

УДК 622.24.085

**А. А. Каракозов**, канд. техн. наук, доцент

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР, Россия

E-mail: [karakozov@donntu.ru](mailto:karakozov@donntu.ru)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ БУРОВЫХ СНАРЯДОВ ПРИ БУРЕНИИ ГЕОЛОГОРАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН НА МОРСКОМ ШЕЛЬФЕ УДАРНЫМ СПОСОБОМ

*В статье представлены результаты исследований по созданию технологий и технических средств бурения геологоразведочных и инженерно-геологических скважин, в том числе и на шельфовых нефтегазовых месторождениях, базирующиеся на использовании гидроударных буровых механизмов.*

**Ключевые слова:** шельф, разработка нефтегазовых месторождений, инженерно-геологические изыскания, геологоразведочные работы, бурение, пробоотбор, динамические процессы.

**А. А. Karakozov**

### INVESTIGATION OF THE DYNAMICS OF DRILLING PIECE WHEN DRILLING EXPLORATION WELLS ON THE SEA SHELF BY THE IMPACT METHOD

*The results of the development of technologies for drilling geological engineering wells during the development of offshore oil and gas fields, based on the use of water driven hammer drilling tools, are presented.*

**Keywords:** shelf, development of oil and gas fields, engineering and geological surveys, drilling, sampling, dynamic processes.

Настоящее время характерно активным освоением углеводородных – нефтяных и газовых – ресурсов морского шельфа, осуществляется добыча твёрдых полезных ископаемых (в том числе, и строительных материалов) на морских месторождениях. Для решения этих задач необходимы большие объёмы геологоразведочного бурения: для разведки полезных ископаемых и для инженерно-геологических изысканий, обеспечивающих строительство морской инфраструктуры по добыче и транспортировке углеводородного сырья. Большинство таких скважин приходится на породы песчано-глинистого комплекса I–IV категорий по буримости при глубинах моря до 60–80 м (весьма редко – до 200 м).

Скважины глубиной до 100 метров могут проходиться как с бурового судна, так и с плавучей самоподъёмной буровой установки (СПБУ). При бурении в инженерно-геологических целях отбор монолитов в мягкопластичных грунтах проводится вдавливаемыми пробоотборниками, а отбор монолитов и проб в плотных, полутвёрдых глинистых грунтах и песках различной плотности – гидроударными буровыми снарядами (ГБС) или гидравлическими забивными пробоотборниками (ГЗП), реализующими ударный способ погружения в горную породу. В других случаях ГБС и ГЗП могут использоваться по всей глубине скважины.

По заданию ГАО «Черноморнефтегаз» была разработана технология поинтервального бурения (рис. 1) и технические средства для её реализации, в том числе и гидроударные буровые снаряды и гидравлические забивные пробоотборники [1, 2].

Суть технологии заключается в следующем (рис. 1). С СПБУ спускается колонна обсадных труб диаметром 219 или 245 мм. Её башмак устанавливается выше дна моря на расстоянии 1,5–2 м. Затем спускается колонна обсадных труб диаметром 146 мм, предназначенная для крепления скважины в процессе проходки. Если первый рейс по отбору пробы планируется проводить ГБС, то колонну останавливают на расстоянии 0,5 м от дна во избежание заклинивания снаряда. Если же планируется использовать вдавливаемый пробоотборник, то колонну опирают на дно. После этого начина-

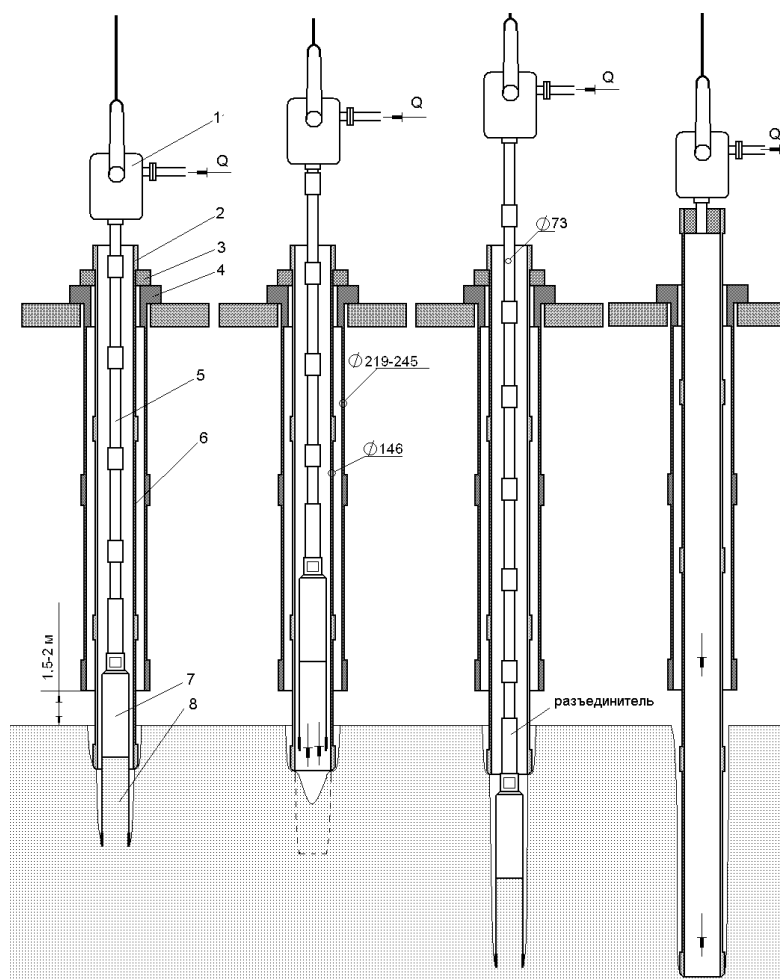


Рисунок 1. Технологическая схема поинтервальной проходки скважин с СПБУ: 1 – вертлюг-сальник; 2 – муфта обсадной колонны  $\phi 146$  мм; 3 – хомут; 4 – головка обсадной колонны  $\phi 219-245$  мм; 5 – бурильные трубы  $\phi 73$  мм; 6 – обсадная колонна  $\phi 146$  мм; 7 – ГБС (ГЗП); 8 – керн; Q – подача жидкости.

на СПБУ, где из колонковой трубы извлекается керн. Обсадную колонну диаметром 146 мм заглубляют в грунт на глубину, не превышающую длину рейса.

Второй и последующие рейсы выполняются следующим образом. ГБС спускается в скважину на бурильной колонне момента появления разгрузки инструмента. Если она произошла в момент, когда ГБС не дошёл до забоя, то это свидетельствует об частичном обрушении стенок скважины. Тогда к верхней бурильной трубе присоединяются бурильные трубы с вертлюгом-сальником таким образом, чтобы при дальнейшей подаче снаряда обеспечивалась установка ГБС на забой и проходка на длину рейса. Запускается буровой насос, и рабочая жидкость подается в ГБС с расходом, достаточным для срабатывания его нижнего пускового узла, обеспечивающего размыв пород на забое скважины. В таком режиме ГБС опускается на глубину выше отметки забоя скважины на 0,1 м.

После этого насос кратковременно выключается, и пусковой узел возвращается в исходное положение, обеспечивающее отбор пробы грунта. При помощи питателя в нагнетательную линию сбрасывается шарик. Буровой насос снова включается. Срабатывает верхний пусковой узел и запускается гидроударник. Выполняется бурение на

ется отбор проб.

В зависимости от средства отбора керна предусматривается применение двух компоновок бурового снаряда:

1. При бурении тугопластичных глин, суглинков, песков различной консистенции – гидроударный буровой снаряд (забивной пробоотборник) с диаметром корпуса 108 мм, спускаемый в скважину на бурильных трубах диаметром 73 мм;

2. В мягкопластичных грунтах – вдавливаемый пробоотборник с диаметром корпуса 102 мм, спускаемый в скважину на бурильных трубах диаметром 73 мм, при этом над пробоотборником устанавливается секция УБТ диаметром 89 мм массой не менее 2-2,5 т, обеспечивающая внедрение пробоотборника в глинистые грунты.

При первом рейсе производится бурение на заданную длину рейса (обычно – до 3 м). После выключения гидроударника ГБС на бурильных трубах поднимается

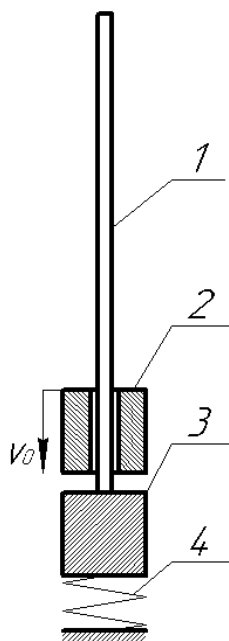


Рисунок 2. Модель ударного бурения: 1 – стержень (бурильные трубы); 2 – боёк (масса  $M$ ); 3 – пробоотборник (масса  $M_0$ ); 4 – грунт с упругой характеристикой.

заданную длину рейса. Расход жидкости уменьшается до остановки гидроударника, ГБС поднимается в полость обсадных труб, а после выключения насоса – на поверхность для извлечения керна.

После углубки скважины на длину обсадной трубы (9–12 метров) обсадная колонна диаметром 146 мм наращивается ещё одной трубой с установленным в верхней части вертлюгом-сальником. Затем обсадная колонна с расхаживанием и промывкой спускается до достигнутого ранее забоя скважины.

Данная технология и технические средства прошли апробацию при выполнении инженерных геотехнических исследований площадки под строительство платформы блок-кондукторов Субботинского нефтегазового месторождения в Черном море. С СПБУ «Сиваш» была пробурена скважина глубиной 78 м, при этом было отобрано 60 проб (из них 30 – монолиты).

Результаты испытаний в производственных условиях показали возможные пути совершенствования данной технологии, в том числе, с точки зрения выбора рациональной компоновки бурового снаряжения, использования бурильных труб меньшего диаметра, статических и динамических утяжелителей, определения места установки разъединителя и т.д.

При проведении этих исследований были рассмотрены вопросы определения параметров динамических процессов в бурильных трубах при ударном способе проходки скважин, который реализуется при использовании гидроударных буровых снарядов или забивных пробоотборников.

В частности, была рассмотрена следующая модель (рис. 2). Упругий стержень длиной  $l$  с массой единицы длины  $m$  и жёсткостью  $EF$  соединён с сосредоточенной массой  $M_0$ , по которой со скоростью  $v_0$  ударяет масса  $M$ . Система опирается на упругое основание с жёсткостью  $c_0$ . Динамические процессы такой системы с распределёнными параметрами описываются волновым уравнением:

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} - c^2 \frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial t^2} = \frac{q(x,t)}{m}, \tag{1}$$

где  $u$  – перемещение сечения стержня с координатой  $x$  в момент времени  $t$  (ось  $x$  направлена вверх от массы  $M_0$ );  $c$  – скорость распространения упругих деформаций;  $q$  – интенсивность возмущающей распределённой нагрузки (для нашей задачи её нет).

Решение однородного уравнения, полученного из (1), известно в виде [3]:

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x) \sin(\omega_n t + \mu_n). \tag{2}$$

Уравнение перемещений сечений стержня  $u(x)$  можно принять в начальных параметрах:

$$u(x) = u_0 \cos kx + \frac{N_0}{kEF} \sin kx. \tag{3}$$

Если усилие в начале координат  $N_0$  выразить через перемещение  $u_0$ , то получим решение в собственных функциях  $X(x)$ :

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x) \sin(\omega_n t + \mu_n), \quad (4)$$

где  $n$  – номер произвольной гармоники колебаний с частотой  $\omega_n$  и начальной фазой  $\mu_n$ , которые определяются из граничных и начальных условий через волновые числа  $k_n$ :

$$\omega_n = k_n c = k_n \sqrt{\frac{EF}{m}} \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \mu_n = \frac{u_0}{v_0} \omega_n, \quad (6)$$

Поскольку начало координат принято на нижнем конце стержня, то решение уравнения (1) можно выразить через один начальный параметр  $u_0$ , используя граничное условие на нижнем конце стержня – уравнение динамического равновесия всех сил, приложенных к массам  $M$  и  $M_0$ :

$$N_0 + c_0 u_0 + M^* \ddot{u}(0) = 0,$$

где  $M^* = M + M_0$ .

Так как ускорение движения масс  $\ddot{u}(0) = -\omega^2 u(0)$ , то с учетом частоты колебаний (5) получим:

$$N_0 = u_0 \left( \frac{M^* k^2 EF}{m} - c_0 \right) = u_0 k EF \left( \xi \lambda - \frac{\bar{c}}{\lambda} \right), \quad (7)$$

где:  $\xi = \frac{M^*}{ml}$  – отношение сосредоточенных масс к массе стержня,  $\lambda = kl$  – собствен-

ные числа трансцендентного частотного уравнения,  $\bar{c} = \frac{c_0 l}{EF}$  – коэффициент жесткости упругого основания.

С учетом усилия (6) уравнение перемещений сечений (2) можно представить в собственных функциях  $X(x)$ :

$$u(x) = u_0 \left[ \cos kx + \left( \xi \lambda - \frac{\bar{c}}{\lambda} \right) \sin kx \right] = u_0 X(x). \quad (8)$$

Так как на стержне с распределенной массой  $m$  имеется сосредоточенная масса  $M^*$ , то собственные функции будут ортогональными с весом.

Весовую функцию для нашего случая находим по теореме Бетти [3]:

$$\rho(x) = m(1 + \xi l \delta(x)), \quad (9)$$

где  $\delta(x)$  – дельта-функция Дирака.

Используя граничное условие ( $x=l, N(l)=0$ ), с учётом (7) получаем частотное уравнение

$$\left( \xi \lambda - \frac{\bar{c}}{\lambda} \right) \cdot \operatorname{tg} \lambda = 1. \quad (10)$$

Из условия возбуждения собственных колебаний начальной скоростью движения  $v_0$  при  $u_0=0$  на основании (6) находим  $\mu=0$ .

Рассмотрим начальное условие, требующее, чтобы при  $t=0$  скорость движения всех сечений была равна нулю, кроме сечения, по которому наносится удар:

$$\dot{u}(x, 0) = v_0 e^{-x}.$$

Так с учётом квадрата нормы собственных функций  $\Delta_n^2$  находим амплитудное перемещение

$$u_0 = v_0 \frac{2\xi l}{\omega l \Delta_n^2} = v_0 \frac{2\xi l}{\lambda c \left[ X(l) + 3\xi - \frac{\bar{c}}{\lambda^2} \right]}$$

и уравнение движения сечений

$$u(x, t) = v_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\xi l \cdot X_n(x) \sin \omega_n t}{\lambda_n c \left[ X^2(l) + 3\xi - \frac{\bar{c}}{\lambda^2} \right]}. \quad (11)$$

К этому решению нужно добавить воздействие внезапного приложения веса  $Q$  от груза массой  $M$ . Уравнение движения сечений от внезапного приложения груза  $Q$  будет иметь вид:

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} 2Q \frac{X_n(x)(1 - \cos \omega_n t)}{m \cdot k_n^2 c^2 \cdot l \Delta_n^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2Ql}{EF \lambda^2} \cdot \frac{X_n(x)(1 - \cos \omega_n t)}{\left[ X^2(l) + 3\xi - \frac{\bar{c}}{\lambda^2} \right]}. \quad (12)$$

Суммируя (10) и (11), в итоге получаем:

$$u(x, t) = 2 \frac{Ql}{EF} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos k_n x + \left( \xi \lambda_n - \frac{\bar{c}}{\lambda_n} \right) \sin k_n x}{\lambda_n^2 \cdot \left[ \left( \cos \lambda_n + \left( \xi \lambda_n - \frac{\bar{c}}{\lambda_n} \right) \right)^2 + 3\xi - \frac{\bar{c}}{\lambda_n^2} \right]} \cdot \left( 1 - \cos \omega_n t + \sqrt{\frac{v^2 \eta}{gf} \lambda_n^2} \right), \quad (13)$$

где  $\eta = \frac{M}{ml}$ ,  $f = \frac{Ql}{EF}$  – квазистатическое растяжение стержня от падающего груза.

Из (13) дифференцированием находим уравнение внутренних усилий:

$$N(x, t) = 2Q \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_n} \cdot \frac{-\sin kx + \left( \xi \lambda - \frac{\bar{c}}{\lambda} \right) \cos kx}{\left[ \left( \cos \lambda + \left( \xi \lambda - \frac{\bar{c}}{\lambda} \right) \right)^2 + 3\xi - \frac{\bar{c}}{\lambda^2} \right]} \cdot \left( 1 - \cos \omega_n t + \sqrt{\frac{v^2 \eta}{gf} \lambda_n^2} \right). \quad (14)$$

Оно позволяет определить максимальный динамический коэффициент для нашей задачи:

$$k_{\partial} = 1 + \sqrt{1 + \frac{v^2 \lambda_n^2}{gf} \eta}. \quad (15)$$

Приведенная выше методика позволяет определять параметры динамических процессов в бурильной колонне при ударном бурении горных пород, в частности гидроударными буровыми снарядами и забивными пробоотборниками.

Для совершенствования технологии бурения ГБС по результатам его эксплуатации были проведены дополнительные исследования по оценке влияния компоновки низа бурильной колонны на механическую скорость бурения.

Компьютерное моделирование проводилось на основании ранее проведенных

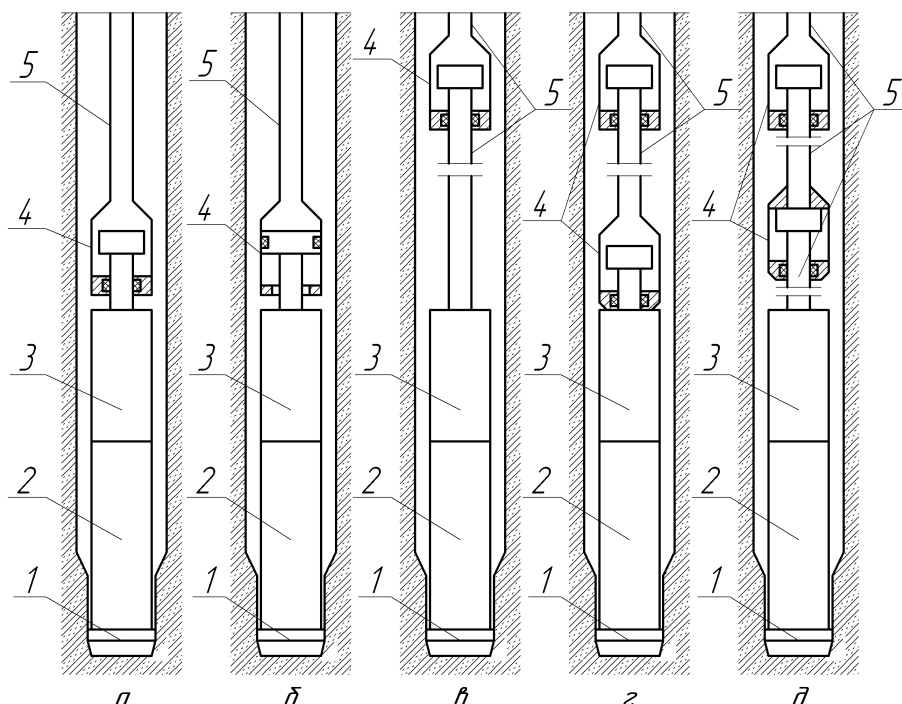


Рисунок 3. Схемы возможных компоновок низа бурильной колонны при эксплуатации ГДС: 1 – башмак, 2 – колонковый набор, 3 – гидроударник с распределительными узлами, 4 – разъединитель, 5 – бурильные трубы.

гетические и эксплуатационные параметры гидроударных буровых снарядов типа ПБС-110. При моделировании были рассмотрены пять компоновок низа бурильной колонны, схемы которых представлены на рис. 3.

В двух первых компоновках (рис. 3 а, б) ГДС отделён от бурильной колонны разъединителем, который обеспечивает его свободное заглубление в грунт без взаимодействия с бурильными трубами. Отличие заключается в лишь конструкции разъединителя, которая определяет значение дополнительной статической нагрузки, действующей на снаряд за счёт давления промывочной жидкости в бурильных трубах при отборе пробы. В третьей компоновке (рис. 3 в) между снарядом и разъединителем устанавливается секция бурильных труб, выполняющая функции статического утяжелителя. Четвёртая компоновка (рис. 3 г) предусматривает наличие двух разъединителей: один устанавливается непосредственно над снарядом, а второй – в колонне бурильных труб на различной глубине. Это даёт возможность использовать участок бурильной колонны между разъединителями как динамический утяжелитель, имеющий возможность ударного взаимодействия со снарядом. Пятая компоновка (рис. 3 д), в сущности, является комбинацией предыдущих двух компоновок, что позволяет создавать дополнительное статическое и динамическое нагружение снаряда при отборе пробы. Разъединители, используемые в трёх последних компоновках, могут иметь различные конструкции, соответствующие как первой, так и второй компоновкам. Кроме особенностей конструктивного исполнения компоновок при моделировании дополнительно учитывалось влияние глубины моря и работы насосного блока бурового снаряда на процесс его погружения в грунт, исследованное ранее [8]. Некоторые результаты компьютерного моделирования для отбора пробы на глубине 100 м представлены в табл. 1.

По результатам компьютерного моделирования можно сделать следующие вы-

исследований для гидроударных буровых снарядов погружных установок типа УМБ-130 [8, 9]. Исходными данными для моделирования являлись силы сопротивления, рассчитанные по методике И.Г. Шелковникова [10] на основании реальных характеристик грунтов, полученных ЗАО «Компания «Юговостокгаз» при статическом зондировании разреза в нескольких метрах от пройденной скважины, а также конструктивные, энер-

воды.

Таблица 1 – Изменение механической скорости бурения (м/мин) для различных компоновок низа бурильной колонны при эксплуатации буровых снарядов типа ПБС-110

Сопротивление внедрению ГБС, кН	Схема компоновки, рис. 3				
	а	б	в	г	д
30	1,2	1,92 (+60%)	1,615 (-16%)	2,03 (+6%)	1,307 (-32%)
50	0,57	0,69 (+21%)	0,563 (-18%)	0,72 (+4%)	0,243 (-65%)
70	0,375	0,426 (+14%)	0,345 (-19%)	0,504 (+18%)	0,402 (-6%)
90	0,28	0,308 (+10%)	0,248 (-19%)	0,39 (+27%)	0,188 (-39%)
110	0,223	0,241 (+8%)	0,194 (-19%)	0,33 (+37%)	0,172 (-29%)

**Примечание.** 1. Прирост механической скорости бурения для компоновки, выполненной по схеме рис. 3б, рассчитан по сравнению с компоновкой рис. 3а, а для компоновок, выполненных по схемам рис. 3 в, г, д, – по сравнению со схемой рис. 3б. Массы утяжелителей для компоновок по схемам рис. 3 в, г, д – 100 кг.

Значения механической скорости бурения (табл. 1), полученные для базовой компоновки (рис. 3а), в целом соответствуют данным эксплуатации буровых снарядов ПБС-110 при отборе проб песков в скважине на Субботинском нефтегазовом месторождении, что позволяет рассматривать их как подтверждение разработанной компьютерной модели.

Из табл. 1 видно, что использование разъединителя с большей рабочей площадью поршня (рис. 3 б), воспринимающей давление жидкости, более эффективно по сравнению с применением базовой компоновки (рис. 3 а) во всём спектре пород.

Анализ применения различных видов утяжелителей при использовании разъединителя показал, что применение статического утяжелителя не даёт положительного эффекта – механическая скорость бурения неизменно падает. Это также свидетельствует о том, что попытка увеличить длину рейса за счёт роста длины колонковой трубы приведёт к снижению механической скорости бурения.

А использование динамического утяжелителя даже небольшой массы может дать существенное повышение механической скорости бурения, особенно в более твердых породах. При этом с увеличением массы утяжелителя свыше 3–4 масс снаряда наблюдается однозначный рост скорости бурения, особенно в более мягких породах. А при росте массы утяжелителя до этого предела механическая скорость бурения меняется почти периодически, причём имеются значения масс утяжелителя, при которых механическая скорость бурения будет ниже, чем при использовании компоновки с одним разъединителем (рис. 4). Анализ этих зависимостей показывает, что при вышеописанной технологии бурения (рис. 1) на глубинах отбора пробы свыше 40 м от уровня воды можно использовать компоновки с разъединителем (рис. 3 а, б), но бурильные трубы должны подаваться в скважину свободно и находится в контакте с верхней частью ПБС-110. Это позволит использовать всю бурильную колонну в качестве динамического утяжелителя и даст существенный прирост механической скорости бурения за счёт того, что колонна будет ограничивать подскок снаряда над забоем, но не будет влиять на величину энергии, передаваемую снаряду от бойка гидроударника.

Одновременное использование статического и динамического утяжелителя также не даёт положительного эффекта. При этом наблюдается резкое снижение механической скорости бурения, как при росте массы статического утяжелителя, так и при росте силы сопротивления внедрению снаряда в грунт.

Результаты по использованию статического утяжелителя в буровом снаряде показывают, что в скважинной компоновке обязательно должен присутствовать разбеднитель, устанавливаемый непосредственно над снарядом.

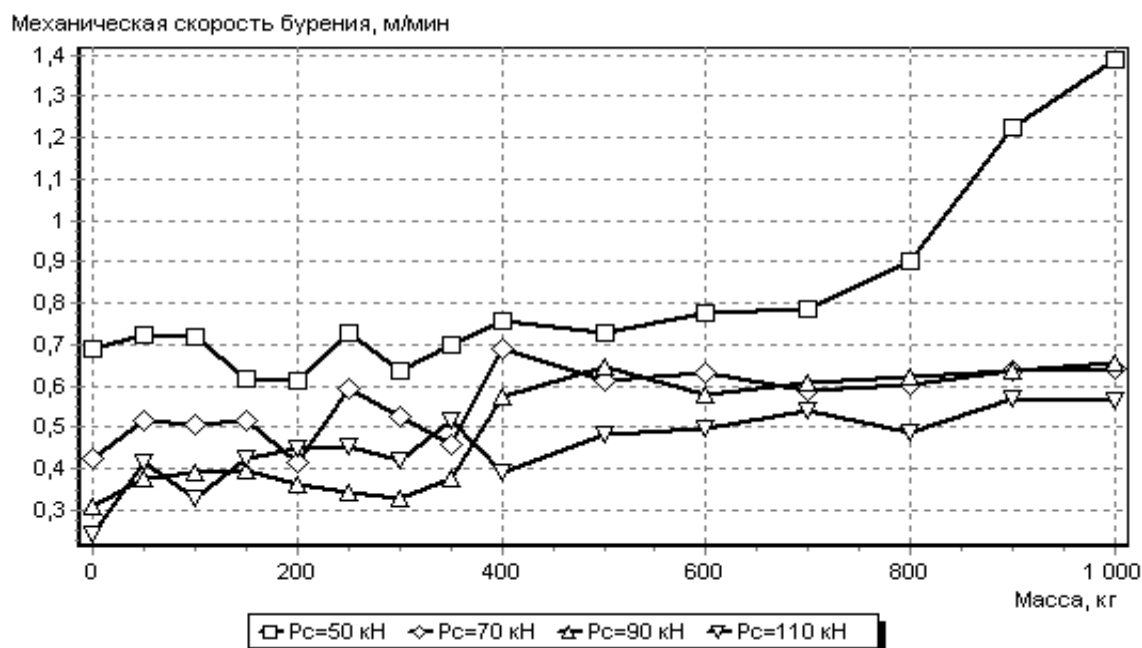


Рисунок 4. Графики зависимостей механической скорости бурения по результатам компьютерного моделирования отбора проб в скважинах снарядами ПБС-110 от массы динамического утяжелителя ( $P_c$  – сила сопротивления внедрению).

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Каракозов, А. А. Совершенствование технических средств и технологий отбора проб грунта при бурении геотехнических скважин с плавучих самоподъёмных установок на шельфе Чёрного моря / А.А. Каракозов, О. И. Калиниченко, П. В. Зыбинский, С. Н. Парфенюк, А. В. Хохуля, П. Л. Комарь // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения / Сборник научных трудов. – Вып. 11 – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ АЛКОН НАНУ, 2008. – С. 66–74.
2. Каракозов, А. А. Об использовании забивных пробоотборников с гидравлическим приводом при реализации технологии поинтервального бурения геотехнических скважин с буровых судов и самоподъёмных буровых установок / А. А. Каракозов // Научные труды ДонНТУ, Серия «Горно-геологическая». – Вып. 2(17). – Донецк, ДонНТУ, 2012. – С. 173–178.
3. Шевченко, Ф. Л. Строительная механика. Специальный курс. Динамика упругих стержневых систем. – Донецк: РИА ДонГТУ, 2000. – 293 с.
4. Каракозов, А. А. Оценка влияния конструктивных особенностей буровых снарядов на процесс их погружения в донные отложения при бурении разведочных скважин на шельфе / Научные труды ДонНТУ, Серия «Горно-геологическая». – Вып. 96. – Донецк, ДонНТУ, 2005. – С. 157–161.
5. Каракозов, А. А. Сравнительная теоретическая оценка влияния применения утяжелителей и колонковых наборов с подвижными трубами на эффективность процесса бурения донных отложений гидроударными буровыми снарядами / Наукові праці



ДонНТУ, Серія «Гірничо-геологічна». – Вип. 111. – Т.2. – Донецьк, ДонНТУ, 2006. – С. 113–118.

6. Шелковников, И. Г. Использование энергии удара в процессах бурения. – Л.: Недра, 1977. – 159 с.

Поступила в редколлегию 29.03.2023 г.