

---

---

DOI: 10.53078/20778481\_2021\_4\_66

УДК 624.132.3

*А. П. Смоляр*

## ОБОБЩЕННАЯ ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ КОПАНИЯ ГРУНТА

---

---

*A. P. Smoliar*

## GENERALIZED SIMULATION MODEL OF EXCAVATION WORKS

---

---

### **Аннотация**

Представлена обобщенная имитационная модель разработки грунта, пригодная для анализа процесса копания рабочим органом любого типа. Приведен метод оценки значимости факторов, оказывающих влияние на процесс копания, обеспечивающий получение количественной оценки их эффективности.

### **Ключевые слова:**

разработка грунта, имитационная модель, площадка сдвига, угол сдвига, обобщенная расчетная схема, угол резания.

### **Для цитирования:**

Смоляр, А. П. Обобщенная имитационная модель копания грунта / А. П. Смоляр // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2021. – № 4 (73). – С. 66–75.

### **Abstract**

A generalized simulation model of excavation works is presented, suitable for analyzing the process of digging with a working member of any type. A method for assessing the significance of factors influencing the digging process is given, which ensures a quantitative assessment of their effectiveness.

### **Keywords:**

excavation works, simulation model, shear area, shear angle, generalized design scheme, cutting angle.

### **For citation:**

Smoliar, A. P. Generalized simulation model of excavation works / A. P. Smoliar // The Belarusian-Russian university herald. – 2021. – № 4 (73). – P. 66–75.

---

### ***Введение***

Земляные работы являются важной составной частью строительства большинства инженерных сооружений. В зависимости от типа сооружаемого объекта объем земляных работ колеблется от 3 %...5 % до 80 %...90 % общего объема строительных работ. Машины для разработки грунтов и пород являются одним из основных видов техники, используемой при добыче полезных ископаемых, производстве строительных материалов, в угольной промышленности, сельском хозяйстве и других отраслях.

Высокая энергоемкость земляных работ и большой их объем, не имеющий тенденции к снижению, позволяют заключить, что исследования, направленные на разработку новых технологий, обеспечивающих снижение затрат энергии при разработке грунта, являются актуальными.

Анализ конструкций современных землеройных машин показывает, что возможность достигнуть значительного снижения энергоемкости за счет дальнейшей оптимизации параметров типового рабочего оборудования почти исчерпана.

Поиск и разработка новых технологий в настоящее время в основном ведутся на основе интуиции, т. к. существующие теории разработки грунтов машинами для земляных работ не решают проблему создания аналитической модели, идентификационной исследуемому процессу.

Планируемые исследования направлены на разработку такой обобщенной аналитической модели, которая могла бы подсказать направление разработки принципов новой технологии копания грунта и которую можно было бы использовать в качестве основного инструмента, обеспечивающего прогностическую оценку эффективности нового оборудования, не имеющего аналогов.

### **Основная часть**

Рабочее сопротивление землеройно-транспортных машин, работающих в режиме послойной разработки, кроме сопротивления резанию, включает в себя сопротивление призмы волочения и сопротивления, возникающие при перемещении грунтового потока по рабочему органу либо внутри рабочего органа [1]. При этом в режиме послойной разработки, когда толщина стружки относительно мала по сравнению с размерами рабочего органа, отделяемый от массива грунт взаимодействует с ножами рабочего органа и поверхность ножа является плоскостью скольжения, формирующей направление движения срезанного грунта.

В таком режиме работают землеройно-транспортные машины, рабочие органы которых можно разделить на типы: плоский; отвальный; ковшовый, отделяющий грунт от массива и заполняющийся им. Для землеройно-транспортных машин, работающих в режиме послойного копания, расчёт процесса копания становится первостепенной задачей. Из-за ограничения силы тяги тягача (тягача и толкателя при тандемной сцепке машин) условиями сцепления их

двигателей с грунтом копания, особенно в заключительной стадии, ведётся при полной реализации тяговых возможностей. Вследствие этого машинист землеройно-транспортной машины не может изменять режим работы в широких пределах. При этом заглубление рабочего органа осуществляется в начальной стадии, как правило, на максимальную глубину, при которой возможно движение машины. В процессе копания при увеличении сопротивления грунта рабочий орган постепенно выглубляется [2].

Для всех типов рабочих органов пригодна единая методика расчета сопротивлений, возникающих при копании грунта. Методика заключается в следующем. Рассматривается движение грунта по поверхностям либо внутри рабочего органа (при этом необходимо иметь в виду и альтернативные возможности движения по разным направлениям) при каком-то заранее выбранном значении угла сдвига. Определяются силовые параметры, действующие на элементы поверхности движущейся массы грунта, в том числе и на предполагаемую площадку сдвига. После этого уточняется положение площадки сдвига и, если выбранное и расчетное значения угла сдвига не совпадают, расчеты продолжаются до совпадения их значений. При их совпадении с заданной точностью имеется полная информация о рассчитываемом процессе и всех его параметрах.

Общие закономерности расчета характерны и для нижнего расчетного элемента движущегося потока грунта, примыкающего к площадке сдвига. Эти закономерности заключаются в следующем. Определяются внешние воздействия, воспринимаемые поверхностями выделенного нижнего элемента. Эти воздействия зависят как от типа рабочего органа, так и от стадии процесса копания. После этого рассматривается равновесие нижнего элемента и определяются неизвестные значения сил, дей-

ствующих со стороны ножа и площадки сдвига.

Полученная информация обеспечивает дальнейший расчет процесса копания – определение положения площадки сдвига и окончательный расчет параметров, характеризующих копание, как геометрических, так и силовых.

Учитывая единую физическую природу разрушения грунта при копании рабочими органами различных типов, можно перейти к составлению расчетной схемы, которая удовлетворила бы как рассмотренным, так и другим типам рабочих органов (рис. 1).

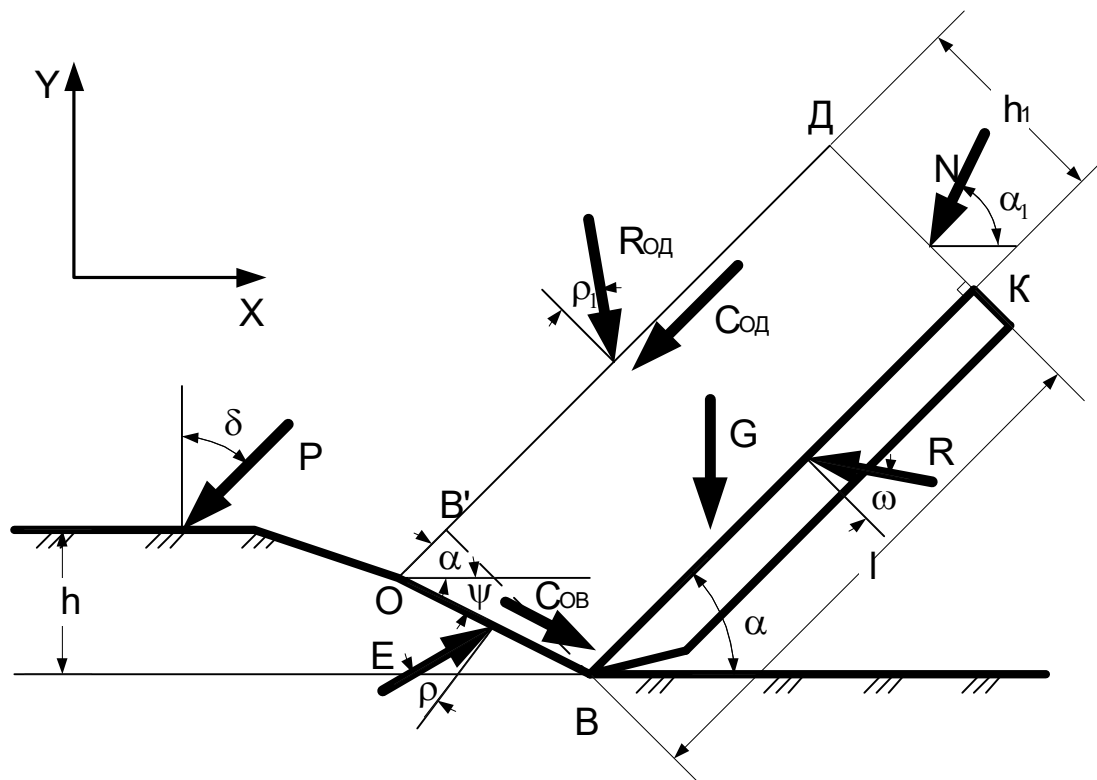


Рис. 1. Обобщенная расчетная схема

В эту схему входят все силовые факторы, действующие на нижний элемент перемещаемого грунта, а также действующие на дневную поверхность разрабатываемого грунта.

Сила  $P$  имитирует внешнее воздействие на поверхность разрабатываемого грунта. Положение линии действия этой силы определяется углом  $\delta$ . Для типовых рабочих органов величина силы  $P$  определяется размерами призмы волочения. При искусственном воздействии на поверхность массива дополнительно необходимо задаться расстоянием до линии ее действия. Наибо-

лее удобно для этой цели использовать величину угла  $\psi$ . Искусственное воздействие может осуществляться как специальными устройствами, так и движителем машины.

Сила  $R_{од}$  и угол ее отклонения от нормали  $\rho_1$  имитируют внешнее воздействие на поверхность  $ОД$  выделенного элемента. Такое воздействие появляется при наличии призмы волочения, а также может возникнуть и при влиянии механических устройств. Таким устройством может являться элеватор, установленный в ковше скрепера. При наличии между

поверхностью ОД и воздействующим на него телом сцепления оно будет имитироваться силой  $C_{од}$ .

Сила  $N$ , действующая в общем случае под углом  $\alpha_1$ , представляет собой сопротивление перемещаемого потока грунта по поверхности рабочего органа либо сквозь грунт внутри рабочего органа.

Необходимо отметить, что для типовых конструкций бульдозеров и скреперов, работающих без каких-либо загружающих устройств, сила  $N$  будет изменяться по зависимости

$$N = k \cdot h_1 + \sum_{i=1}^n F_{тр}^i, \quad (1)$$

при этом

$$h_1 = h \cdot \frac{\sin(\alpha + \psi)}{\sin \psi}, \quad (2)$$

где  $h_1$  – толщина нижнего элемента;  $h$  – толщина стружки;  $k$  – коэффициент пропорциональности, определяемый из условий движения верхних элементов перемещаемого потока;  $n$  – количество поверхностей трения,  $n = 1$  при отсутствии призмы волочения,  $n = 2$  при ее наличии;  $F_{тр}^i$  – сила трения по одной поверхности трения.

Эта формула отражает тот факт, что силы трения практически будут мало зависеть от толщины нижнего элемента, а следовательно, и от угла сдвига  $\psi$  в отличие от массы перемещаемого потока грунта, учитываемой первым членом формулы (1).

Таким образом, силы  $P$ ,  $R_{од}$ ,  $C_{од}$  и  $N$  имитируют внешнее воздействие на выделенный элемент ОБКД, вес которого равен  $G$ .

Отметим, что такое воздействие можно оказывать и механическими устройствами. Отличительной особен-

ностью принятой обобщенной схемы является то, что отмеченные силы и их направление можно учитывать независимо друг от друга. Этим обеспечивается ее универсальность и пригодность для расчета эффективности рабочих органов нового типа. При этом необходимо иметь в виду, что сила  $N$  может оказывать воздействие либо непосредственно на рабочий орган, либо опосредствованно через вышележащий элемент грунта.

Расчетная схема допускает введение и других сил, например, сил трения торцов перемещаемого элемента о рабочее оборудование, сопротивлений сдвигу по боковым граням и других. Введение таких сил может быть оправдано лишь в тех случаях и для тех рабочих органов, где они оказывают существенное влияние на величину возникающих сопротивлений.

Величина силы  $C_{ов}$  (см. рис. 1) зависит от физико-механических свойств грунта и размеров площадки сдвига. Неизвестные силы  $P$  и  $E$  можно найти из условий равновесия элемента ОБКД:

$$\begin{aligned} \Sigma X &= -R \sin(\alpha + \omega) - N \cos \alpha_1 - \\ &- C_{од} \cos \alpha + R_{од} \sin(\alpha - \rho_1) + \\ &+ C_{ов} \cos \psi + E \sin(\psi + \rho) = 0; \\ \Sigma Y &= -G + R \cos(\alpha + \omega) - N \sin \alpha_1 - \\ &- C_{од} \sin \alpha - R_{од} \cos(\alpha - \rho_1) - \\ &- C_{ов} \sin \psi + E \cos(\psi + \rho) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Из этих уравнений после преобразований получим

$$E = \frac{G \sin(\alpha + \omega) - C_{OB} \cos(\alpha + \omega + \psi) - C_{OD} \cos \omega + R_{OD} \sin(\omega - \rho_1) + N \cos(\alpha + \omega - \alpha_1)}{\sin(\alpha + \omega + \psi + \rho)}; \quad (4)$$

$$R = \frac{E \sin(\psi + \rho) + C_{OB} \cos \psi - C_{OD} \cos \alpha + R_{OD} \sin(\alpha - \rho_1) - N \cos \alpha_1}{\sin(\alpha + \omega)} = 0. \quad (5)$$

Вес выделенного элемента необходимо определять с учетом того, что площадь боковой поверхности обобщенного расчетного элемента  $S_{OBKD}$  будет равна

$$S_{OBKD} = l \cdot h_1 + \frac{h_1^2}{2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \psi)}, \quad (6)$$

где  $l$  – длина отрезка ВК (длина элемента, измеренная в плоскости ножа).

Полученное по формуле (4) значение силы  $E$  позволяет перейти к расчету приведенного давления на площадку сдвига и в дальнейшем к величине угла сдвига и параметрам, характеризующим процесс копания, по методике.

Существенное отличие приведенной обобщенной имитационной модели от существующих заключается в том, что впервые стало возможным оценить аналитическими методами влияние на процесс копания независимо друг от друга почти всех факторов. Эта оценка осуществляется опосредствованно, через изменение граничных условий на поверхностях рассматриваемого элемента ОБКД.

Для оценки значимости факторов поступим следующим образом. Выберем характерные режимы работы для средних грунтовых условий. Целесообразно выбрать режим работы, близкий к резанию грунта или к начальной стадии процесса копания, при которых величина угла сдвига будет максимальной, и режим работы, близкий к копанию грунта на заключительной стадии, при минимальном угле сдвига. Изменять режим работы возможно изменением силы  $N$ , имитирующей сопротивление

наполнению, либо изменением условной длины элемента ОБКД. Остальные силовые факторы, имитирующие внешнее воздействие, в исходном положении принимаются по значениям, характеризующим свойства грунта или процесса в естественном состоянии, без дополнительных воздействий. После этого становится возможным поочередно исследовать влияние того или иного фактора.

Проведем такие исследования для грунта II категории, наиболее характерного для работы землеройных машин, а именно:

- угол внутреннего трения  $\rho = 28^\circ$ ;
- угол внешнего трения  $\omega = 25^\circ$ ;
- удельное сцепление грунта  $c = 4$  кПа;
- плотность грунта  $\gamma = 1,6$  кг/дм<sup>3</sup>.

За исходную выберем модель плоского рабочего органа. Для определенности зададимся следующими размерами обобщенного элемента ОБКД:

- ширина  $B = 1$  м;
- угол резания  $\alpha = 25^\circ$  и  $\alpha = 60^\circ$ .

Выбор двух углов резания позволяет получить две группы значений исходных данных – без призмы волочения и с ней.

Для получения исходных данных в первом режиме (при низких нагрузках) сделаем вычисления при постоянной условной высоте обобщенного элемента, равной 0,1 м и толщине стружки 0,02 м. Результаты расчетов сведем в табл. 1.

Проанализируем влияние факторов в соответствии со схемой на рис. 1. Будем принимать во внимание основные факторы, характеризующие сопротивление грунта, – максимальное значение силы сопротивления резанию  $R_1^{\max}$

и значение угла сдвига  $\psi$ .

Выбор угла сдвига в качестве основного фактора объясняется не только тем, что он определяет перемещаемый объем грунта, но и тем, что он вместе с

размерами рабочего органа полностью определяет геометрические размеры обобщенного элемента и перемещаемого потока грунта.

Табл. 1. Результаты расчета плоского рабочего органа при легком режиме работы

$\alpha$ , град	Результат расчетов			
	$P_1^{\max}$ , кН	$\psi$ , град	$R_{\text{од}}$ , кН	$p$ , кПа
25	0,182	37,5	–	–
60	0,428	24,4	0,05	0,14

Для определенности будем изменять силовые факторы на величину 0,1 кН, что составляет 55 % от значения силы  $P_1^{\max}$  при  $\alpha = 25^\circ$  и 23,4 % при  $\alpha = 60^\circ$ .

Давление на поверхность массива изменяем при вычислениях на 7 кПа, что сопоставимо с давлением связности 7,32 кПа. Индексами 1 и 2 помечены разные режимы действия силовых факторов:

– для силы  $N$ : 1 – при внешнем воздействии; 2 – при воздействии со

стороны рабочего органа;

– для силы  $R_{\text{од}}$ : 1 – при воздействии, аналогичном действию призмы волочения; 2 – при воздействии, аналогичном действию элеватора;

– для давления  $p$ : 1 – при нормальном давлении; 2 – при давлении, аналогичном действию призмы волочения; 3 – при давлении, аналогичном действию движителя.

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Табл. 2. Влияние факторов при легком режиме работы

Показатель	Угол резания $\alpha$ , град	Изменяемые параметры						
		$N$ (+0,1 кН)		$R_{\text{од}}$ (+0,1 кН)		$p$ (+7 кПа)		
		Ре-жим 1	Ре-жим 2	Ре-жим 1	Ре-жим 2	Ре-жим 1	Ре-жим 2	Ре-жим 3
Изменение силы $P_1^{\max}$ , %	25	103	152,5	146	97	104	99	106
Изменение угла сдвига $\psi$ , %		81	81	83	101	158	139	162
Изменение силы $P_1^{\max}$ , %	60	116	127,3	138	107	125	101	112
Изменение угла сдвига $\psi$ , %		83	83	73	91,5	143	143	171

Рассмотрим влияние факторов во втором режиме работы при нагрузках, близких к предельным для данных условий.

Исходные данные получены при высоте обобщенного элемента, состав-

ляющей 0,845 м при  $\alpha = 25^\circ$  и 0,442 м при угле резания  $\alpha = 60^\circ$ . Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Будем изменять силовые факторы на 0,86 кН, что по-прежнему состав-

ляет 55 % от значения силы  $P_1^{\max}$  при  $\alpha = 25^\circ$ , но уже 37 % при угле резания  $\alpha = 60^\circ$ .

Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Табл. 3. Результаты расчета плоского рабочего органа при тяжелом режиме работы

$\alpha$ , град	Результат расчетов			
	$P_1^{\max}$ , кН	$\psi$ , град	$R_{од}$ , кН	$p$ , кПа
25	1,57	7,5	–	–
60	2,33	8,25	0,967	3,43

Табл. 4. Влияние факторов при тяжелом режиме работы

Показатель	Угол резания $\alpha$ , град	Изменяемые параметры						
		N (+0,86 кН)		$R_{од}$ (+0,86 кН)		p (+7 кПа)		
		Режим 1	Режим 2	Режим 1	Режим 2	Режим 1	Режим 2	Режим 3
Изменение силы $P_1^{\max}$ , %	25	143	192	180	93	53	56	52,8
Изменение угла сдвига $\psi$ , %		52,5	52,5	57,5	105	345	250	365
Изменение силы $P_1^{\max}$ , %	60	122	140	151	64	87,5	88	88
Изменение угла сдвига $\psi$ , %		67	67	28	264	229	167	245

Варьирование параметров в приведенных примерах осуществлялось почти случайным образом, без каких-либо дополнительных условий и исследований. Поэтому к анализу результатов следует подходить как к пониманию того факта, что в данных условиях, при данном режиме работы они имеют место, но не гарантируют оптимального результата.

При этом следует иметь в виду, что результаты, приведенные в табл. 2 и 4, можно трактовать и в обратную сторону. Для этого значения, приведенные в табл. 2 и 4, принимаются за исходные, а изменение приведенных в них параметров осуществляется в сторону уменьшения. Тогда окончательные значения параметров, характеризующих процесс копания, будут представлены в табл. 1 и 3.

Хотя, как это отмечено выше, про-

веденные исследования не проводились с целью оптимизации параметров, но и они дают веские основания заключить, что, воздействуя определенным образом на исследуемый процесс, можно достичь значительного снижения сопротивления копанию.

Проведем анализ влияния одного из факторов, например, нормального давления  $p_{mo}$  при легком режиме работы и угле резания  $\alpha = 25^\circ$ . Выбор этого режима работы объясняется характером изменения параметров, приведенных в табл. 2. При изменении угла сдвига на 158 % сопротивление резанию  $P_1^{\max}$  изменяется всего на 104 %. Результаты дополнительных расчетов представлены в табл. 5 и на рис. 2.

Анализ результатов показывает, что минимальное значение  $R_{01} = 0,177$  кН (97 % от исходного значения при  $p = 0$ ) в данных условиях получено при

$p = 2$  кПа. При этом угол сдвига составляет  $\psi = 45,4^\circ$  (121 % от исходного значения). Для сравнения проведем анали-

тические вычисления при тяжелом режиме работы. Результаты расчетов представлены в табл. 6 и на рис. 3.

Табл. 5. Расчет параметров при изменении нормального давления  $p$  для легкого режима работы

$p$ , кПа	0	1	2	3	5	7
$\psi$ , град	37,5	41,6	45,4	48,75	54,4	59,25
$P_1^{\max}$ , кН	0,182	0,179	0,177	0,178	0,182	0,190

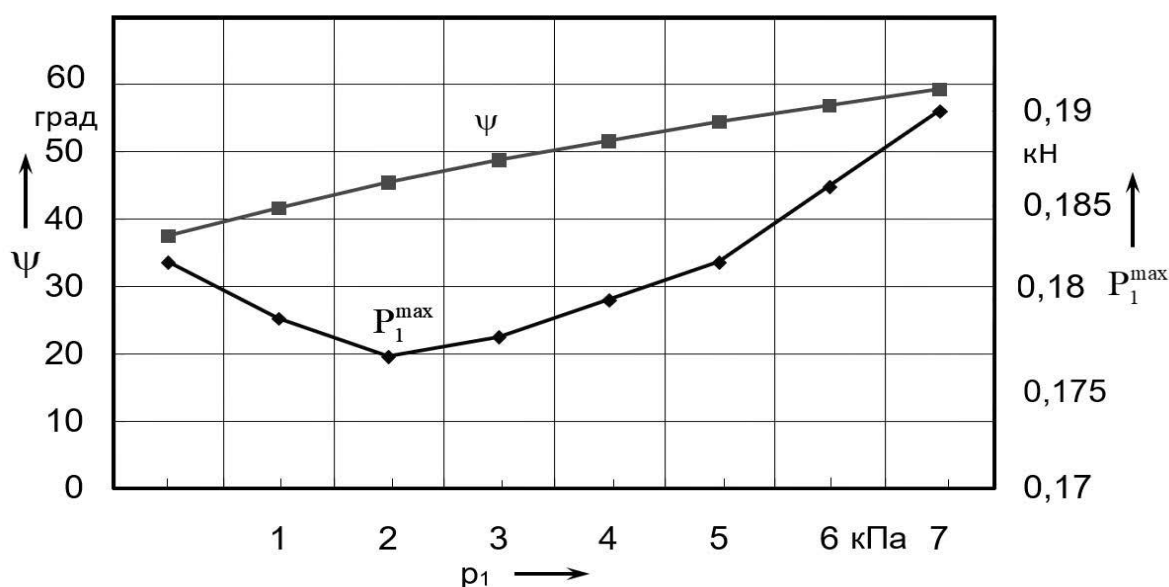


Рис. 2. Влияние нормального давления  $p$  на угол  $\psi$  и сопротивление копанью  $P_1^{\max}$

Табл. 6. Расчет параметров при изменении нормального давления  $p$  для тяжелого режима работы

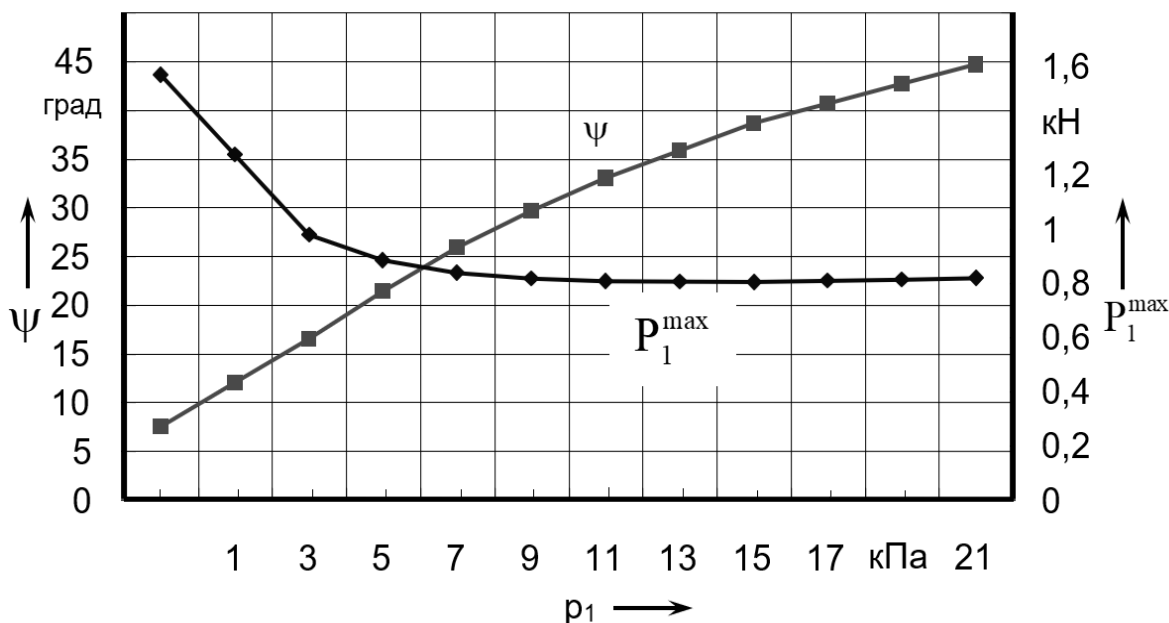
$p$ , кПа	0	3	5	7	9	11	15	20
$\psi$ , град	7,5	16,5	21,38	25,88	29,63	33	38,63	44,68
$P_1^{\max}$ , кН	1,57	0,98	0,885	0,839	0,818	0,808	0,806	0,819

Анализ этого графика позволяет сделать вывод, что увеличение давления до 15 кПа приводит к дальнейшему снижению сопротивления копанью до 51,5 % от исходного значения. Но одновременно можно отметить, что

при  $p = 5$  кПа (в 3 раза меньше предыдущего) сопротивление составляет всего 56 % от исходного значения.

Возможности разработанных принципов моделирования можно оценить на конкретных примерах.



Рис. 3. Влияние нормального давления  $p$  на угол  $\psi$  и сопротивление копанию  $P_1^{\max}$ 

Рассмотрим такой общеизвестный тип рабочего органа, как скрепер со шнековой загрузкой. До настоящего времени параметры шнека, и прежде всего его диаметр, выбирались на основе экспериментальных наблюдений за наполнением ковша скрепера традиционной конструкции. Известно, что по мере наполнения ковша скрепера угол сдвига  $\psi$  уменьшается, а толщина потока грунта, входящего в ковш, увеличивается. Исходя из максимальных размеров толщины потока грунта на заключительной стадии копания подбирается диаметр шнека.

Установка шнека снижает сопротивление наполнению, имитируемое силой  $N$  на обобщенной схеме, изображенной на рис. 1. Величину снижения силы  $N$  можно подсчитать с помощью известных методов, описывающих работу шнека. Далее методика расчета заключается в следующем. Рассматривается копание грунта скрепером типовой конструкции на заключительной стадии и определяются необходимые граничные условия для обобщенного нижнего элемента, включая и силу  $N$ . После это-

го подбираются ориентировочные параметры шнека и оценивается величина снижения сопротивления наполнению. Затем осуществляются расчеты при новых граничных условиях (уменьшенном значении силы  $N$ ). После этого оценивается толщина потока грунта при установке шнека, которая изменится в меньшую сторону, и выбирается диаметр последнего.

Такой метод обеспечивает оптимизацию диаметра шнека в сторону уменьшения его диаметра, за счет чего снижаются затраты мощности на его привод. Эта работа осуществляется без дополнительных экспериментальных исследований.

Рассмотрим другой пример – подачу воздуха на поверхность рабочего органа. Для этого случая экспериментальные исследования сводятся к получению зависимости между коэффициентом внешнего трения и давлением грунта при определенных параметрах воздушного потока. Далее используется методика расчета параметров копания грунта при новых значениях угла внешнего трения. Преимущества такого под-

хода – количественно оцениваются необходимые показатели без изготовления и исследования экспериментальных образцов машин. Экспериментальные исследования зависимости коэффициента внешнего трения от параметров воздушного потока и давления грунта выполнимы в лабораторных условиях при наличии простейшего оборудования.

Обратимся к одному из известных типов заслонки скрепера – горизонтальной заслонке, в которой находится и транспортируется призма волочения. Оценка по приведенной методике позволяет заключить, что такой тип заслонки отрицательно влияет на процесс копания, поэтому такая заслонка требует дальнейшего усовершенствования.

Направление усовершенствования можно получить и на основании анализа результатов расчетов.

### ***Заключение***

Таким образом, обобщенная имитационная модель позволяет оценить и исследовать влияние факторов, входящих в нее, на процесс копания. Оценка дается количественно, что до настоящего времени было невозможным. Полу-

ченные результаты показывают, что даже при простом, почти ничем не обоснованном переборе факторов можно найти режимы работы, в значительной степени снижающие энергоемкость процесса копания.

Решение проблем оптимизации параметров рабочего оборудования землеройных машин осуществляется на основе привлечения новых наукоемких технологий и инновационных решений, затрагивающих сферы проектирования, изготовления и эксплуатации этих машин. В настоящее время на первый план выдвигается создание методов расчета, наиболее полно и адекватно учитывающих особенности исследуемых процессов, позволяющих оценить как основные, так и второстепенные параметры, доступные инструментальному замеру. Это даст возможность более обоснованно судить о степени их адекватности реальным процессам, откроет дорогу широкому использованию автоматизированного проектирования, позволит более полно реализовывать творческий потенциал конструкторских отделов, занимающихся проектированием землеройной техники.

### **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1. **Берестов, Е. И.** Сопротивление грунтов резанию: монография / Е. И. Берестов, А. П. Смоляр. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2008. – 179 с: ил.
2. Взаимодействие рабочего оборудования и гусеничных траков землеройных машин с грунтом: монография / Е. И. Берестов [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – 184 с: ил.

*Статья сдана в редакцию 15 октября 2021 года*

**Алла Петровна Смоляр**, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.  
E-mail: gabriel2111@rambler.ru.

**Alla Petrovna Smoliar**, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarussian-Russian University.  
E-mail: gabriel2111@rambler.ru.