

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗРУШЕНИЮ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ДОННЫХ ОСАДКОВ

Закономерности сопротивления подводных грунтов от параметров землеройных машин и особенностей разрушения среды исследованы на черноморских донных осадках. Ранее установлена независимость сопротивления разрушению полностью водонасыщенного грунта от гидростатического давления, поэтому влияние факторов рабочего процесса изучали при атмосферных условиях. Опыты проведены на автоматизированном стенде, снабженном поддоном для грунта, который перемещали с регулируемой скоростью, набором инструмента с тензометрической аппаратурой, системой регистрации и обработки данных. Резание осуществляли прямоугольным плоским ножом с острой кромкой под слоем воды 5 см, максимальный ход инструмента 1 м. Процесс резания и свойства рабочей среды моделировали в соответствии с критериями подобия, установленными в работе [1].

Использовали образцы грунта, отобранные в нескольких местах с помощью трубчатого пробоотборника, при этом различные значения плотности отвечали разным литологическим принадлежностям материала керна. Ширину и глубину прорези, угол резания, задний угол ножа, скорость резания грунта, длину инструмента и размер его боковых граней, а также характерные свойства донных осадков – сцепление и динамическую структурную вязкость варьировали в соответствии с табл.1. Свойства грунта моделировали в заданных пределах путем добавления в натуральный образец мела или золы – для изменения величины сцепления и веретенного масла или технического вазелина – для изменения вязкости материала.

Таблица 1

Уровни варьирования параметров процесса резания  
подводного грунта

Параметры	Обозн.	- 2	- 1	0	+ 1	+ 2
Ширина ножа, м	$b$	0,04	0,06	0,08	0,10	0,12
Глубина резания, м	$h$	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Длина ножа, м	$l$	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
Угол резания, град	$\alpha$	30	40	50	60	70
Задний угол, град	$\beta$	0	5	10	15	20
Скорость резания, м/с	$v_0$	0,02	0,04	0,06	0,08	0,10
Толщина ножа, м	$d$	0,01	0,03	0,05	0,07	0,09
Динамическая структурная вязкость, кПа·с	$\mu$	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5
Сцепление грунта, кПа	$\tau_0$	1	3	5	7	9

В качестве целевой функции принята горизонтальная составляющая силы сопротивления, так как вертикальная составляющая оказывает незначительное (причем знакопеременное) в процентном отношении влияние на процесс разрушения подводного грунта. Стохастичность процесса не рассматривали, поскольку грунт представлял собой однородную массу. Экспериментальные данные обработаны с помощью программы, составленной в системе Mathcad 2000 PRO.

## Обсуждения экспериментальных исследований

## 1. Зависимость сопротивления грунта от ширины ножа.

Изучение черноморских глинистых осадков плотностью  $\rho = 1250 \text{ кг/м}^3$ , сцеплением  $\tau_0 = 5000 \text{ Па}$ , вязкостью  $\mu = 900 \text{ Па}\cdot\text{с}$  и влажностью 120...200 % показало, что при резании широким плоским ножом образуется сливная стружка, боковые развалы отсутствуют. Форма прорези преимущественно прямоугольная и в области  $b > h$  не зависит от ширины ножа. Наблюдается частичное выпирание осадка вверх и образование бурта, обусловленного выходом на поверхность грунта, пластически деформированного лобовой и боковыми гранями инструмента, рис.1. После прохождения ножа при малых значениях сцепления осадка ( $\tau_0 \leq 2...3 \text{ кПа}$ ) края прорези частично оплывают.

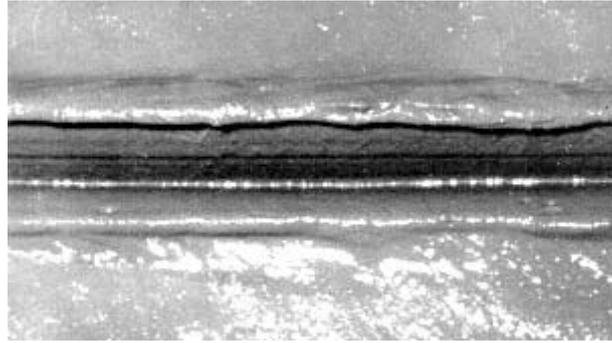
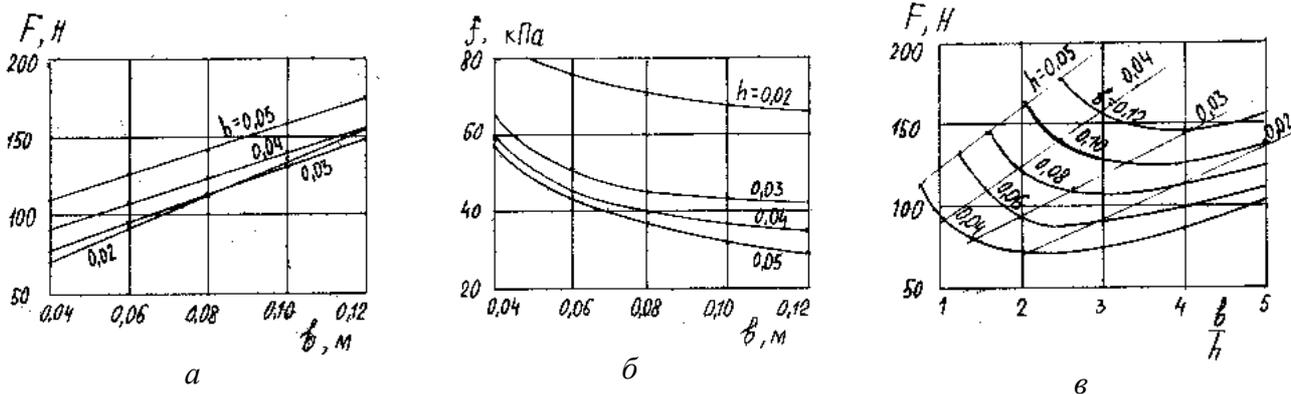


Рис.1. Прорезь донного глинистого осадка

Сопротивление разрушению грунта прямопропорционально увеличению ширины ножа, с ростом глубины прорези уровень прямых  $F(b)$  поднимается, а их наклон несколько уменьшается, рис.2, а. При резании широким лезвием основное сопротивление расходуется на преодоление трения по лобовой грани и сдвиг фрагментов сливной стружки друг относительно друга, которые растут линейно по мере увеличения ширины рабочего органа. Сопротивление вырезанию стружки из массива боковыми ребрами ножа, а также сопротивление среды по бокам ножа незначительны и их доля падает. Так, при резании донных вязкопластичных грунтов ножом с углом  $50^\circ$  увеличение соотношения размеров прорези  $\frac{b}{h}$  от 1 до 4 привело к уменьшению бокового эффекта с 35 до 12 %.

Увеличение ширины ножа, особенно на малых глубинах резания, снижает долю сопротивлений по бокам ножа до 2...6 % при погрешности измерений 10 %.


 Рис.2. Зависимости сопротивления грунта от ширины ножа при  $v_0 = 0,06 \text{ м/с}$ ;  $\alpha = 50^\circ$ ;  $l = 0,06 \text{ м}$ 

Удельное сопротивление грунта с увеличением ширины режущей кромки падает, причем, чем глубже прорезь, тем больше проявляется этот эффект, рис.2, б. Оптимальное соотношение ширины и глубины резания, при котором сопротивление  $F$  принимает минимальные значения, находится в пределах  $\frac{b}{h} = 2...4$ , причем уровень  $F_{\min}$  растет

пропорционально указанному соотношению, рис.2, в. При малой ширине ножа проявляется краевой эффект, в результате чего значительно возрастает вклад вязкого и пластического сопротивлений грунта по бокам ножа, рис.3. Величина  $\delta$  определена как отношение сил сопротивления с обеих сторон инструмента к полному сопротивлению разрушению донного осадка.

Таким образом, зависимость сопротивления резанию вязких подводных грунтов от ширины рабочего органа линейна, удельное сопротивление – функция убывающая. При увеличении ширины ножа более выгодным становится режим резания с малой толщиной стружки и, наоборот, при углублении в массив ширину ножа землеройной машины надо уменьшать. При соотношении ширины прорези к глубине  $\frac{b}{h} > 4$  краевой эффект можно не учитывать.

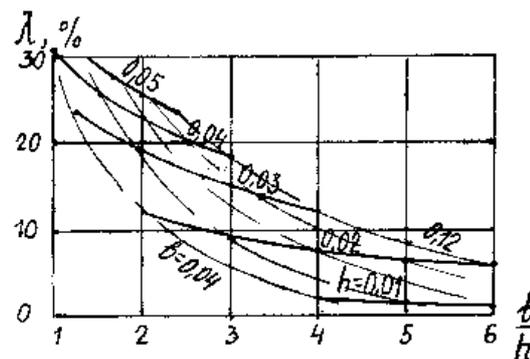


Рис.3. Влияние на процесс разрушения краевого эффекта в зависимости от ширины и глубины прорези

**2. Зависимость сопротивления грунта от глубины прорези.** Сопротивление разрушению глинистого донного осадка исследовали при заблокированном резании широким плоским ножом прямоугольной формы. Свойства грунта соответствовали средним значениям (нулевым уровням), указанным в табл.1. Характер экспериментальных кривых  $F(h)$ , рис.4, а, указывает на почти прямолинейную зависимость сопротивления разрушению подводных вязкопластичных грунтов и в первом приближении соответствует аналогичным зависимостям при резании прочных грунтов в атмосферных условиях [2, 3, 4]. Резание проводили в докритической области, поэтому излома прямых не наблюдалось.

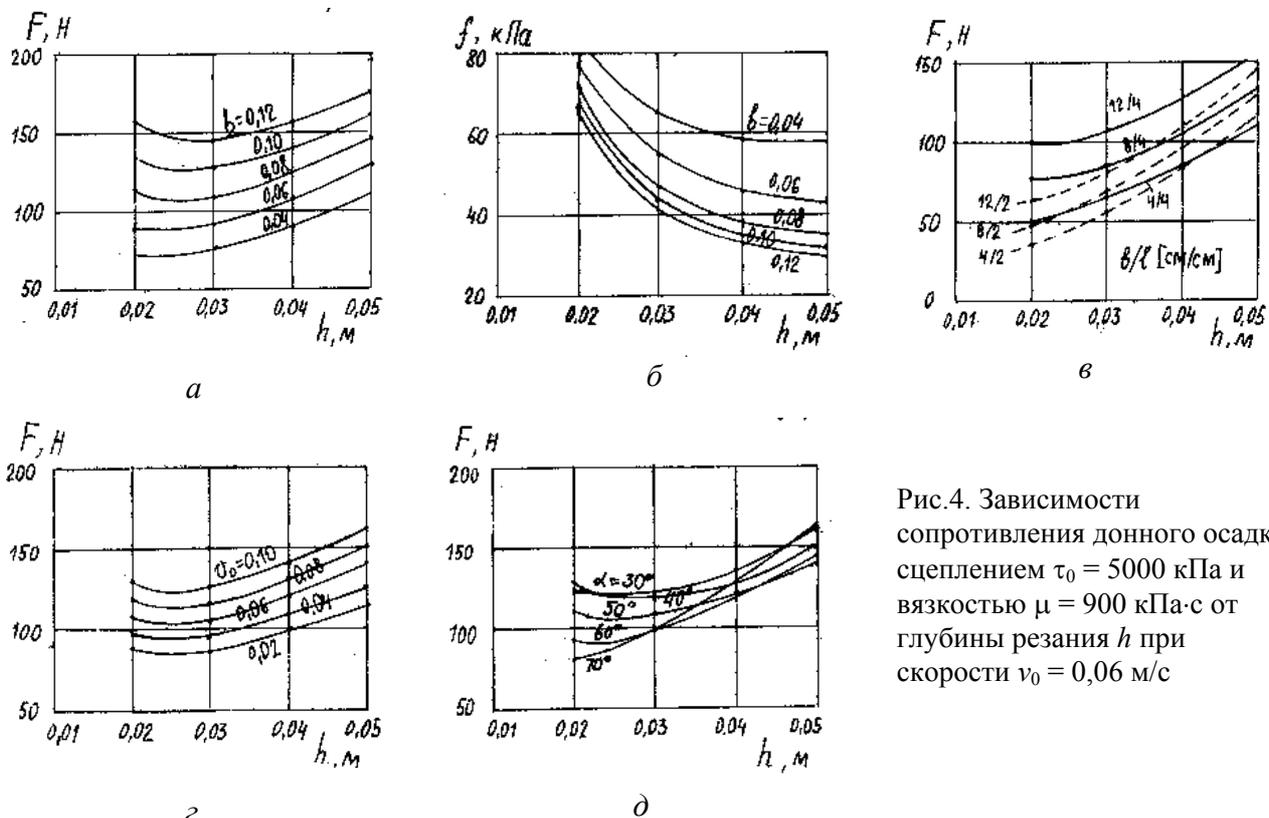


Рис.4. Зависимости сопротивления донного осадка сцеплением  $\tau_0 = 5000$  кПа и вязкостью  $\mu = 900$  кПа·с от глубины резания  $h$  при скорости  $v_0 = 0,06$  м/с

Вместе с тем имеются отличия, связанные, прежде всего, с условиями подводного резания и свойствами донных осадков. Хотя грунт резали в квазистационарном режиме с



малой скоростью,  $v_0 \leq 0,1$  м/с, кривые  $F(h)$  не проходят через нулевую точку из-за наличия гидродинамического сопротивления рабочему органу. При одинаковой глубине прорези длина лобовой поверхности инструмента  $l$  увеличивает абсолютные значения сопротивления грунта, а в области малых значений  $h$  – и форму кривых  $F(h)$ , рис. 4, в.

Обычно уменьшение удельного сопротивления разрушению грунта связывают с относительным расширением прорези по бокам ножа [2]. В наших опытах форма прорези при изменении глубины оставалась постоянной, тем не менее, удельное сопротивление  $f(h)$  уменьшалось по экспоненциальному закону, рис.4, б. По всей вероятности причину этого следует искать в деформационно-прочностных свойствах структурно ослабленных вязкопластичных осадков. Зависимость удельного сопротивления от глубины резания тем круче, чем больше длина и ширина ножа.

Влияние скорости ножа в пределах  $v_0 = 0,02 \dots 0,10$  м на сопротивление грунта заключается в пропорциональном увеличении функции  $F(h)$  с ростом глубины резания, форма этих кривых не изменяется, рис.4, г. При увеличении угла резания  $\alpha$  характер ускоренной зависимости  $F(h)$  сохраняется, но соответствующие кривые становятся круче, рис.4, д.

**3. Зависимость сопротивления разрушению от длины ножа.** Поскольку рассматривается процесс разрушения (резания и перемещения стружки вдоль ножа) длина инструмента резко увеличивает сопротивление, расходуемое на трение по лобовой поверхности и боковым сторонам ножа, а также силу, которая расходуется на компенсацию давления для преодоления вязкого трения вдоль его поверхностей.

Зависимость сопротивления  $F(h)$  при резании коротким ножом (при длине  $l \rightarrow 0$ ) проходит через нулевую точку, что согласуется с результатами исследований сухого грунта [2, 3]. Уменьшение длины лобовой поверхности, равно как и наличие угла скоса передней грани ножа, обуславливает неполный контакт стружки с инструментом, что существенно уменьшает сопротивление грунта разрушению.

В процессе резания узким ножом (при  $l = 0,02 \dots 0,04$  м) увеличиваются сопротивления, идущие на преодоление вязкого трения и сцепления по бокам инструмента, а также сдвига фрагментов стружки на ноже и вырезания ее боковыми гранями из массива. Уменьшение соотношения  $\frac{b}{h}$  до  $0,5 \dots 0,8$  ведет к росту вязких сопротивлений и минимизации функции  $F(l)$  в области значений  $l = 0,04 \dots 0,08$  м, рис.5, а, при этом трение грунта по лобовой грани замедляется, либо вовсе стабилизируется. Удельное сопротивление разрушению минимально при соотношении ширины и длины ножа 3 : 1 и более, рис.5, б.

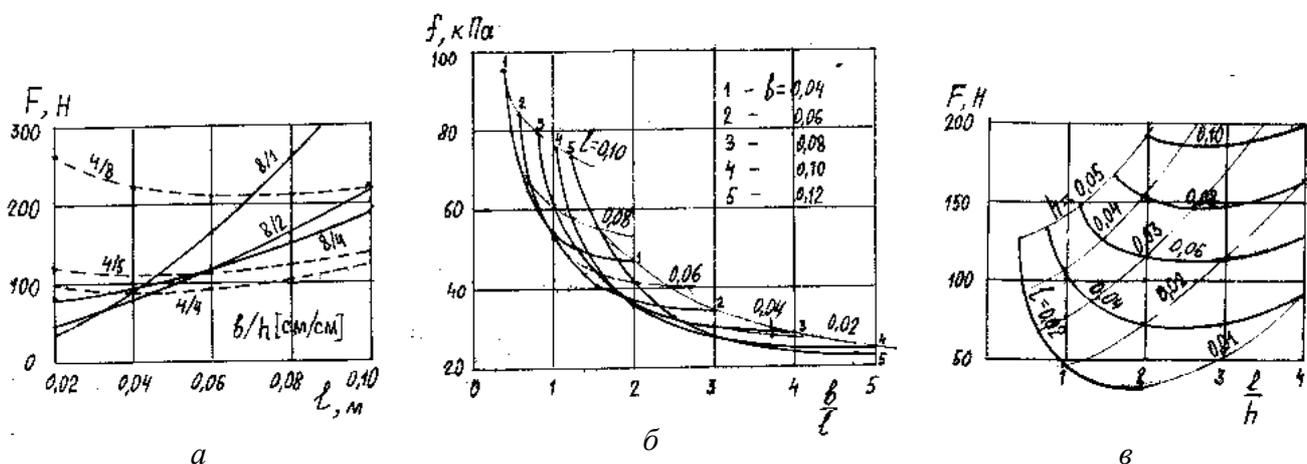


Рис.5. Зависимости сопротивления грунта от длины ножа с углом резания  $\alpha = 50^\circ$  при скорости  $v_0 = 0,06$  м/с и разных соотношениях ширины  $b$  и глубины резания  $h$

Для широкого ножа области наименьших значений  $f$  соответствует отношение его длины  $l$  к глубине прорези  $h$  порядка 2 : 1 при среднем угле резания  $\alpha = 50^\circ$ , рис.5, в. Превышение ширины режущей грани  $b$  к длине ножа  $l$  приводит к практической стабилизации удельного сопротивления разрушению подводного грунта. Рациональный режим резания вязкопластичных грунтов обеспечивается выбором короткого и широкого ножа при выполнении условий  $\frac{b}{l} > 3$  и  $\frac{l}{h} = 1,5 \dots 2,0$ .

**4. Зависимость сопротивления грунта от угла резания.** Испытания показали, что зависимость сопротивления разрушению от угла резания имеет сложный характер. С увеличением угла резания сопротивление падает до определенного минимального значения, а затем начинает расти (вначале медленно, а потом ускоренно). Для вязких грунтов это связано в первую очередь с функциональной зависимостью силы трения и вязкого сопротивления рабочей среды от длины ножа при изменении угла резания на одной и той же глубине.

Наиболее четко характер функции  $F(\alpha)$  проявляется при большой толщине стружки, рис.6, а. Это можно объяснить увеличением составляющей вырезания пласта грунта по бокам ножа и более выраженным сдвигом фрагментов стружки.

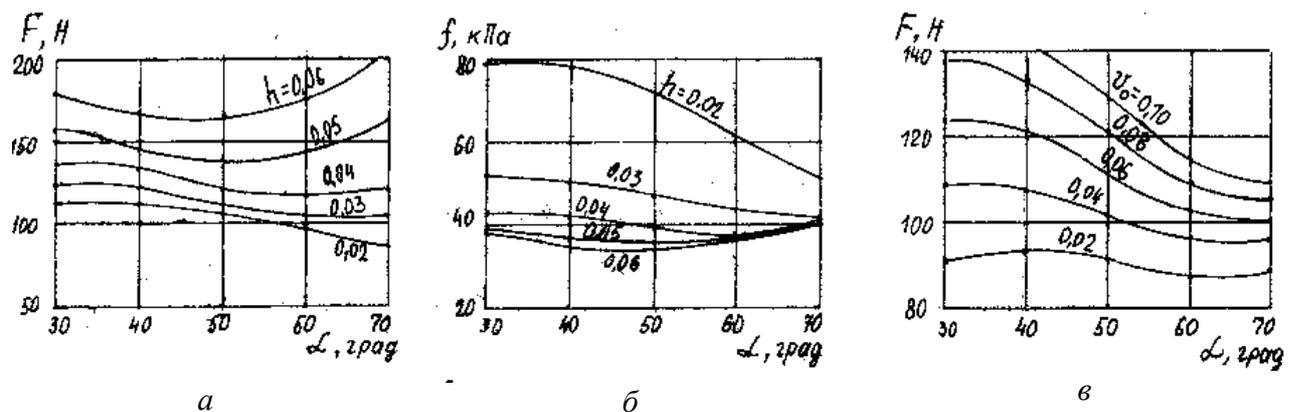


Рис.6. Зависимости сопротивления донных осадков сцеплением  $\tau_0 = 5000$  кПа и вязкостью  $\mu = 900$  кПа·с от угла резания ножом шириной  $b = 0,08$  м и длиной  $l = 0,06$  м

Особенностью разрушения структурно ослабленных вязкопластичных осадков является смещение оптимального угла резания, соответствующего минимальному сопротивлению грунта в сторону больших значений. Так, по данным [5] для суглинка оптимальным углом резания под водой является  $\alpha_{\text{опт}} = 30 \dots 40^\circ$ . На слабых донных осадках область оптимальных значений  $\alpha_{\text{опт}} = 45 \dots 65^\circ$ , при этом удельное сопротивление  $f$  от угла резания  $\alpha$  на глубине  $h = 0,03 \dots 0,06$  м практически не изменяется, поскольку прямоугольная форма прорези подобна во всех опытах, рис.6, б.

Для достаточно широких ножей ширина режущей кромки не влияет на характер зависимости сопротивления грунта от угла резания. Форма кривой  $F(\alpha)$  сохраняется и для узких ножей, при этом уровень силы сопротивления  $F$  несколько снижается, а удельной силы  $f$  – повышается. В обоих случаях угол резания может быть учтен при решении плоской задачи с ограничениями, показанными на рис.3.

Короткий нож при отношении длины его лобовой поверхности к глубине прорези  $\frac{l}{h} \leq 1,2 \dots 1,5$  (в распространенном случае  $l \approx \frac{h}{\sin \alpha}$ ) уменьшает оптимальный угол резания до  $\alpha_{\text{опт}} = 45 \dots 50^\circ$ . Соотношение  $\frac{l}{h} > 1,5$  приводит к сдвигу  $\alpha_{\text{опт}}$  в большую сторону, до  $60^\circ$  и более. В этом случае более выгоден процесс не резания, а раздвигания путем



вдавливания грунта в боковые стороны прорези (без отделением стружки), который часто применяют при добыче гранулированных полезных ископаемых из вмещаемого грунта.

Влияние скорости резания  $v_0$  на зависимость  $F(\alpha)$  наиболее интенсивно проявляется при малых углах резания,  $\alpha_{\text{опт}} < 30^\circ$ . Чем выше скорость движения ножа, тем больше зависимость сопротивления осадка от угла резания (кривые  $F$  с увеличением  $\alpha$  падают круче), рис.6, в. Оптимальные углы резания (по минимуму сопротивления  $F_{\text{min}}$ ) с ростом скорости  $v_0$  от 0,02 до 0,10 м/с сдвигаются в большую сторону и принимают значения  $\alpha_{\text{опт}} = 60...70^\circ$ .

Уменьшение критерия подобия  $k = \frac{\mu v_0}{\tau_0 h} \cos^2 \alpha \rightarrow 0$  (сухой грунт) расширяет диапазон оптимальных углов резания до значений  $\alpha_{\text{опт}} = 35...60^\circ$ . При  $k \rightarrow 0$  характеристики  $F$  и  $f$  с увеличением угла  $\alpha$  убывают, при  $k = 0,6$  они принимают минимальные значения, а при  $k > 0,6$  (жидкий грунт) – эти функции возрастают.

5. **Задний угол ножа**, образованный его нижней гранью и касательной к траектории перемещения режущей кромки  $\beta$ , не влияет на сопротивление разрушению донных осадков  $F$ , если резание проводят острым профилем. При резании глины и мела ножами фрезы, вращающейся с окружной скоростью 0,6...2,2 м/с, Огородниковым С.П. получена экспоненциальная зависимость  $F(\beta)$  при малых значениях заднего угла [5].

В наших опытах не подтвердилось предположение о том, что после прохождения ножа грунт благодаря упругому последствию вспучивается и создает давление на задней грани, даже при минимальных углах  $\beta$ . В испытаниях, проведенных Ветровым Ю.А. на тяжелом суглинке, также отмечено отсутствие каких либо существенных сил отпора на нижней грани ножа [2]. При малых скоростях резания, характерных для большинства землеройных машин отвального типа, наличие заднего угла  $\beta = 5...10^\circ$  режущего профиля обусловлено кинематикой рабочего процесса и микрорельефом грунтового массива.

Таким образом, величина заднего угла инструмента на сопротивление разрушению донных осадков не влияет.

6. **Зависимость сопротивления грунта от толщины ножа.** При резании грунта узкими ножами проявляется зависимость его сопротивления от величины боковой поверхности ножа, измеренной в направлении траектории движения инструмента. Краевой эффект возрастает с увеличением толщины ножа, глубины и угла резания.

Зависимости  $F(d)$  имеют общую закономерность: с увеличением толщины ножа сопротивление вначале растет до определенной величины, а затем падает. Так, на глубине резания  $h = 0,02$  м силы  $F$  и  $f$  принимают наибольшие значения при  $0,04 < d < 0,06$  м, а на глубине  $h = 0,05$  м – при  $d = 0,09$  м, рис.7, а. На тонких стружках область  $F_{\text{max}}(d)$  сужается, влияние толщины ножа падает, так как уменьшаются силы трения и вязкого сопротивления по боковым поверхностям инструмента, рис.7, б.

Чем меньше угол резания  $\alpha$ , тем скорее увеличение толщины ножа  $d$  приводит к неэффективному (по величине  $F$  и  $f$ ) режиму резания: при  $\alpha = 30^\circ$  максимум сопротивления  $F_{\text{max}}$  наступает при  $d = 0,03...0,05$  м, рис.7, в. И наоборот, увеличение угла  $\alpha$  до  $70^\circ$  снижает зависимость силы  $F$  от  $d$ : например, при толщине ножа  $d < 0,09$  м предпочтительным является резание осадка с углом  $\alpha = 70^\circ$ . Отсутствие заднего угла  $\beta$  соответствует протаскиванию пластины (штампа, плоского днища машины) по грунту, при этом зависимость сопротивления  $F$  от величины  $d$  практически прямопропорциональна.

С увеличением размера  $d$  возрастает влияние вязкости  $\mu$  и сцепления  $\tau_0$  грунта. Зависимость  $F(d)$  – замедленно возрастающая функция. При резании более прочных

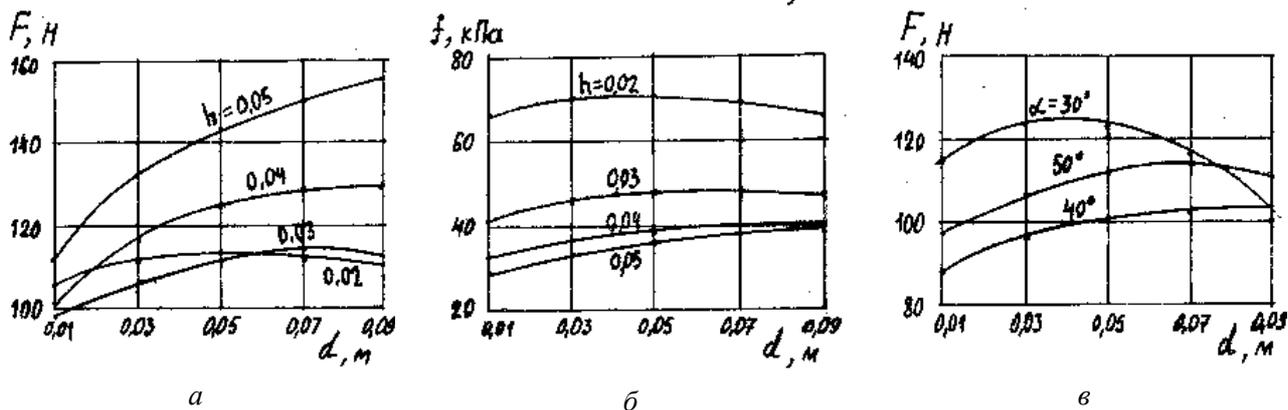


Рис.7. Зависимости сопротивления осадков от толщины боковой поверхности ножа, имеющего ширину  $b = 0,08$  м, длину  $l = 0,06$  м при скорости резания  $v_0 = 0,06$  м/с

грунтов (критерий подобия процесса  $k = \frac{\mu v_0}{\tau_0 h} \cos^2 \alpha < 0,2$ ) кривая  $F(d)$  имеет максимум, который при  $k \rightarrow 0$  смещается в сторону меньших значений  $d$ .

7. **Зависимость сопротивления грунта от скорости резания.** Увеличение скорости в пределах  $v_0 = 0,02 \dots 0,10$  м/с приводит к возрастанию сил сопротивления, как на лобовой, так и боковых поверхностях инструмента, рис.8, а. С углублением прорези  $h$  удельное сопротивление грунта  $f(v_0)$  в функции скорости резания понижается, рис.8, б. Изменение ширины, заднего угла и толщины ножа на характер зависимостей (форму кривых)  $F(v_0)$  и  $f(v_0)$  практически не влияют. С увеличением угла резания уменьшается зависимость сопротивления грунта от скорости резания, которая при  $\alpha = 30^\circ$  почти

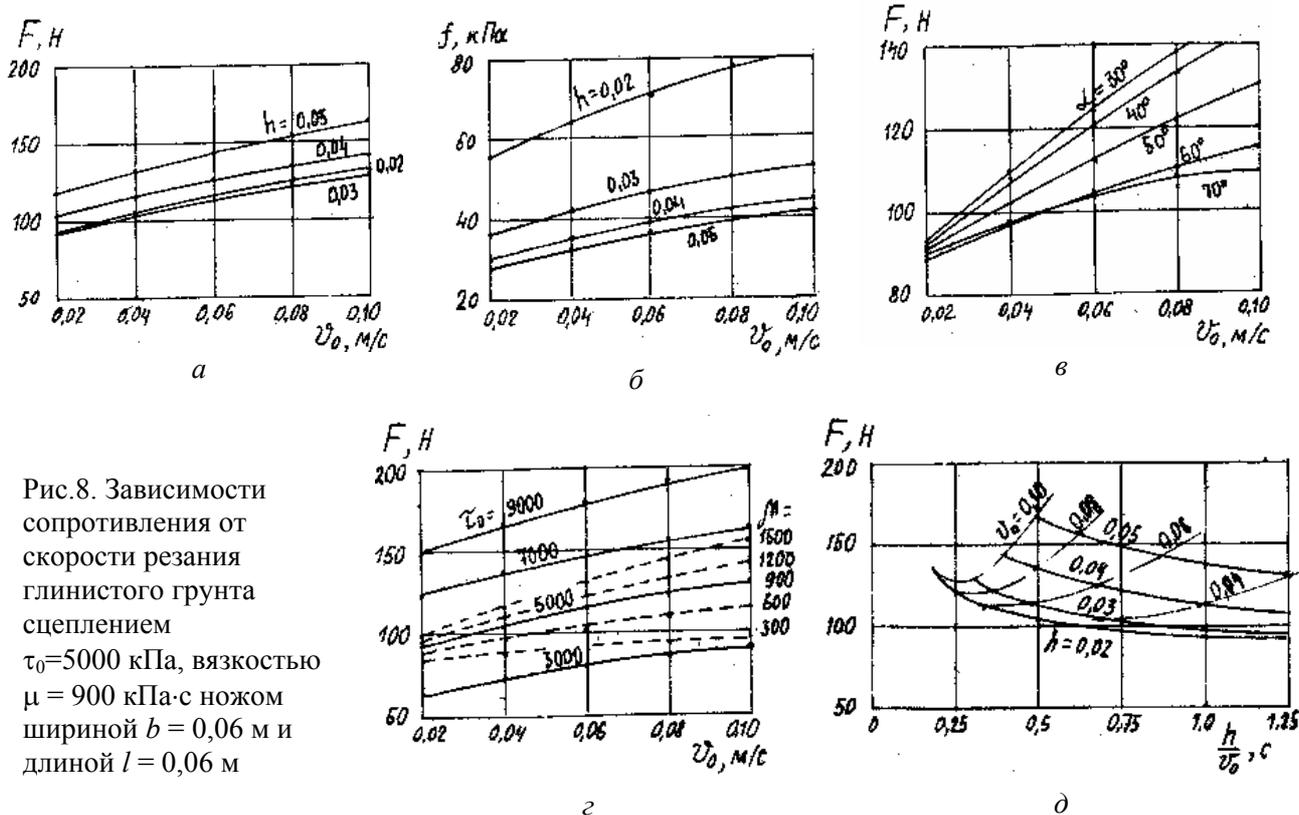


Рис.8. Зависимости сопротивления от скорости резания глинистого грунта сцеплением  $\tau_0 = 5000$  кПа, вязкостью  $\mu = 900$  кПа·с ножом шириной  $b = 0,06$  м и длиной  $l = 0,06$  м



прямая, а при  $\alpha = 70^\circ$  – замедленно растущая кривая, рис.8, в.

Повышение скорости, равно как и удлинение ножа, приводит к перераспределению составляющих  $F(v_0)$ . Сопротивление по сторонам ножа увеличивается до значения сопротивлений, расходуемых на трение и преодоление сил вязкости вдоль лобовой поверхности инструмента, играя более существенную роль при разрушении грунта. Повышение вязкости грунта  $\mu$  интенсифицирует зависимости  $F(v_0)$  при увеличении скорости, рис. 8, з. Сцепление  $\tau_0$ , сохраняя форму кривых, изменяет абсолютные значения сопротивления грунта. Взаимное влияние глубины и скорости резания показывает ускоренную зависимость сопротивления от этих параметров, рис.8, д.

Критерии подобия процесса резания  $K = \frac{\mu v_0}{\tau_0 h} = 0,5 \dots 0,6$ ;  $k = K \cos^2 \alpha \approx 0,2$ . Соотноше-

ние жидкой и твердой зон вдоль лобовой поверхности ножа  $\varepsilon = \frac{y_2}{y_1} = 0,13 \dots 0,14$ , а касательное

напряжение, вызванное вязким сопротивлением, приближается к величине сцепления грунта. Под водой рост сопротивлений от скорости идет более интенсивно, чем в атмосферных условиях из-за повышенной плотности и вязкости окружающей среды.

Зависимости  $F(v_0)$  и  $f(v_0)$  исследованы на относительно небольших скоростях, при  $v_0 \leq 0,1$  м/с. Дальнейший рост скорости резания приводит к более интенсивному ускорению сопротивления грунта, обусловленному не только динамичностью процесса, но и качественным изменением характера разрушаемой среды. Так, пластические деформации в определенных условиях (при скорости несколько десятков метров в секунду) могут переходить в хрупкое разрушение. Однако для глубоководных машин высокие скорости не рациональны из-за повышенных энергетических затрат на преодоление гидродинамического сопротивления среды рабочими органами.

**8. Зависимость сопротивления разрушению от вязкости осадков.** Вариация геометрических размеров прорези ( $b, h$ ) и размеров ножа ( $l, d, \alpha, \beta$ ) зависимости сопротивления разрушению донных осадков  $F$  от вязкости  $\mu$  принципиально не меняет. Угол резания  $\alpha$  в пределах  $0 \dots 90^\circ$  оказывает обратное влияние на сопротивлении грунта, так как в функции  $\sin \alpha$

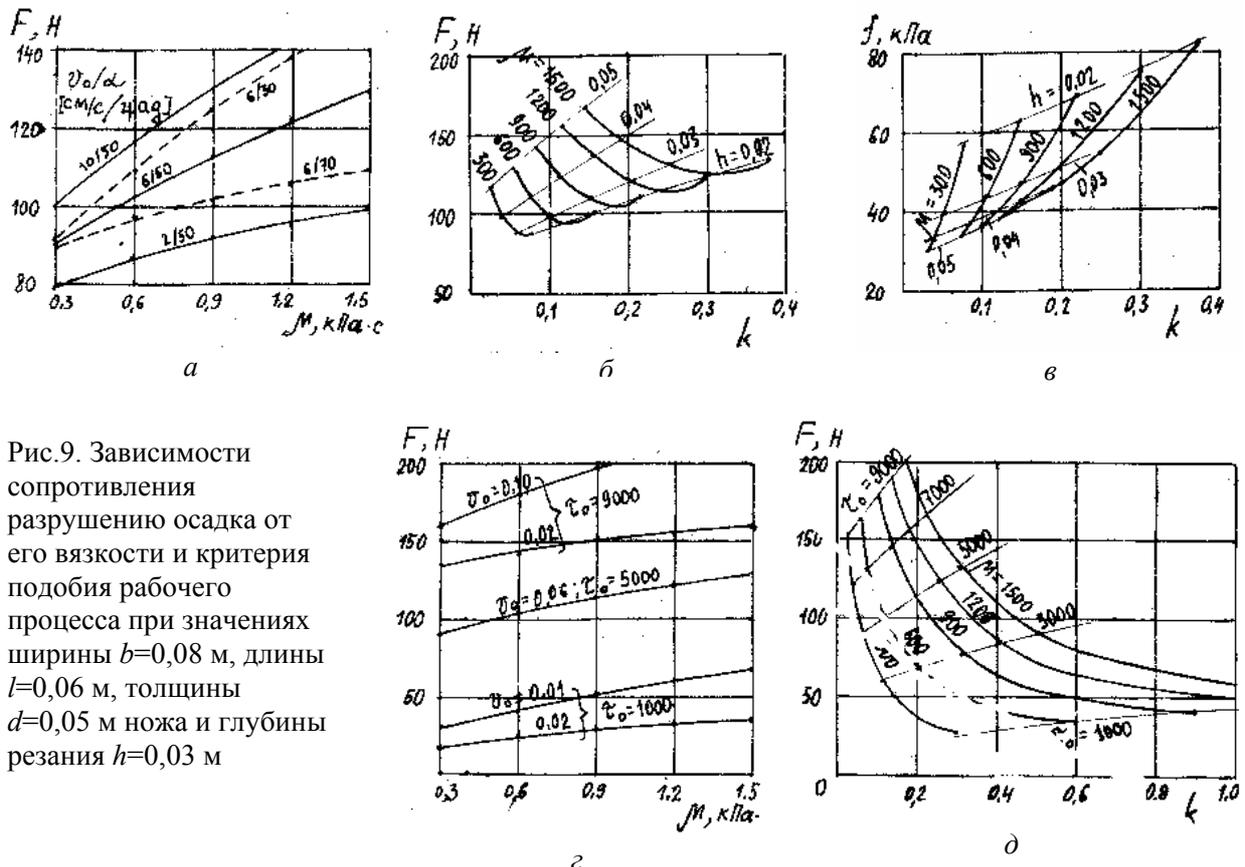


Рис.9. Зависимости сопротивления разрушению осадка от его вязкости и критерия подобия рабочего процесса при значениях ширины  $b=0,08$  м, длины  $l=0,06$  м, толщины  $d=0,05$  м ножа и глубины резания  $h=0,03$  м

изменяет длину контакта стружки по инструменту, рис.9, а. Составляющие сопротивления трению на лобовой и боковых поверхностях ножа практически постоянны. Скорость  $v_0$  и сцепление грунта  $\tau_0$  пропорционально изменяют уровень зависимостей  $F(\mu)$ , рис.9, з.

Для «сухого» грунта (критерии подобия  $K = 0,02...0,1$ ;  $k = 0,02...0,05$ ;  $\varepsilon = 0,03...0,09$ ;  $\eta = 0,2...0,5$ ) влияние вязкости сказывается при увеличении скорости,  $v_0 > 0,04$  м/с. В «жидком» грунте (критерии подобия  $K > 0,6$ ;  $k > 0,25$ ;  $\varepsilon > 0,15$ ;  $\eta > 1,2$ ) составляющая вязкого сопротивления играет главенствующую роль, рис.9, б, в. Так, изменение вязкости в диапазоне  $900 < \mu < 1500$  Па·с при скоростях ножа  $v_0 = 0,02$  и  $0,1$  м/с привело к следующим результатам. Соотношение сил вязкого сопротивления  $F_4$  и трения  $F_3$  по сторонам ножа в относительно прочных донных осадках сцеплением  $\tau_0 = 9000$  кПа ( $0,04 < K < 0,2$ ) увеличилось от  $1...2$  до  $2,2...4$ ; в структурно слабых осадках, при малом сцеплении  $\tau_0 = 1000$  кПа ( $0,2 < K < 1$ ), отношение  $\frac{F_4}{F_3}$  возросло от  $2...3,8$  до  $4...8$ .

На структурно более прочных грунтах ( $K < 0,1$ ;  $k < 0,05$ ), величина  $F_4$  превышает  $F_3$  только при больших значениях вязкости,  $\frac{F_4}{F_3} = 1$  при  $\mu \approx 650$  Па·с, рис.9, д. При увеличении скорости  $v_0$  область равного влияния на сопротивление разрушению грунта составляющих вязкости  $F_4$  и сцепления  $F_3$  смещается в сторону меньших значений  $\mu$ .

**9. Зависимость сопротивления разрушению от сцепления донных осадков.** Сопротивление разрушению глинистых осадков находится в пропорциональной зависимости от ширины  $b$  и глубины прорези  $h$ , длины  $l$  и толщины ножа  $d$ , угла резания  $\alpha$  и заднего угла  $\beta$  инструмента, рис.10, а. Увеличение угла резания  $\alpha$  снижает

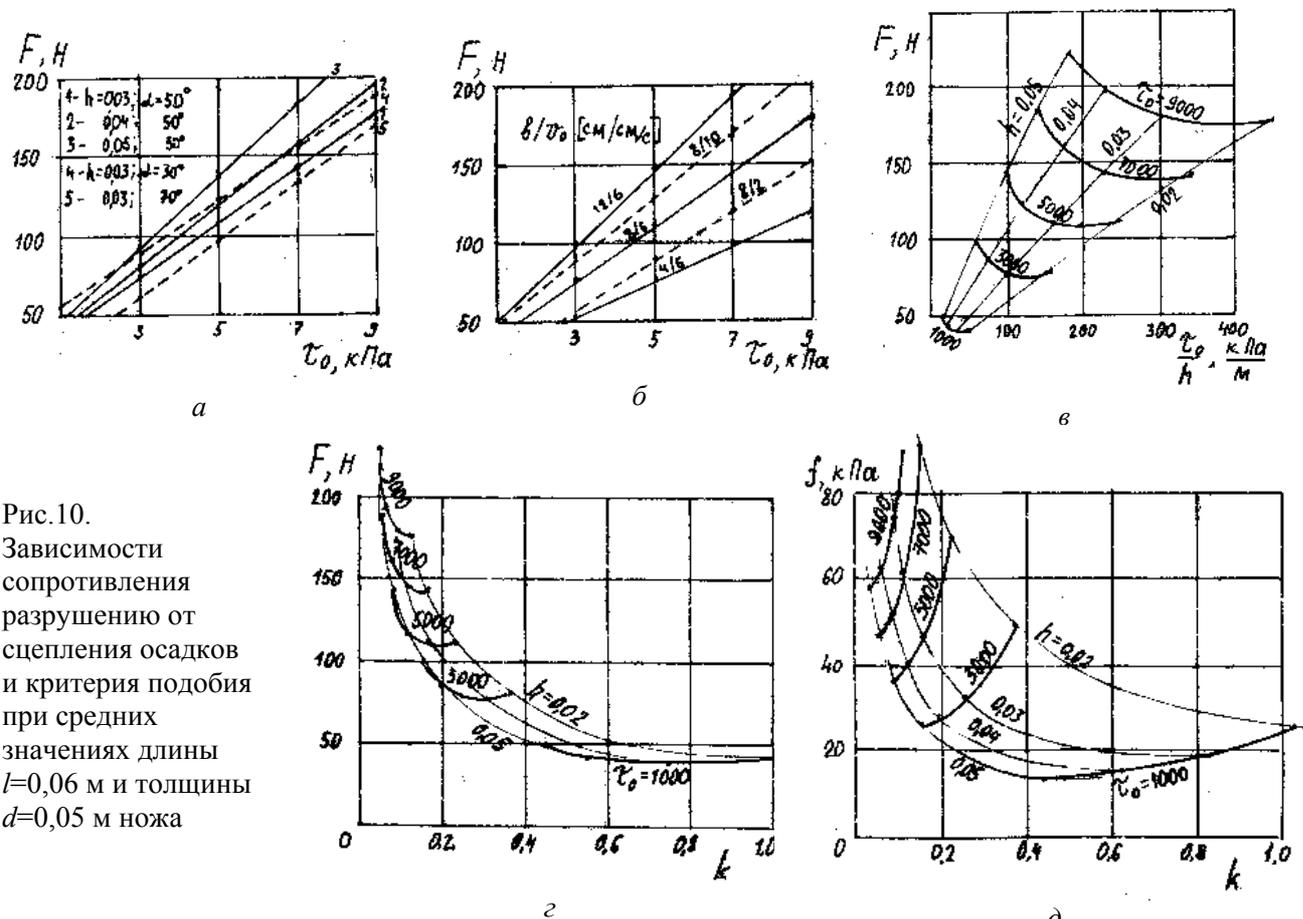


Рис.10. Зависимости сопротивления разрушению от сцепления осадков и критерия подобия при средних значениях длины  $l=0,06$  м и толщины  $d=0,05$  м ножа



сопротивление разрушению, поскольку при одинаковой глубине резания контакт стружки с ножом меньше. Увеличение ширины ножа  $b$ , равно как и скорости резания, приводит к незначительной интенсификации роста функции  $F(\tau_0)$ , рис.10, б. С глубиной  $h$  размах зависимости сопротивления  $F$  от сцепления  $\tau_0$  возрастает, рис.10, в.

Основной вклад в сопротивление вносят силы трения стружки по лобовой поверхности и давления, необходимого на преодоление вязкого трения, а также силы сдвига фрагментов сливной стружки и вырезание ее боковыми гранями ножа. В осадках сцеплением  $\tau_0 = 9000$  кПа уменьшение вязкости до значения  $\mu = 200$  кПа·с приводит к выравниванию силы вязкого сопротивления  $F_4$  и силы трения  $F_3$  на боковых сторонах ножа. Дальнейшее снижение вязкости до  $\mu = 30...80$  кПа (техногенный ил) уменьшает долю и для более слабых грунтов – со сцеплением  $\tau_0 = 1000$  кПа.

Критерий подобия  $k = \frac{\mu v_0}{\tau_0 h} \cos^2 \alpha$  комплексно характеризует зависимость сопротив-

ления осадков от факторов рабочего процесса, рис.10, з, д. Так, с ростом  $k$ , что соответствует увеличению вязкости  $\mu$ , скорости  $v_0$  или угла резания  $\alpha$ , либо уменьшению сцепления  $\tau_0$  и глубины прорези  $h$ , резание все больше приобретает характер процесса, при котором нож движется в жидкой среде. Установлена связь между основным критерием подобия процесса подводного резания  $k$  и соотношением зон (объемов) жидкой  $y_2$  и твердой  $y_1$  фаз грунта в зоне контакта инструмента с грунтом:

$\varepsilon = \frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{9} \left( \sqrt{9k + k^2} - k \right)$ . Критерий  $\eta = \frac{\tilde{\tau}_l}{\tau_0}$ , динамически и геометрически

характеризующий процесс подводного резания ( $\tilde{\tau}_l$  – касательное напряжение, вызванное вязким сопротивлением грунта), также определяется через основной критерий:

$\eta = \frac{2}{3} \left( \sqrt{9k + k^2} + k \right)$ . Между собой они связаны соотношением  $\varepsilon \eta = \frac{2}{3} k$ . Напряженно-

деформированное состояние системы «грунт-рабочий орган» подчиняется законам гидродинамики и описывается в соответствии с моделью [6].

Уменьшение критерия подобия до минимальных значений,  $k \rightarrow 0$ , возвращает процесс резания грунта к обычным «сухопутным» условиям; взаимодействие инструмента со средой в этом случае описывается на основании законов статики сыпучих сред [7].

Анализ составляющих сопротивления разрушению донных осадков аналитическим и графическим способами, позволил выявить закономерности абсолютных и удельных значений сил сопротивления от отдельных факторов рабочего процесса. По результатам испытаний создан банк данных сопротивления разрушению подводных грунтов, использованный в НИПИОкеанмаше (Днепропетровск), СКТБ Техники морских геологоразведочных работ (Мурманск), СКБ Океангеотехника (Новороссийск), НИИ строительного-дорожного и инженерной техники (Киев) при разработке и испытании глубоководных землеройных систем.

### Список литературы

1. Сукач М.К. Критериальные требования к моделированию рабочего процесса подводных машин // Гірн., буд., дор. та меліорат. машини: Всеукр. міжвід. наук.-техн. зб.– К.: КНУБА, 2001.- Вип. 58.- С.22-24.
2. Ветров Ю.А. Резание грунтов землеройными машинами. – М.: Машиностроение, 1971.- 357 с.
3. Кравець С.В. Грунтозахисні та енергозберігаючі машини для прокладки підземних комунікацій.– Рівне: Вид-во РДТУ, 1999.- 277 с.
4. Шатов С.В. Разработка и исследование параметров рабочих органов рыхлителей ступенчатого типа для разрушения мерзлых и прочных грунтов: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.05.04.- М., 1987.- 20 с.
5. Огородников С.П. Гидромеханизация разработки грунтов.– М.: Стройиздат, 1986.- 256 с.
6. Сукач М.К. Взаимодействие ножа землеройной машины с вязкопластичным грунтом // Техніка будівництва.– 2001.- № 9.- С.53-59.
7. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды.– М.: Гостехтеориздат, 1954.- 334 с.