

Таким образом, выбор метода очистки воды является не столько техническим решением, а в большей степени технико-экономическим обоснованием.

#### Список литературы

1. Методические рекомендации по обеспечению выполнения требования санитарных правил и норм СанПиН 2.1.4.559–96 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем

питьевого водоснабжения. Контроль качества» на водопроводных станциях при очистке природных вод. — М.: ГУП «ВИМИ», 2000. — 92 с.

2. Любман, Н.Я. Полимерные и ионообразующие фильтрующие элементы / Н.Я. Любман, Г.К. Имангазиева, А.И. Усков // Цветные металлы. — 1986. — № 6. — С. 42–46.

3. Рябчиков, Б.Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования / Б.Е. Рябчиков. — М.: ДеЛи принт, 2004. — 328 с.

УДК 631.312

*С.И. Старовойтов, канд. техн. наук*

*В.Н. Блохин*

*Н.Н. Чемисов*

Брянская государственная сельскохозяйственная академия

*Е.С. Старовойтова*

Российский университет дружбы народов

## К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЯГОВОГО УСИЛИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ДЕФОРМАТОРА НА ОСНОВЕ МКЭ

В выражениях В.П. Горячкина, Н.В. Щучкина, Г.Н. Синеокова, В.В. Кацыгина [1] выходным значением является тяговое усилие, геометрические параметры представлены размерами поперечного сечения пласта, динамичность воздействия отражена квадратом скорости или скоростью распространения напряжений, деформационность почвы учтена коэффициентом деформации, почва как объект обработки выражена через угол внешнего трения, показатели плотности и твердости.

Существуют также теоретические модели, описывающие взаимодействие рабочего органа с почвой, где выходным параметром является размер тела скольжения, работа сил резания, напряженно-деформированное состояние обрабатываемого пласта [2–5].

Перспективным методом расчета напряженно-деформированного состояния почвенного пласта является метод конечных элементов [6]. Реализацией данного метода может быть или определение силы тяги, или процент содержания частиц определенного размера. При динамическом нагружении [2] почву можно считать условно упругой средой. И данное обстоятельство позволяет представлять объект обработки модулем упругости первого рода  $E$  и коэффициентом Пуассона  $\mu$ .

Модуль упругости первого рода при динамическом нагружении малой интенсивности цилиндрического почвенного образца среднесуглинистой почвы ненарушенной структуры определялся на основании методики А.С. Кушнарёва [5]:

$$E = -47\,998,895\omega^2 + 1\,520\,917,783\omega - 7\,734\,389,949, \quad (1)$$

где  $\omega$  — значение абсолютной влажности почвы.

Для определения коэффициента Пуассона  $\mu$  использовался специально разработанный стенд и созданная компьютерная программа.

Стенд состоит из силовой и измерительной частей. В силовую часть входят механизмы нагружения и контроля нагрузки, поршень, опирающийся на роликовые опоры. Наличие роликовых опор, которые скользят по направляющим, позволяют поршню оказывать воздействие на пласт в вертикальной плоскости. Измерительная часть представлена оптическими датчиками, размещенными на панели. В качестве оптических датчиков используются компьютерные мыши с высокой степенью разрешения, которые фиксируют перемещения ряда узловых точек. В свою очередь панель крепится к подвижной боковине, которая шарнирно связана с корпусом силовой части.

Программа состоит из нескольких файлов. Первый файл — драйвер, который размещен поверх стандартного драйвера устройства и служит непосредственно перехватчиком и разделителем всех манипуляторов. Второй файл — программа, которая обрабатывает данные о перемещении точек и их записывает. Принцип действия компьютерной программы основан на перехвате данных о движении точек напрямую с драйвера устройства. Это позволяет получить максимально точные показания, независимые от разрешения экрана и те-

кущих настроек манипулятора в системе. В общей сложности в программе Excel могут записываться данные от 32 датчиков. В результате экспериментальных исследований было установлено, что коэффициент Пуассона для среднесуглинистой почвы составляет 0,34.

Основываясь на законах сопротивления материалов, метод конечных элементов, как частный случай, включает уравнения равновесия, геометрические и физические уравнения элементарных составляющих [7], которые связаны между собой узловыми точками и формируют пласт (рис. 1), находящийся в условиях деблокированного резания.

Перемещения всех узловых точек определяется с помощью уравнения

$$AB^{-1}A^T\bar{Z} = \bar{P}, \quad (2)$$

где  $AB^{-1}A^T$  — матрица жесткости для пласта в целом;  $\bar{Z}$  — вектор-столбец перемещений узловых точек;  $\bar{P}$  — вектор-столбец нагрузки.

Для заполнения глобальной матрицы  $A$  необходимо иметь нумерацию узловых точек со схемой исследуемого пласта и элементарный фрагмент с местной нумерацией, значение матрицы  $a$ , которая связывает все силы с независимыми.

Матрица  $B^{-1}$  в силу своей симметричности имеет вид

$$B^{-1} = \frac{E\delta}{12(1-\mu^2)} \begin{bmatrix} b_1^{-1} & \dots & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dots & \dots & b_n^{-1} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где  $\delta$  — толщина деформируемого пласта;  $b$  — матрица, связывающая независимые силы с перемещениями.

Вектор-столбец нагрузки  $\bar{P}$  представлен в таблице.

В таблице перемещения по горизонтали обозначены символом  $u$ , перемещения по вертикали —  $v$ . Ко всем узловым точкам по вертикали приложена сила тяжести элементарного фрагмента  $G$ . А к первой и третьей узловой точке по горизонта-

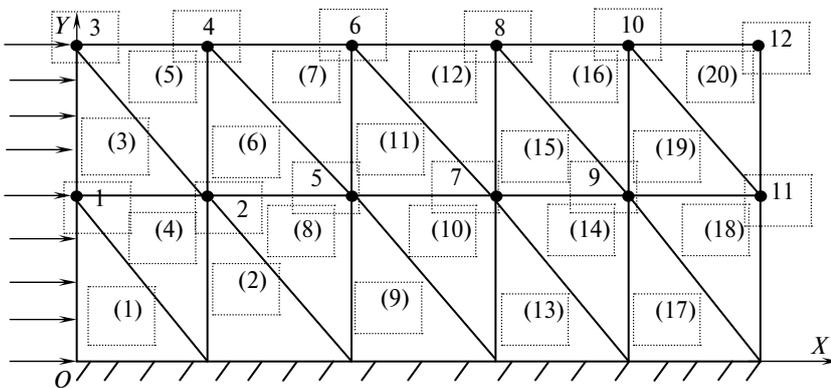


Рис. 1. Почвенный элемент в виде набора треугольников

Перемещения узловых точек и составляющие нагрузки

№ узловой точки	Перемещения	Составляющие нагрузки
1	$u_1$ $v_1$	$qb + J_{ин}$ $G$
2	$u_2$ $v_2$	0 $G$
3	$u_3$ $v_3$	$qb + J_{ин}$ $G$
...	$u_i$ $v_i$	0 $G$
12	$u_{12}$ $v_{12}$	0 $G$

ли —  $qb + J_{ин}$ . Линейная нагрузка  $q$  имеет размерность Н/м. Сила инерции

$$J_{ин} = \frac{2Vv\sqrt{E\rho}}{\pi l}, \quad (4)$$

где  $V$  — объем элементарного фрагмента;  $v$  — скорость движения деформатора;  $\rho$  — плотность почвы;  $l$  — длина тела скольжения.

Формула для вычисления напряжений в каждом элементарном фрагменте через независимые реакции имеет вид

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \\ \sigma_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{\delta b} \\ \frac{2}{a\delta} \\ \frac{2}{a\delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{u2} \\ r_{u3} \\ r_{v3} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где  $a, b$  — геометрические размеры составляющего пласт фрагмента.

Потенциальная энергия фрагмента почвы при плоском напряженном состоянии

$$u = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - 2\mu\sigma_1\sigma_3}{2E}, \quad (6)$$

где  $\sigma_1, \sigma_3$  — главные напряжения.

Тяговое усилие на основе МКЭ при движении вертикального деформатора определяется при условии

$$u \leq [u], \quad (7)$$

где  $[u]$  — удельная потенциальная энергия крошения почвы.

В свою очередь

$$[u] = \rho gh, \quad (8)$$

где  $h$  — высота падения, соответствующая разрушению почвенных частиц.

Для среднесуглинистой почвы было установлено следующее:

$$h = 0,32\omega^2 - 11,549\omega + 153. \quad (9)$$

Очень важно установить, для какого элемента (см. рис. 2) следует использовать условие (7). А.Н. Зелениным установлено, что толщина уплотненного ядра по ходу движения вертикального деформатора

$$H_{хд} = \frac{2}{3}\delta. \quad (10)$$

Также А.Н. Зелениным доказано, что плоскость максимальных давлений [3] расположена на глубине

$$H_{мд} = h - H_{хд}, \quad (11)$$

где  $h$  — глубина обработки.

С учетом данных предпосылок это все относится к первому элементу анализируемого пласта (рис. 2). Таким образом, тяговое усилие определяется величиной накопленной потенциальной энергии первого элемента.

Для оценки методики по определению тягового усилия на основе МКЭ были использованы выражения В.П. Горячкина, Н.В. Щучкина, Г.Н. Синеокова, В.В. Кацыгина, А.Н. Зеленина. Глубина обработки  $h = 0,265$  м, ширина захвата рабочего органа  $\delta = 0,09$  м, абсолютная влажность почвы

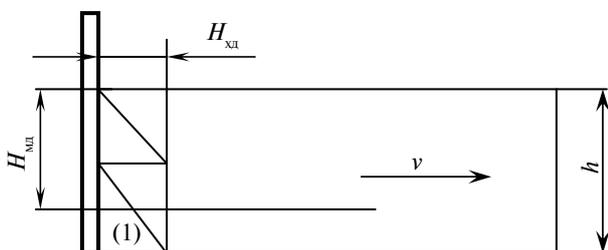


Рис. 2. Воздействие деформатора на почву

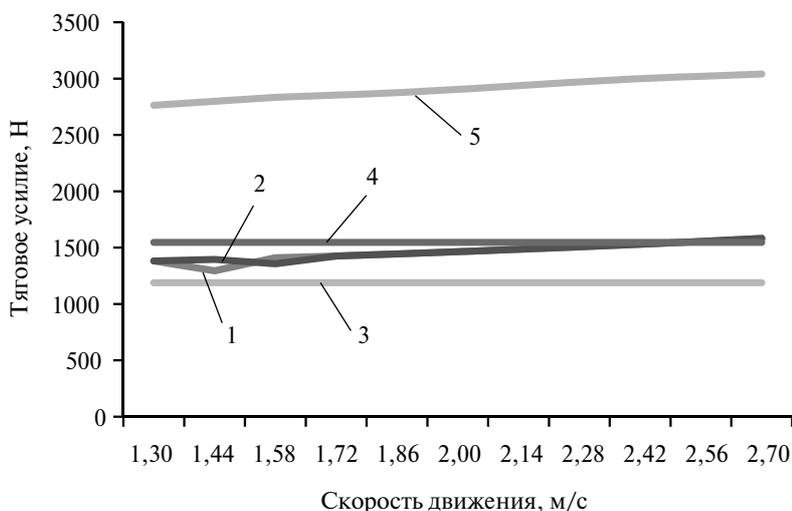


Рис. 3. Расчетные значения тяговых сопротивлений:

1 — Горячкин; 2 — Кацыгин; 3 — Щучкин; 4 — Синеоков; 5 — МКЭ

$\omega = 20\%$ , угол внешнего трения  $\phi_{внеш} = 31^\circ$ , угол внутреннего трения  $\phi_{внут} = 29^\circ$ , плотность почвы  $\rho = 1554 \text{ кг/м}^3$ , коэффициент сопротивления деформации  $k = 54 \text{ 124 Па}$ , модуль упругости первого рода  $348 \text{ 4406 Па}$ . При моделировании тягового усилия на основе МКЭ значение модуля упругости первого рода также составило  $3 \text{ 448 406 Па}$ , коэффициент Пуассона  $\mu = 0,32$ , удельная потенциальная энергия крошения для первого элемента  $[u] = 7662 \text{ Дж/м}^3$ . График зависимостей тяговых сопротивлений без учета зависимости А.Н. Зеленина представлен на рис. 3.

Тяговое усилие с использованием формул Н.В. Щучкина (1188 Н) и Г.Н. Синеокова (1547) не зависит от скорости движения. Тяговое усилие, определенное по формуле В.П. Горячкина и В.В. Кацыгина, имеет тенденцию к увеличению при увеличении скорости движения. Минимальные и максимальные значения, определенные по формуле В.П. Горячкина и Г.Н. Синеокова, равны, составляют 1381 Н и 1582 Н.

Величина тягового усилия, рассчитанная на основе МКЭ без учета скорости движения, составила 2525 Н, что превышает тяговое усилие, определенное по формуле Н.В. Щучкина, в 2,12 раза, по формуле Г.Н. Синеокова — в 1,63 раза. Это можно объяснить тем, что работа вертикального деформатора сопровождается деформациями сжатия и сдвига, а работа плужных корпусов — в большей мере деформациями сдвига и изгиба.

А.Н. Зеленин предложил определять тяговое усилие для вертикальных листов без учета скорости движения по следующей формуле:

$$P = P_1(1 + 0,1S), \quad (12)$$

где  $S$  — толщина листа, см;  $P_1$  — усилие при данной глубине резания, соответствующее листу толщиной 1 см.

При глубине  $h = 0,25$  м, при ширине профиля  $S = 9$  см тяговое усилие для глин с влажностью 19% составило 10 830 Н, для песка с влажностью 9% — 1235 Н. В уточненной формуле А.Н. Зеленина свойства почвы выражены через число ударов плотномер ДорНИИ:

$$P = ch^{1,35} (1 + 0,1\delta) \left[ 1 - \frac{90 - \alpha}{180} \right] \beta_0, \quad (13)$$

где  $c$  — число ударов плотномер ДорНИИ;  $\alpha$  — угол резания;  $\beta_0$  — коэффициент, зависящий от угла заострения  $\beta$ .

При угле заострения  $\beta \geq 150^\circ$   $\beta_0 = 1$ . Для вертикального деформатора  $\alpha = 90^\circ$ . Для среднесуглинистой почвы с влажностью 19,7% число ударов ударника ДорНИИ составляет

$c = 5$  [4]. При заблокированном резании тяговое усилие составляет 7926 Н. При деблокированном резании тяговое усилие без учета скорости движения снижается в 2,72 раза и составляет 2913 Н.

Таким образом, величина тягового усилия удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными А.Н. Зеленина при условии достижения в уплотненном ядре удельной потенциальной энергии разрушения.

#### Список литературы

1. Клёнин, Н.И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Н.И. Клёнин, В.А. Сакун. — М.: Колос, 1994. — 104 с.
2. Сельскохозяйственные машины и оборудование: энциклопедия / И.П. Ксеневиц [и др.]. — М.: Машиностроение, 1998. — С. 121.
3. Зеленин, А.Н. Основы разрушения грунтов механическими способами / А.Н. Зеленин. — М.: Машиностроение, 1968. — 54 с.
4. Зеленин, А.Н. Лабораторный практикум по резанию грунтов / А.Н. Зеленин, Г.Н. Карасёв, Л.В. Красильников. — М.: Высшая школа, 1969. — 222 с.
5. Кушнарёв, А.С. К методике определения модулей упругости и сдвига почвы / А.С. Кушнарёв // Сборник научных трудов молодых ученых Мелитопольского института механизации сельского хозяйства. — Мелитополь, 1968. — С. 3.
6. Добротворский, И.В. Описание поведения почвы под нагрузкой с помощью метода конечных элементов / И.В. Добротворский // Науч.-тех. бюл. ВАСХНИЛ СО. — 1984. — Вып. 38. — С. 18–24.
7. Дарков, А.В. Строительная механика / А.В. Дарков, И.Н. Шапошников. — М.: Высшая школа, 1986. — 458 с.

УДК 621. 565:637.1

*А.Б. Коршунов, канд. техн. наук*

Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства Россельхозакадемии

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА АККУМУЛЯЦИОННЫХ КОМБИНИРОВАННЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИРОДНОГО ХОЛОДА

Сохранение качества и сокращение потерь молока является серьезной проблемой, в значительной мере определяющей эффективность работы всего АПК России. Эта задача должна быть решена на базе дальнейшего совершенствования холодильного оборудования и правильного сочетания источников искусственного и естественного холода.

Имеющееся на молочных фермах холодильное оборудование в большинстве случаев не отвечает современным требованиям [1]. Около 80 % находящегося в эксплуатации холодильного оборудования выработало свой ресурс и находится в предаварийном или аварийном состоянии. Положение усугубляется тем обстоятельством, что ремонтная база хозяйств, квалификация обслуживающего персонала, поставка запасных частей и комплектующих не отвечает требованиям эффективной эксплуатации холодильной техники. Интенсивность отказов возрастает, что приводит к увеличению потерь продукции от отказов холодильного оборудования. На ферме в 400 гол. при соответствующем уровне цен на коровье молоко потери могут достигать до 30 тыс. р. в сутки. Низкий уровень унификации холодильного оборудования затрудняет его обслуживание и ремонт. Затраты рабочего времени на эти операции составляют около 1000 чел.-ч в год. Это привело к тому, что в ряде случаев оно не отве-

чает требованиям Технического регламента на молоко и молочную продукцию (Федеральный закон от 12 июля 2008 г. № 88-ФЗ). Устойчивый рост стоимости электроэнергии и холодильного оборудования приводит к увеличению себестоимости молока и молочной продукции.

Повышение экономической эффективности холодильного оборудования и развитие бесфреоновых технологий производства холода имеет большое общегосударственное значение, так как позволит значительно сократить расход электроэнергии и повысить экологическую безопасность за счет сокращения неблагоприятного воздействия фреона на озоновый слой Земли.

Применение аккумуляционных комбинированных холодильных машин (АКХМ) позволит повысить надежность охлаждающих систем и экологическую безопасность, осуществить техническое перевооружение хозяйств АКХМ, выполненных на современной конструктивной и элементной базе, что позволит:

- сократить капитальные и эксплуатационные затраты на охлаждение молока путем снижения установленной мощности компрессоров, испарителей, вспомогательного оборудования и питающих трансформаторных подстанций;
- уменьшить затраты и сократить расход электроэнергии на выработку холода за счет ис-