)$$

Тогда для проекций абсолютной скорости и ее модуля имеем:

$$v_{0x} = v_{0rx} + v_{0ex}; \quad v_{0y} = v_{0ry} + v_{0ey}; \quad v_0 = \sqrt{v_{0x}^2 + v_{0y}^2}. \quad (13)$$

Угол, образованный вектором скорости \mathbf{V}_0 с горизонтом

$$\alpha_0 = \arcsin \frac{v_{0y}}{v_0}. \quad (14)$$

При проведении сравнительных исследований параметры движения частицы грунта по прямолинейной лопатке сопоставлялись с аналогичными параметрами движения по криволинейной оптимальной лопатке. На рис. 2 штриховыми линиями показаны контуры прямолинейных лопаток для двух значений α . (R_2 и h фиксированы) и сплошными линиями контуры соответствующих криволинейных лопаток. Форма криволинейной лопатки найдена как решение задачи о брахистохроне в поле центробежных сил инерции [1, 2, 6]. Установлено, что решение этой задачи не является единственным. Приемлемое по конструктивным соображениям решение в полярной системе координат (обратная форма) имеет вид

$$\phi(\rho) = \operatorname{arctg} z - \frac{1}{\sqrt{1-C^2}} \operatorname{arctg} \frac{z}{\sqrt{1-C^2}} + C_1, \quad (15)$$

где Φ – полярный угол; $z = \sqrt{\frac{C^2 \rho^2}{\rho^2 - \rho_0^2} - 1}$; ρ – полярный радиус;

$C^2 < 1$ – константа.

Для дальнейшего оказалось целесообразным ввести обозначения:

$$\rho_1 = R_2, \quad \rho_0 = R_1.$$

Углы Φ_1 и α связаны простым соотношением (см. рис. 2)

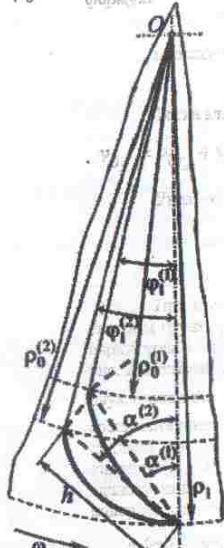


Рис. 2. Сопоставление лопаток

(6)

$$\Psi_0 = \omega \tau, \quad (6)$$

тогда горизонтальная и вертикальная координаты схода частицы

$$s_0 = R_2 \sin \psi_0, \quad (7) \quad h_0 = R_2 (1 - \cos \psi_0). \quad (8)$$

Модуль относительной скорости в момент схода частицы с лопатки на основании формулы (3)

$$v_{0r} = C_1 \lambda_1 e^{\lambda_1 \tau} + C_2 \lambda_2 e^{\lambda_2 \tau} + A \omega \cos(\omega \tau + \varepsilon). \quad (9)$$

Проекции скорости на горизонтальную и вертикальную оси:

$$\varphi_1 = \arcsin\left(\frac{h}{R_1} \sin \alpha\right).$$

Константы C и C_1 в (15) определяются с помощью красных условий:

$$\text{при } \Phi = \Phi_0 \quad \rho = \rho_0, \quad z = z(\rho_0) = z_0 = \sqrt{\frac{C^2 \rho_0^2}{\rho_0^2 - \rho_0^2} - 1} = \infty; \quad (16)$$

$$\text{при } \Phi = \Phi_1 \quad \rho = \rho_1, \quad z = z(\rho_1) = z_1 = \sqrt{\frac{C^2 \rho_1^2}{\rho_1^2 - \rho_0^2} - 1}. \quad (17)$$

Построенное с их помощью трансцендентное уравнение для нахождения C имеет вид

$$\Phi_1 - \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{x \rho_1^2}{\rho_1^2 - \rho_0^2} - 1} + \frac{1}{\sqrt{1-x}} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{\rho_1^2 - \rho_0^2}{\rho_1^2}} \Phi_0 + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-x}}\right) \frac{\pi}{2} = 0, \quad (18)$$

где $x = C^2$.

Константа C_1 определяется из выражения

$$C_1 = \Phi_0 - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-C^2}}\right) \frac{\pi}{2}. \quad (19)$$

Дифференциальное уравнение движения частицы грунта по криволинейной лопатке (15), полученное в работах [4, 5], является нелинейным однородным дифференциальным уравнением второго порядка с переменными коэффициентами относительно полярного угла $\Phi(t)$ и имеет вид

$$\ddot{\Phi} + \left(\frac{ds}{d\Phi} \right)^{-1} \left(\frac{d^2 s}{d\Phi^2} + \left(\frac{ds}{d\Phi} \right)^2 \frac{\rho^2 + 2\rho'^2 - \rho'\rho''}{(\rho^2 + \rho'^2)^2} f \right) \dot{\Phi}^2 + + 2\omega f \dot{\Phi} - \left(\frac{ds}{d\Phi} \right)^{-1} \frac{\omega^2 \rho (\rho' + \rho f)}{\sqrt{\rho^2 + \rho'^2}} = 0, \quad (20)$$

где s – луговая координата, точка отсчета которой находится на задней кромке лопатки; $\rho' = \frac{ds}{d\Phi}, \rho'' = \frac{d\rho'}{d\Phi}$.

Уравнение (20) следует интегрировать с начальными условиями: при $t=0 \quad \Phi=\Phi_0, \dot{\Phi}=\dot{\Phi}_0$.

Построение и интегрирование дифференциального уравнения (20) при проведении расчетов имеет ряд особенностей, обусловленных тем, что аналитическая запись оптимальной траектории (15) получена в полярной системе координат, причем в обратной форме. Аналитически разрешить выражение (15) относительно ρ не удается. Однако современные математические пакеты, в частности MathCAD [9], позволяют достаточно просто обойти указанные трудности, используя идею интерполяции таблично заданных функций. В данной работе расчеты выполнялись с применением кубической сплайна-интерполяции. Важным обстоятельством при этом является то, что полученные таким способом функции в среде MathCAD можно аналитически дифференцировать, как и традиционные функции.

После интегрирования дифференциального уравнения (20) с соответствующими начальными условиями, алгебраическая величина относительной скорости (проекция скорости на касательную) частицы грунта определяется по формуле [4, 5]

$$v_r = \frac{ds}{dt} = \frac{ds}{d\Phi} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{ds}{d\Phi} \dot{\Phi}. \quad (21)$$

Время схода частицы грунта τ находится из очевидного уравнения

$$\Phi(\tau) = \Phi_1. \quad (22)$$

После нахождения τ начальные условия движения частицы грунта в воздухе определяются, как и для прямолинейной лопатки по формулам (6) – (8), (10) – (14).

Результаты расчетных исследований. Сопоставления параметров движения частиц грунта проведены для проектируемого ротора грунтотомателя. Основные параметры прямолинейных и криволинейных лопаток: $h=0,2\text{м}$; $R_1 = \rho_1 = 0,632\text{м}$; $n=222\text{мин}^{-1}$ ($\omega=23,25\text{рад/с}$); $\alpha_0=0^\circ$; $\beta_0=0^\circ$; $\varphi_0=0^\circ$; $\dot{\varphi}_0=0^\circ$.

Угол наклона лопатки β изменялся от 40° до 50° с шагом 5° , коэффициент трения f – от 0,0 до 0,6, коэффициент α_1 – от 0,1 до 1,0 лопаткам

ставились в соответствии с криволинейные лопатки, так как показано на рис. 50° (уголок, видимый для $\alpha^{(1)} = 35^\circ$ и $\alpha^{(2)} = 50^\circ$ (заметим, что для элементов этого рисунка выдержаны все пропорции).

Типичные результаты сопоставления для $f = 0,1$ приведены в таблице; в колонках для времени движения τ , скорости схода v_0 и угла схода α_0 в числителе указаны результаты для прямолинейной лопатки, в знаменателе – для криволинейной.

Таблица

Таблица

Параметры движения частицы грунта по лопатке ($f = 0,1$)

α , град	$R_1 = \rho_0 M$	Φ_1 , град	τ , с	v_0 , м/с	α_0 , град
30	0,47		12,296	0,047/0,043	20,67/20,96
35	0,482		13,768	0,05/0,043	20,787/21,04
40	0,496		15,03	0,053/0,043	20,804/21,07
45	0,511		16,081	0,058/0,045	20,663/20,95
50	0,526		16,926	0,065/0,046	20,38/20,72

Для большей наглядности и удобства анализа результатов расчетов по данным таблицы и аналогичных таблиц с другими значениями f построены поверхности (рис. 3 – 5) $\tau = \tau(\alpha, f)$, $v_0 = v_0(\alpha, f)$, $\alpha_0 = \alpha_0(\alpha, f)$ (использовались средства двумерной сплайновой интерполяции MathCAD).

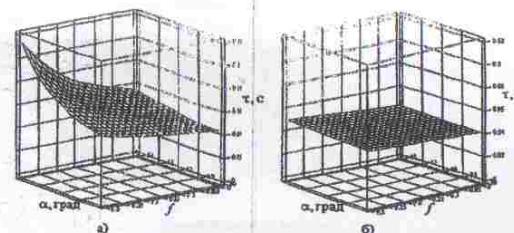


Рис. 3. Время схода частицы грунта в зависимости от α и f : а) – прямолинейная лопатка; б) – криволинейная лопатка ($n=222\text{мин}^{-1}$)

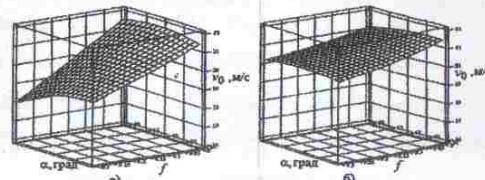


Рис. 4. Скорость схода частицы грунта в зависимости от α и f : а) – прямолинейная лопатка; б) – криволинейная лопатка ($n=222\text{мин}^{-1}$)

Поверхность $\tau = \tau(\alpha, f)$ для криволинейной лопатки близка к плоскости, причем изменение τ при максимальном увеличении α и f невелико – 21%; для прямолинейной лопатки характер поверхности является более сложным, а изменение τ достигает 160%. Обусловлено это тем, что для оптимальной лопатки на начальном этапе движения частицы направление движущей силы близко к направлению движения, т.е. ее вклад в формирование нормальной реакции, а, следовательно, и силы трения минимален [1, 2, 6].

Аналогичные особенности, хотя и выраженные слабее, имеют место для поверхностей $v_0 = v_0(\alpha, f)$ (см. рис. 4). Уменьшение скорости схода частицы грунта при максимальном увеличении α и f для прямолинейной лопатки составляет 17%, для криволинейной – только 6%. Обусловлено это, в частности, тем, что для принятой частоты вращения ротора модуль

переносной скорости частицы почти в два раза превосходит модуль относительной.

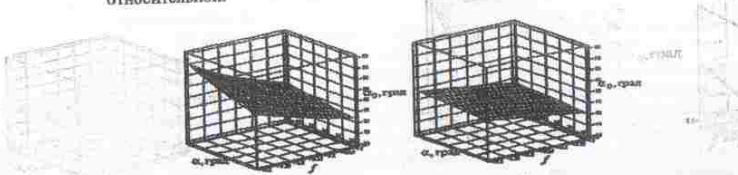


Рис. 5. Угол схода частицы грунта в зависимости от α и f : а) – прямолинейная лопатка; б) – криволинейная лопатка ($\varphi_1 = 22.2\text{deg}^{-1}$)

Существенно возрастает при увеличении α и f угол схода частицы для прямолинейной лопатки (см. рис. 5, а) – 134%; для криволинейной лопатки это возрастание составило лишь 49% (см. рис. 5, б).

Представленные результаты позволяют сделать вывод, что при изменении коэффициента трения, т.е. свойств грунта, параметры схода частиц грунта для криволинейных лопаток изменяются существенно меньше, чем для прямолинейных лопаток.

Аналогичный вывод справедлив и по отношению параметров, характеризующих наклон лопаток.

На следующем этапе расчетных исследований проведено сопоставление параметров схода частицы грунта с прямолинейной и криволинейной лопаткой при изменении частоты вращения ротора (рис. 6, 7).

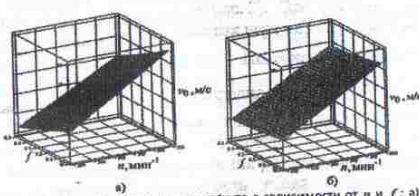


Рис. 6. Скорость схода частицы грунта в зависимости от n и f : а) – прямолинейная лопатка ($\alpha = 33^\circ$); б) – криволинейная лопатка ($\varphi_1 = 16.926^\circ$)

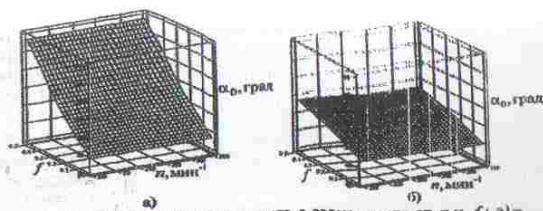


Рис. 7. Угол схода частицы грунта в зависимости от n и f : а) – прямолинейная лопатка ($\alpha = 33^\circ$); б) – криволинейная лопатка ($\varphi_1 = 16.926^\circ$)

Аналогично предыдущему строились поверхности для зависимостей $v_0 = v_0(n, f)$, $\alpha_0 = \alpha_0(n, f)$ для фиксированных оптимальных значений углов α и φ_1 . Частота вращения n изменялась от 200min^{-1} до 300min^{-1} с шагом 25MIN^{-1} , коэффициент трения – f от 0 до 0,5 с шагом 0,1. Для линейной лопатки расчеты проведены для угла $\alpha = 33^\circ$ близкого к 35° . Для криволинейной же лопатки угол φ_1 должен соответствовать углу $\alpha = 50^\circ$, т.е. должен быть равен 16.926° (см. рис. 2). Эти расчеты также показали преимущества криволинейных лопаток перед прямолинейными.

Поверхности $v_0 = v_0(n, f)$ на рис. 6, а, б близки к плоским.

Изменение скорости схода частицы грунта в пределах изменения n и f : для прямолинейной лопатки – 45%, для криволинейной – 35%. Особенностью последней является также то, что при фиксированной частоте вращения ротора даже при значительном увеличении коэффициента трения, скорость схода снижается меньше, чем при тех же условиях для прямолинейной лопатки.

Качественный характер зависимостей $\alpha_0 = \alpha_0(n, f)$ для рассматриваемых лопаток близок. Угол схода частицы грунта с линейной лопатки (рис. 7, а) практически не зависит от частоты вращения ротора (имеет место исключительное увеличение). Для криволинейной лопатки имеет место аналогичный эффект, только теперь с ростом частоты вращения имеет место небольшое уменьшение угла схода (рис. 7, б). Эти расчеты также

подтверждают преимущества криволинейных лопаток перед прямолинейными.

Выводы. 1. Рассмотрены математические модели движения частиц грунта по прямолинейной и криволинейной (оптимальной) лопаткам, учитывающие силы трения. 2. Изложены особенности их использования для определения параметров схода частиц грунта с лопатки. 3. Проведены комплексные исследования по сопоставлению параметров схода частиц грунта с прямолинейной и криволинейной лопаткой. 4. Выявлены следующие качественные достоинства криволинейных лопаток, обусловленные их формой: характером внедрения в грунт, больший объем захватываемого грунта; меньшие усилия по внедрению лопатки в грунт; меньшие динамические нагрузки на лопатки и ротор; меньшая потребная мощность приводного двигателя; сохранение приемлемых технологических качеств при больших коэффициентах трения.

Список использованной литературы:

1. Шатохин В.М. Оптимальные траектории движения точки, перемещающейся под действием центробежной силы инерции / В.М. Шатохин, Н.В. Шатохина // Восточно-Европейский журнал передовых технологий.– Харьков, 2012.–Вып. 4/7 (58).– С. 9-14.
2. Шатохин В.М. Про оптимальну форму лопатки роторного металличника грунту / В.М. Шатохін, О.М. Семків, А.М. Попова // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету.– Мелітополь: ТДАТУ, 2012.– Вип. 4.– Т. 55.– С. 260-269.
3. Попова А.М., Шатохін В.М. Дослідження руху частки ґрунту по лопатці: результати комп'ютерних експериментів / А.М. Попова, В.М. Шатохін // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету.–Мелітополь: ТДАТУ, 2012.– Вип. 4.– Т. 54.– С. 135-144.
4. Семків О.М., Шатохін В.М., Попова А.М. Опис руху частки ґрунту по лопатці із профілем брахістохрони у полі відцентрових сил інерції / О.М. Семків, В.М. Шатохін, А.М. Попова // Геометричне та комп'ютерне моделювання: Збірник наукових праць.–Харків: ХДУХГ.– 2012.– Вип. 30.– С. 190-200.
5. Семків О.М. Исследование движения частицы грунта по лопатке с профилем оптимальной формы в поле центробежных сил инерции / О.М. Семків, В.М. Шатохін, А.Н. Попова // Міжвідомчий науково-технічний збірник "Технічна естетика і дизайн".–К.: КНУБА.– 2012.– Вип. 11.– С. 165-174.
6. Шатохін В.М. Об оптимальной форме лопатки роторного грунтометателя / В.М. Шатохін, О.М. Семків, А.Н. Попова // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.– 2013.– № 2.– С. 49-55.
7. Семків О.М. Розрахунок робочої траєкторії зливного грунтометального механізу / О.М. Семків, В.М. Шатохін // Міжвідомчий науково-технічний збірник "Прикладна геометрія та тектоніка траєкторій". Випуск 87.–К.: КПУБА, 2011.– С. 404-412.
8. Шатохін В.М. Ісследование движения частиц грунта со случайными параметрами, подвергнутыми роторным грунтометателем / В.М. Шатохін, П.Н. Шатохіна, Поніка А.Л // Міжвідомчий науково-технічний збірник "Прикладна геометрія та тектоніка траєкторій". К.: КПУБА, 2012.– Вип. 90.– С. 383-390.
9. Кирьянов Д.В. Mathcad 13 / Д.В. Кирьянов – СПб.: ВХВ-Петербург, 2006.–608 с.

© В.М. Шатохін, О.М. Семків, 2013