

9. Vieth W.R., Porter J.H., Sherwood T.K. Mass Transfer and Chemical Reaction in a Turbulent Boundary Layer. *Ind. Eng. Chem. Fund.* 1963, 2, 1, 1-3.

10. Einenkel, W.D. Sink- und Umwalleistung beim Suspendieren im Ruhrwerk. *Chemie Ingenieur Technik.* 1995. V. 67, No. 8. S. 1000-1003.



УДК 553.937:628.336.4

**В.Г. Игнатенков, М.Б. Тельпук, Е.Л. Лаппо,  
В.В. Шлапаков, Е.А. Иванов**  
**V.G. Ignatenkov, M.B. Telpuk, Ye.L. Lappo,  
V.V. Shlapakov, Ye.A. Ivanov**

## ИНЕРЦИОИД ДЛЯ БЫСТРОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ САПРОПЕЛЯ

### INERTIOID FOR QUICK DEHYDRATION OF SAPROPEL

**Ключевые слова:** сапропель, витаминно-кормовая добавка, обезвоживание, инерциоид, сетка, корзина, влага, угол, нетканый материал.

Одним из направлений развития сельского хозяйства, в частности животноводства, является использование природных минеральных ресурсов в кормопроизводстве. Одним из таких ресурсов является озерный сапропель. Целесообразно применять сапропель в качестве базового компонента витаминно-кормовой добавки (сапропеля и выращенной на нем зеленой массы молодых побегов ячменя) и использовать этот сапропелерастительный продукт в зимний период содержания животных в качестве добавки к основному рациону питания. Основная причина ограниченного применения сапропеля – его высокая влажность, получаемая в процессе добычи, достигающая 97%, в то же время наиболее дорогостоящим процессом обработки сырого сапропеля является его обезвоживание. Определенные границы по влажности при производстве витаминно-кормовой добавки (70-80%) обуславливают необходимость снижения влажности сапропеля перед использованием. Одним из возможных путей снижения влажности, на наш взгляд, является использование инерциоида для быстрого обезвоживания природного сапропеля. Инерциоид состоит из конической корзины в виде усеченного конуса с ребрами жесткости, которые также являются каркасом для крепления нетканого материала, обтянутого сеткой и пропускающего

жидкую фракцию сапропеля при вращении (вода). Твердая составляющая сапропеля под воздействием центробежной силы поднимается вверх и выбрасывается через выгрузное окно.

**Keywords:** sapropel, vitamin feed supplement, dehydration, inertioid, network, drum, moisture, angle, nonwoven fabric.

A trend in agriculture development, particularly in livestock breeding, is the use of natural mineral stuffs in feed production. Lake sapropel is one of such raw materials. It is practical to use sapropel as the basic component of vitaminized feed supplements (sapropel and barley green sprouts grown on it) and feed this sapropel-and-plant product to animals in winter as a feed supplement to the basic diet. One of the limiting factors is high moisture content (up to 97%) of sapropel and a high cost of its dehydration. The existing moisture content limits (70-80%) to produce the vitaminized feed supplements require dehydration of raw sapropel. One of the ways is the use of an inertial installation for quick natural sapropel dehydration. The inertioid consists of a truncated cone-formed drum reinforced with ribs that also serve as a frame to fix the nonwoven fabric covered with a network that lets leaking of the sapropel liquid fraction down (water) when rotated. The solid fraction under the centrifugal force moves up and is thrown out through a discharge window.

**Игнатенков Валерий Геннадьевич**, к.т.н., доцент каф. «Эксплуатация и ремонт МТП», Великолукская государственная сельскохозяйственная академия. E-mail: well\_79@mail.ru

**Тельпук Михаил Борисович**, к.т.н., доцент каф. «Эксплуатация и ремонт МТП», Великолукская государственная сельскохозяйственная академия. E-mail: telpook@vgsa.ru.

**Лаппо Евгений Леонидович**, аспирант, Великолукская государственная сельскохозяйственная академия. E-mail: evgenij\_lappo@yantex.ru.

**Ignatenkov Valeriy Gennadyevich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Machinery and Tractor Fleet Operation and Repair, Velikiye Luki State Agricultural Academy. E-mail: well\_79@mail.ru.

**Telpuk Mikhail Borisovich**, Cand. Tech. Sci., Assoc. Prof., Chair of Machinery and Tractor Fleet Operation and Repair, Velikiye Luki State Agricultural Academy. E-mail: telpook@vgsa.ru.

**Lappo Yevgeniy Leonidovich**, post-graduate student, Velikiye Luki State Agricultural Academy. E-mail: evgenij\_lappo@yandex.ru.

**Шлапаков Виктор Валерьевич**, магистрант, Великолукская государственная сельскохозяйственная академия. E-mail: shlapakov95@bk.ru.

**Иванов Евгений Александрович**, инженер, ООО Научно-производственное предприятие «Новые технологии телекоммуникаций», г. Санкт-Петербург. E-mail: stalker1290@mail.ru.

**Shlapakov Viktor Valeryevich**, master's degree student, Velikiye Luki State Agricultural Academy. E-mail: shlapakov95@bk.ru.

**Ivanov Yevgeniy Aleksandrovich**, Engineer, Research and Development enterprise ООО Nauchno-proizvodstvennoe predpriyatие "Novye tekhnologii telekommunikatsiy", St. Petersburg. E-mail: stalker1290@mail.ru.

### Введение

Одним из направлений развития сельского хозяйства, в частности животноводства, является использование природных минеральных ресурсов в кормопроизводстве. Одним из таких ресурсов является озерный сапропель.

Сапропель – ценный природный ресурс, содержащий богатый спектр минеральных веществ, необходимых для роста и здоровья поголовья. Целесообразно применять сапропель в качестве базового компонента витаминно-кормовой добавки (сапропеля и выращенной на нем зеленой массы молодых побегов ячменя) и использовать этот сапропелерастительный продукт в зимний период содержания животных в качестве добавки к основному рациону питания. В этом случае сапропель обогащается витаминами С и Е, а также вкусовыми свойствами. Витаминно-кормовая добавка на основе сапропеля дает возможность приблизить параметры зимнего содержания животных к летним [7].

Для приготовления сапропелевых кормовых добавок пригодны, прежде всего, сапропели, обогащенные кальцием, карбонатного ( $\text{CaCO}_3$  больше 30% на сухое вещество) или смешанного ( $\text{CaCO}_3$  не менее 12%) типов, где содержание  $\text{SiO}_2$  в золе не превышает 15%, а  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 5% на абсолютно сухое вещество. Кроме того, могут успешно использоваться сапропели с содержанием органического вещества больше 70% на сухое вещество. Предпочтительнее органическое вещество водорослевого биологического состава [3, 4].

Одной из важнейших технологических операций комплекса работ по использованию и переработке сапропеля является извлечение из залежи за счет использования специализированных механизированных средств с помощью напорно-гидравлической системы. Средства для добычи сапропеля располагаются на передвижной плавучей платформе простой конструкции, осуществляющей поворот и разворот платформы без взаимодействия с водной средой. Это дает возможность избежать поломок и остановки рабочего органа при взаимодействии с растительными

остатками озера и абразивными свойствами самого сапропеля [1, 2].

### Материалы и методы исследований

Одной из основных причин ограниченного применения сапропеля является его высокая влажность, получаемая в процессе добычи, достигающая 97%, в то же время наиболее дорогостоящим процессом обработки сырого сапропеля является его обезвоживание. Определенные границы по влажности при производстве витаминно-кормовой добавки (70-80%) обуславливают необходимость снижения влажности сапропеля перед использованием. Одним из возможных путей снижения влажности, на наш взгляд, является использование инерциоида для быстрого обезвоживания природного сапропеля [5, 6].

Инерциоид состоит из конической корзины в виде усеченного конуса с ребрами жесткости, которые также являются каркасом для крепления нетканого фильтра, обтянутого сеткой и пропускающего жидкую фракцию сапропеля при вращении (вода).

### Результаты исследования

При вращении корзины с сапропелем часть центробежной силы, действующей на единицу массы сапропеля  $\omega^2 R \sin \theta$ , приводит к подъему сапропеля со дна корзины к ее верху, а вторая часть  $\omega^2 R \cos \theta$  выдавливает водную часть сапропеля через сетку и нетканый фильтр.

Здесь  $\omega$  – угловая скорость вращения корзины, рад/с;  $R$  – радиус вращения точки на сетке, м;  $\theta$  – угол наклона образующей корзины к вертикальной оси вращения, град.;

Подъему по сетке противодействует сила тяжести  $g \cos \theta$ , где  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  – ускорение силы тяжести.

Основной выход влаги из сапропеля, падающего на дно корзины, осуществляется за время его подъема по сетке со дна вверх до выброса. Это время должно быть не меньше периода вращения корзины. Сапропель, двигаясь вдоль сетки корзины, преодолевает не только напряжение

сдвига, но и возникшее турбулентное и вязкое трение.

Для учета этих факторов смещение сапропеля на элементарное расстояние  $\Delta l$  вдоль сетки  $S_{удел}$  считать течением в элементарно короткой трубе радиусом  $R$ , равным текущему радиусу корзины.

Для течения в трубе справедливо уравнение (1):

$$\rho x^2 y^2 (\Delta v / \Delta y)^2 + \frac{\eta \Delta v}{\Delta y} + \tau_0 = \frac{1}{2} G(R - r), \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность сапропеля, кг/м<sup>3</sup>;

$x = 0,4$  – постоянная Кармане;

$v$  – скорость течения, м/с;

$y = R - r$ ,  $r$  – радиальная координата, отсчитанная от оси вращения, м;

$\eta$  – пластичная вязкость сапропеля, Па·с;

$\tau_0$  – предельное напряжение сдвига, Па;

$G = \Delta P / \Delta l$  градиент давления  $P$  вдоль сетки, Па/м.

Заменим в равенстве (1) все величины на их среднее значение на интервале  $(v, R)$ .

Имеем:

$$\langle y^2 \rangle = \frac{1}{R} \int_0^R y^2 \Delta y = \frac{R^2}{3}; \quad \frac{\Delta v}{\Delta y} = \frac{\omega R}{R} = \omega;$$

$$\langle R - r \rangle = \langle r \rangle = \frac{1}{R} \int_0^R r \Delta r = \frac{R}{2},$$

где  $\omega$  – угловая скорость вращения корзины, рад/с.

Подставим эти средние значения в (1) и получим приближенное равенство:

$$\frac{1}{3} \langle \rho \rangle x^2 \omega^2 R^2 + \eta \omega + \tau_0 = \frac{1}{4} \langle G \rangle R. \quad (2)$$

Разделим равенство (2) на  $\langle \rho \rangle R$  и перепишем его в виде:

$$\frac{\langle G \rangle}{\rho} = f_c = \frac{4}{3} x^2 \omega^2 R^2 + \frac{4}{\langle \rho \rangle R} (\eta \omega + \tau_0), \quad (3)$$

где  $f_c$  – сила сопротивления сапропеля его перемещению, действующая на единицу массы, Н/кг.

Уравнение движения сапропеля со дна периферии конической корзины под действием центробежной силы, силы тяжести и сил сопротивления сапропеля имеет следующий вид:

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \omega^2 R \sin \theta - g \cos \theta - \frac{4}{3} x^2 \omega^2 R - 4(\eta \omega + \tau_0) / \langle \rho \rangle R, \quad (4)$$

где  $v$  – скорость движения вдоль образующих корзины, м/с;

$t$  – текущее время, с.

Первую часть равенства (4) запишем в виде:

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\Delta v}{\Delta l} \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{\Delta v}{\Delta l} v = \frac{\Delta}{\Delta l} \left( \frac{v^2}{2} \right), \quad (5)$$

где  $l$  – текущая длина образующей, отсчитанная от дна.

Подставим (5) в (4) и полученное равенство, умножим на  $\Delta l$ .

Получим:

$$\Delta \left( \frac{v^2}{2} \right) = \omega^2 R \left( \sin \theta - \frac{4}{3} x^2 \right) \Delta l - g \cos \theta \Delta l - 4(\eta \omega + \tau_0) \Delta l / \langle \rho \rangle R. \quad (6)$$

Текущий радиус конической корзины  $R$  связан с текущей длиной образующей формулой:

$$R = R_0 + l \sin \theta, \quad (7)$$

где  $R_0$  – радиус дна корзины.

Перейдем в (6) от переменной  $l$  к переменной  $R$ .

Из (7) следует:

$$\Delta l = \frac{\Delta R}{\sin \theta}, \quad (8)$$

Подставим (8) в (6).

Имеем:

$$\Delta \left( \frac{v^2}{2} \right) = \omega^2 R \left( \sin \theta - \frac{4}{3} x^2 \right) \frac{\Delta R}{\sin \theta} - g \cos \theta \frac{\Delta R}{\sin \theta} - \frac{4(\eta \omega + \tau_0)}{\langle \rho \rangle} \frac{\Delta R}{R \sin \theta}, \quad (9)$$

Проинтегрируем (9) при начальном условии и  $(R_0)=0$  по интервалу  $(R_0, R)$ .

Получим:

$$\frac{v^2}{2} = \omega^2 \sin \theta - x^2 \frac{R^2 - R_0^2}{2 \sin \theta} - g \cos \theta \frac{R - R_0}{\sin \theta} - \frac{4(\eta \omega + \tau_0)}{\langle \rho \rangle \sin \theta} \ln \frac{R}{R_0}. \quad (10)$$

Используя (7), вернемся в (10) к прежней переменной  $l$ .

Заметим, что:

$$R^2 - R_0^2 = (R - R_0)(R + R_0) = l(2R_0 + l \sin \theta) \sin \theta. \quad (11)$$

Логарифмическая функция принимает вид:

$$\ln \frac{R}{R_0} = \ln \left( 1 + \frac{l \sin \theta}{R_0} \right).$$

Поскольку  $\frac{l \sin \theta}{R_0} \leq 0,2$ , разложим логарифмическую функцию в степенной ряд и ограничимся линейным и квадратичными членами.

Тогда:

$$\ln \left( 1 + \frac{l \sin \theta}{R_0} \right) = \frac{l \sin \theta}{R_0} - \frac{l^2 \sin^2 \theta}{2R_0^2}. \quad (12)$$

Подставим (7), (11) и (12) в (10).

Следовательно:

$$v^2 = \omega^2 (\sin \theta - x^2) l (2R_0 + l \sin \theta) - g \cos \theta l - 8 \frac{(\eta \omega + \tau_0)}{\langle \rho \rangle R_0} l + 4 \frac{(\eta \omega + \tau_0)}{\langle \rho \rangle R_0^2} \sin \theta l^2. \quad (13)$$

Соберем в (13) квадратичные и линейные по  $l$  члены.

Получим:

$$v^2 = a l^2 + b l; \quad (14)$$

$$a = \omega^2 \left( \sin \theta - \frac{4}{3} x^2 \right) \sin \theta + 4 \frac{(\eta\omega + \tau_0)}{(\rho)R_0^2} \sin \theta; \quad (15)$$

$$b = 2(\omega^2 \left( \sin \theta - \frac{4}{3} x^2 \right) R_0 - 2g \cos \theta - 8 \frac{(\eta\omega + \tau_0)}{(\rho)R_0}). \quad (16)$$

Из (14) следует:

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t} = (al^2 + bl)^{1/2}.$$

Разделим переменные:

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{(al^2 + bl)^{1/2}}. \quad (17)$$

Проинтегрируем (17) по интервалу (0, L) изменения образующей конической корзины, где L – длина образующей.

Получим:

$$t = \int_0^L \frac{\Delta l}{(al^2 + bl)^{1/2}} = \frac{1}{a^{1/2}} \ln 2 \left( \frac{a^2 l^2}{b^2} + \frac{al}{b} \right)^{1/2} + 2 \frac{al}{b} + 1.$$

Оценим время подъема сапропеля в корзине при  $\omega = \frac{\pi n}{30} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 30 \text{ рад/с}$ .

$$\theta = 30^\circ, \quad x = 0,4, \quad \eta = 0,016 \text{ Пас}, \\ \tau_0 = 7 \text{ Па}, \quad \rho = 1075 \frac{\text{К}}{\text{м}^2}, R_0 = 0,11 \text{ м}, \\ L = 0,077 \text{ м}.$$

Согласно (15) и (16):

$$a = 3536,1 \text{ с}^{-2}, b = 1538,5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}.$$

Подставим эти значения.

Находим  $t = 0,01367 \text{ с}$ .

Период вращения корзины:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{50\pi} = 0,04 \text{ с}.$$

Время подъема сапропеля почти на четверть меньше периода вращения, что не способствует значительному выходу влаги из сапропеля. Для увеличения выхода следует либо уменьшить скорость вращения корзины, либо увеличить крутизну стенки корзины. Делать первое нежелательно, поскольку это может привести к налипанию сапропеля на сетке. Поэтому оценим угол отклонения образующей от оси корзины, который обеспечит время подъема сапропеля, равное нескольким периодам вращения.

Видно, что наибольшее время будет при  $a = v$ .

Подстановка  $a = 0$  приводит к неопределенности:

$$t = \frac{0}{0}.$$

От неопределенности избавимся, если согласно правилу Лопиталя заменим числитель и знаменатель производными по  $a$  и тогда подставим  $a = 0$ .

Получим:

$$t_{\pi} = \lim_{a \rightarrow 0} t = 2 \left( \frac{L}{b} \right)^{1/2}. \quad (18)$$

Из (15) при  $a = 0$  и  $\sin \theta \neq 0$  следует:

$$8 \frac{(\eta\omega + \tau_0)}{(\rho)R_0} = 2\omega^2 \left( \sin \theta - \frac{4}{3} x^2 \right) R_0. \quad (19)$$

Подставим (19) в (16).

Тогда:

$$b = 4\omega^2 \left( \sin \theta - \frac{4}{3} x^2 \right) R_0 - 2g \cos \theta. \quad (20)$$

Из (18) видно, что при  $b \leq 0$  подъем сапропеля и его выброс прекращаются. Основное влияние на эффективность работы предлагаемого инерциоида согласно уравнению (20) оказывает угол наклона образующей корзины к вертикальной оси вращения  $\theta=30^\circ$  и частота вращения корзины.

### Выводы

Проведенные выше теоретические исследования, подтвержденные экспериментом, показали, что инерциоид для обезвоживания сапропеля достаточно эффективен и его целесообразно использовать в технологических линиях производства сапропелевых кормовых добавок для обеспечения поточности и получения конечного кормового продукта высокого качества.

### Библиографический список

1. Игнатенков В.Г., Морозов В.В., Карасев Ю.А., Тельпук М.Б. Рулевое устройство для платформ малой и средней величины, используемых для разработки и добычи сапропеля // Известия Великолукской ГСХА. – 2015. – № 4. – 3 с.
2. Игнатенков Г.И., Игнатенков В.Г., Иванов Е.А. Рулевое устройство для судов малой и средней величины. Патент на полезную модель. №2014153146/11, от 25.12.2014. – 7 с.
3. Морозов В.В. Технология и комплекс машин для послойной разработки сапропеля на удобрения (для условий Северо-Западной зоны РФ): дис. ... докт. техн. наук. – В. Луки, 1995. – 347 с.
4. Морозов В.В., Игнатенков В.Г. Технология получения и использования витаминно-кормовой добавки на основе сапропеля // XXIII Российская школа по проблемам науки и технологий. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 4 с.

5. Морозов В.В., Милохин В.К. Механическое обезвоживание сапропеля // Информ. листок ЦНТИ. – Псков, 1993. – № 214-93. – 2 с.

6. Быченков Д.М., Игнатенков В.Г., Лаппо Е.Л., Морозов В.В. Способ обезвоживания сапропеля с использованием пульпосгустителей // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2017. – № 4. – 4 с.

7. Антипов С.О. Совершенствование технологических процессов использования сапропеля на кормовые добавки путем обоснования послонной разработки залежи и конструктивных параметров смесителя: дис. ... канд. техн. наук. – В. Луки, 1999. – 176 с.

### References

1. Ignatenkov V.G., Morozov V.V., Karasev Yu.A., Telpuk M.B. Rulevoe ustroystvo dlya platform maloy i sredney velichiny, ispolzuemykh dlya razrabotki i dobychi sapropelya // Izvestiya Velikolukskoy GSKhA. – 2015. – No. 4.

2. Ignatenkov G.I., Ignatenkov V.G., Ivanov Ye.A. Rulevoe ustroystvo dlya sudov maloy i sredney velichiny. Patent na poleznuyu model. No. 2014153146/11 ot 25.12.2014. – 7 s.

3. Morozov V.V. Tekhnologiya i kompleks mashin dlya posloynoy razrabotki sapropelya na udobreniya (dlya usloviy Severo-Zapadnoy zony RF): dis. ... dokt. tekhn. nauk. – V. Luki, 1995. – 347 s.

4. Morozov V.V., Ignatenkov V.G. Tekhnologiya polucheniya i ispolzovaniya vitaminno-kormovoy dobavki na osnove sapropelya // XXIII Rossiyskaya shkola po problemam nauki i tekhnologiy. – Yekaterinburg: UrO RAN, 2003.

5. Morozov V.V., Milokhin V.K. Mekhanicheskoe obezvozhivanie sapropelya // Inform. listok TsNTI. – No. 214-93. – Pskov, 1993.

6. Bychenkov D.M., Ignatenkov V.G., Lap-po Ye.L., Morozov V.V. Sposob obezvozhivaniya sapropelya s ispolzovaniem pulposgustiteley // Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2017. – No. 4. – S. 148.

7. Antipov S.O. Sovershenstvovanie tekhnologicheskikh protsessov ispolzovaniya sapropelya na kormovye dobavki putem obosnovaniya posloynoy razrabotki zalezhi i konstruktivnykh parametrov smesitelya: dis. ... kand. tekhn. nauk. – V. Luki, 1999. – 176 s.

