

На основании анализа полученных экспериментальных данных автор дал следующую оценку работы косо направленных ( $\beta = 60^\circ$ ) донных циркуляционных порогов:

1) с уменьшением угла установки порога  $\beta$  от  $75$  до  $60^\circ$  растет интенсивность защитных винтовых течений вдоль верховой грани порога в его центральной части. Точка раздела течений находится в начальной части преграды;

2) защитные функции винтовых течений вдоль низовой грани порога при рассматриваемом расположении преграды резко снижаются: для угла  $\beta = 60^\circ$  точка раздела течений всегда находится в концевой части порога, что свидетельствует о возможности завлечения в отвод всей массы взвешенных и донных наносов, преодолевших преграду.

УДК 631.17: 631.4

*А.Ю. Исаев, канд. техн. наук*

Азербайджанский государственный аграрный университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ МАШИН НА ПОЧВУ

Рациональное использование, сохранение и воспроизводство плодородия сельскохозяйственных угодий являются основными условиями стабильного развития аграрного сектора. Проблема сохранения почвенного плодородия все еще является предметом дискуссии о рациональных технологиях ее обработки. Создание комбинированных агрегатов нельзя считать последним шагом использования всего научного потенциала с позиции искоренения вредных воздействий рабочих органов и движителей мобильных энергетических средств на почву. Для оценки некоторых предпосылок, служащих идеям технологического и технического совершенствования в данной области, требуется некоторый детальный анализ задач уплотнения почвы при выполнении механизированных работ. Для исследования вопроса воздействия движителей машин на почву следует рассмотреть задачу закономерности ее деформирования.

Известно, что почва, являясь деформируемой средой, обладает реологическими свойствами. Для получения некоторых видов реологических уравнений почв надо найти аналитические зависимости между напряжениями  $\alpha$  и относительными деформациями сжатия  $\epsilon$ , возникающими в почвах при длительных статических нагрузках, т. е. зависимости  $\alpha = \alpha(\epsilon)$  без учета времени  $t$ , а также связи  $\alpha - \epsilon$  при  $t = \text{const}$ . Необходимость в выявлении таких зависимостей обусловлена тем, что уравнения  $\alpha = \alpha(\epsilon, t)$  могут быть в ряде случа-

## Список литературы

1. Об утверждении Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года: распоряжение Правительства РФ от 27.08. 2009 № 1235-р: (ред. от 17.04.2012) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/902173350>
2. Румянцев И.С., Кловский А.В. Научный обзор изученности вопросов проектирования и безопасной эксплуатации бесплотинных водозаборных гидроузлов // Международный технико-экономический журнал. — 2014. — № 2. — С. 101–106.
3. Кловский А.В. Результаты исследований гидравлических условий работы фронтальных донных циркуляционных порогов // Международный научный журнал. — 2014. — № 3. — С. 77–83.
4. Румянцев И.С., Кловский А.В. Результаты исследований скоростного режима защитных винтовых течений в створе фронтальных донных порогов // Приволжский научный журнал. — 2014. — № 2. — С. 96–100.

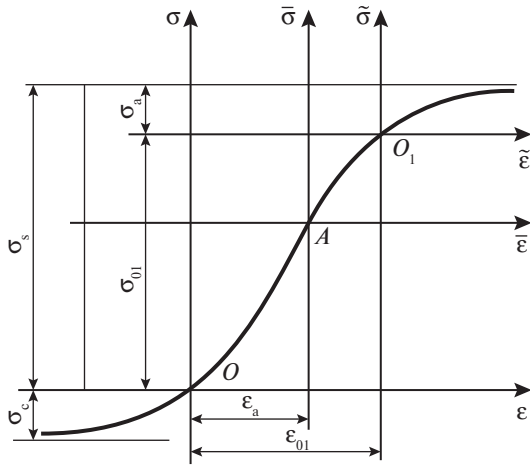
ев получены, если известны  $\alpha = \alpha(\epsilon)$  и некоторые функции времени.

При вдавливании штампов и воздействии движителей на почву возникают деформации сжатия и сдвига. При деформации рыхлых почв под действием вертикальной нагрузки преобладают деформации сжатия. При деформации же плотных почв при действии вертикальной нагрузки наряду с уплотнением возникают и значительные деформации сдвига. Кривые зависимости этих величин, построенных на основе данных эксперимента, представляют собой функцию гиперболического тангенса  $\text{th}$  и выражается следующим образом:

$$\sigma = \sigma_0 \text{th} \frac{k}{\sigma_0} h, \quad (1)$$

где  $\sigma_0$  — предел несущей способности почвы;  $k$  — коэффициент ее объемного смятия.

Однако нельзя исключать из рассмотрения деформацию рыхлых почв. Экспериментальные зависимости  $\alpha \sim h$  для таких случаев получены по результатам сжатия образцов почвы и по ее деформации катящимся колесом в полевых условиях [1, 2]. Общая зависимость между сжимающими напряжениями и осадкой грунта графически изображена на рисунке. При построении принято, что  $\epsilon$  имеет как положительные (сжимающая нагрузка), так и отрицательные (растягивающая нагрузка) значения. Кривая имеет точку перегиба  $\Phi(\epsilon_a, \alpha_a)$ , которая представляет центр симметрии. При  $\epsilon < \epsilon_a$  кривая



**Зависимость между напряжениями  $\alpha$  в почве и ее относительными деформациями сжатия  $\epsilon$**

вогнутая, при  $\epsilon < \epsilon_a$  — выпуклая. При положительных  $\alpha$  вогнутый участок соответствует преобладанию уплотнения, а выпуклый — возрастанию доли сдвигов частиц почвы (по мере роста  $\alpha$ ) в ее общей деформации. У кривой  $\alpha - \epsilon$  две горизонтальные асимптоты, уравнения которых имеют вид  $\alpha = \alpha_s$  и  $\alpha = \alpha_c$  ( $\alpha_c > \alpha_s > 0$ ). Величина  $\alpha_s$  — предел несущей способности почвы,  $\alpha_c$  — напряжение, характеризующее начальное уплотнение.

Найдем уравнение кривой  $\alpha \sim \epsilon$  общего вида, используя для ее аппроксимации функцию гиперболический тангенс (th). Пусть почва уплотнена (при изменении  $\alpha$  от нуля до  $\alpha_{01}$  (до деформации  $\epsilon_{01}$ ,  $\alpha_{01}$  — координаты в системе  $\epsilon O \alpha$  произвольной точки  $O_1$ , расположенной на выпуклом участке кривой). Введем вспомогательную систему координат  $\tilde{\epsilon} O \tilde{\alpha}$  и будем искать уравнение участка кривой, соответствующего  $\tilde{\epsilon} \geq 0$ , в виде

$$\tilde{\alpha} = B \operatorname{th} C \tilde{\epsilon}. \quad (2)$$

Установим физический смысл параметров  $B$  и  $C$ . При  $\tilde{\epsilon} \rightarrow \infty \tilde{\alpha} \rightarrow B$ . В то же время при  $\tilde{\epsilon} \rightarrow \infty \tilde{\alpha} \rightarrow \sigma_0$  ( $\sigma_0 = \sigma_s = \sigma_{01}$ ) — предел несущей способности почвы, предварительно уплотненной от  $\epsilon = 0$  до  $\epsilon = \epsilon_{01}$ ). Следовательно,  $B = \alpha_0$ . Величина

$E = \frac{d\sigma}{d\epsilon}$  называется модулем деформации почвы.

Тогда модуль  $E$  в начале координат  $O_1$

$$E_{01} = \frac{d\tilde{\alpha}}{d\tilde{\epsilon}} / \tilde{\epsilon} = 0 = \frac{BC}{Dh^2 C \tilde{\epsilon}} / \tilde{\epsilon} = 0 = BC. \quad (3)$$

Поэтому  $C = \frac{E_{01}}{\sigma_0}$ . Подставляя значения  $B$  и  $C$

в (2), получим

$$\tilde{\alpha} = \sigma_0 \operatorname{th} \frac{E_{01}}{\sigma_0} \tilde{\epsilon}. \quad (4)$$

Если перейти от относительной осадки почвы к абсолютной  $h = \tilde{\epsilon} H$  ( $H$  — высота деформируемо-

го слоя) и обозначить  $E_{01}/H$  через  $k$ , получим в координатах  $\tilde{h} - \tilde{\alpha}$  уравнение, соответствующее (1).

Пусть начало вспомогательной системы координат с осями  $A\tilde{\epsilon}$  и  $A\tilde{\alpha}$  параллельными  $O\epsilon$  и  $O\alpha$ , совпадает с точкой перегиба  $A$ . Из предыдущего следует, что выпуклый участок кривой в системе координат  $\tilde{\epsilon} A \tilde{\alpha}$  может быть описан уравнением

$$\tilde{\alpha} = \sigma_{sa} \operatorname{th} \frac{E_a}{\sigma_{sa}} \tilde{\epsilon}, \quad (5)$$

где  $E_a$  — модуль деформации почвы в точке перегиба кривой;

$$\sigma_{sa} = \sigma_s - \sigma_a, \quad (6)$$

Для получения уравнения кривой  $\alpha \sim \epsilon$  общего вида в системе  $\epsilon O \alpha$  воспользуемся формулами преобразования координат при параллельном переносе осей:

$$\tilde{\alpha} = \alpha - \sigma_a; \quad (7)$$

$$\tilde{\epsilon} = \epsilon - \epsilon_a. \quad (8)$$

В соответствии с формулами (7),(8) преобразуем (5). В результате

$$\alpha = \sigma_{sa} \operatorname{th} \frac{E_a}{\sigma_{sa}} (\epsilon - \epsilon_a) + \sigma_a. \quad (9)$$

Так как при  $\tilde{\alpha} = -\sigma_a$  осадка  $\epsilon = -\epsilon_a$ , то из формулы (5) следует

$$\sigma_a = \sigma_{sa} \operatorname{th} \frac{E_a}{\sigma_{sa}} \epsilon_a. \quad (10)$$

Подставив формулу (10) в (9), придем к уравнению

$$\alpha = \sigma_{sa} \left[ \operatorname{th} \frac{E_a}{\sigma_{sa}} (\epsilon - \epsilon_a) + \operatorname{th} \frac{E_a}{\sigma_{sa}} \epsilon_a \right]. \quad (11)$$

Уравнение (11) описывает кривую  $\alpha \sim \epsilon$  общего вида при расположении начала системы координат в любой точке этой кривой. В точке  $A$  функция  $E = E(\epsilon)$  имеет максимум ( $E_a$  — максимальный модуль деформации почвы). Напряжение  $\alpha_a$  определяет предел фазы уплотнения почвы, поэтому  $E_a$  можно назвать предельной относительной деформацией этой фазы. Величина  $\alpha_{sa}$  выражается через предел несущей способности почвы  $\alpha_s$  и напряжение  $\alpha_c$ , характеризующее ее начальное уплотнение, по формуле

$$\sigma_{sa} = \frac{\sigma_c - \sigma_s}{2}. \quad (12)$$

Из соотношений (6) и (12) следует, что

$$\sigma_a = \frac{\sigma_s - \sigma_c}{2}. \quad (13)$$

При известных значениях  $\alpha_a$ ,  $\alpha_{sa}$  и  $\epsilon_a = 0$  модуль

$$E_a = \frac{\sigma_{sa}}{\epsilon_a} \operatorname{ar} \operatorname{th} \frac{\sigma_a}{\sigma_{sa}}. \quad (14)$$

Характеристики почвы  $\epsilon_a$  и  $\alpha_{sa}$  определяют форму кривой  $\alpha \sim \epsilon$  общего вида. Величина  $\epsilon_a$  указывает на расположение точки перегиба каждой конкретной кривой по отношению к началу нагружения почвы. Решив уравнение (9) относительно  $E$  и воспользовавшись выражением  $\epsilon_a$  из (14), получим

$$\epsilon = \frac{\sigma_{sa}}{\epsilon_a} \left( \operatorname{ar th} \frac{\sigma - \sigma_a}{\sigma_{sa}} + \operatorname{ar th} \frac{\sigma_a}{\sigma_{sa}} \right). \quad (15)$$

Преобразуем уравнение (15), используя выражение

$$\operatorname{ar th} x = \frac{1}{2} \ln \frac{1+x}{1-x} \quad (x^2 < 1). \quad (16)$$

и соотношения (12) и (13).

Тогда

$$\epsilon = \frac{1}{F} \ln \frac{\sigma_c - \sigma \sigma_s}{\sigma_s - \sigma \sigma_c}, \quad (17)$$

где  $F = \frac{2}{E_a}$  — относительный коэффициент жесткости грунта.

Уравнение (17) совпадает с формулой, полученной на основе уточнения теории деформируемости грунта [3]. При выводе уравнений связи между на-

грузкой и деформацией принимают, что приращение силы пропорционально увеличению числа точек контакта частиц грунта, причем при сжатии их число увеличивается, а при сдвиге — уменьшается.

Решив уравнение (17) относительно  $\alpha$ , получим

$$\sigma = \frac{\sigma_s \sigma_c [\exp(F\epsilon) - 1]}{\sigma_s + \sigma_c \exp(F\epsilon)}. \quad (18)$$

Итак, уравнения (11) и (18) описывают одну и ту же кривую. Им соответствуют разрешенные относительно  $\epsilon$  эквивалентные уравнения (15) и (17). Описание уравнением (11) закономерности деформирования почвы более удобно для практического применения, чем уравнение (18).

Результаты исследования могут быть использованы при разработке расчетных способов определения характеристик взаимодействия машин и почвы.

#### Список литературы

1. Абуханов А.З. Механика грунта. — М.: Феникс, 2006. — 352 с.
2. Кезди А. Руководство по механике грунтов. — Будапешт: Изд-во Академии наук Венгрии, 1974. — С. 294.
3. Хан Х. Теория упругости. Основы линейной теории упругости и ее применения. — М.: Мир, 1988. — 344 с.

УДК 502/504:626/627:626.26

*Жан Клод Мвуйекуре*

Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева

## РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА ИССЛЕДОВАНИЙ ТРУБЧАТЫХ СООРУЖЕНИЙ С ГАСИТЕЛЯМИ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

**В** практике современного гидротехнического строительства для крепления нижнего бьефа и обеспечения безопасного и надежного в эксплуатационном отношении отвода сбрасываемого потока в канал или в русло реки используются различные гасители энергии. Наиболее распространенными из них являются:

- водобойный колодец, образованный уступом за счет углубления дна флютбета;
- водобойный колодец, созданный водобойной стенкой;
- комбинированный водобойный колодец;
- водобойная плита, оборудованная гасителями, зубчатыми и прорезными порогами, растекателями;
- гасители ударного действия [1–5].

Применение гасителей ударного действия является одним из наиболее эффективных и надежных методов в борьбе с образованием местных размывов грунта за сооружениями в тех случаях, когда в нижнем бьефе имеет место дефицит глубин для

обеспечения гашения избыточной энергии. Подобные устройства нижнего бьефа еще недостаточно изучены, их конструкции продолжают совершенствоваться [5]. Они получили широкое распространение на гидроузлах США и Канады. Конструкция такого крепления с системой гасителей ударного действия была разработана в свое время Бюро мелиорации США. При создании этой конструкции был обобщен большой экспериментальный и натурный материал. В Московском гидромелиоративном институте (МГМИ) гасители ударного действия впервые были изучены в 1990 г. Е.Ф. Петровым под руководством И.С. Румянцева [3]. На основании результатов своих комплексных модельных лабораторных гидравлических исследований они создали новую рациональную конструкцию концевой гасителя ударного действия для трубчатых водопропускных сооружений, а также разработали методику ее расчетного обоснования и проектирования. Проведенные ими исследования позволили оптимизировать размеры этой конструкции [3]. Исследования Е.Ф. Петро-