

ГОРНОЕ МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК 622.233.53

ВЛИЯНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОГРУЖНОГО ПНЕВМОУДАРНИКА НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ БУРЕНИЯ СКВАЖИН С ОДНОВРЕМЕННОЙ ОБСАДКОЙ

В. В. Тимонин, С. Е. Алексеев, В. Н. Карпов, Е. М. Черниенков

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: timonin@misd.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Представлено буровое оборудование для проходки скважин на воду с одновременной обсадкой. Проанализированы конструктивные схемы и результаты производственных испытаний серийного и новых пневмоударников с повышенной энергией удара для проходки скважин на воду с одновременной обсадкой. Проведен экономический анализ себестоимости бурения скважин на воду в горно-геологических условиях Республики Алтай.

Бурение, скважина, обсадка, пневмоударник, себестоимость, скорость бурения, буровое долото, производительность

DOI: 10.15372/FTPRPI20180108

При бурении скважин в сложных горно-геологических условиях для предотвращения обрушения стенок применяют технологию с одновременной обсадкой. Широко распространенные образцы породоразрушающего инструмента зарубежного производства, обеспечивающие реализацию этой технологии бурения, представлены на рис. 1.

Перед бурением долотом типа ODEX (рис. 1а) раскрывают эксцентриковый расширитель 2, который расширяет пионерную скважину, образованную забурником 1, и исключает перемещение обсадной трубы к забою за счет упора в забивной башмак 3 буртика корпуса 7. Однако при бурении долотом данного типа на его детали действует большой изгибающий момент вследствие несоосности расширителя забурника, что приводит к поломкам инструмента и уменьшению срока службы.

К особенностям работы обсадной системы Symmetrix (рис. 1б) следует отнести тандемный принцип разрушения породного массива при бурении скважины. Он заключается в том, что разрушение забоя осуществляется долотом 6, в направляющие пазы которого установлена кольцевая коронка, соединенная с обсадной колонной. При заглублении на длину направляющей долото 6 упирается буртиком в кольцевую коронку, в результате чего происходит увеличение диаметра скважины и перемещение обсадной трубы к забою. В качестве недостатка этого инструмента стоит отметить высокую стоимость, связанную со сложной конструкцией как кольцевой, так и центральной коронок, а также оставление в скважине при бурении кольцевой части.

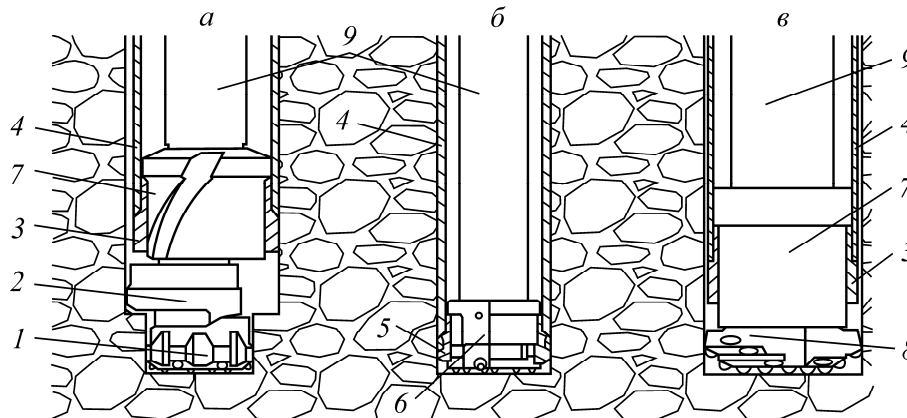


Рис. 1. Инструмент для бурения скважин с одновременной обсадкой: *а* — ODEX (долото с эксцентриковым расширителем); *б* — Symmetrix (система бурения с кольцевой короной); *в* — SliderBit (раздвижное долото); 1 — забурник; 2 — эксцентриковый расширитель; 3 — забивной башмак (стартовая втулка); 4 — обсадная труба; 5 — кольцевая корона; 6 — опережающее долото; 7 — корпус долота; 8 — сегменты долота; 9 — пневмоударник

У раздвижного долота SliderBit (рис. 1*в*) при вращении бурового става после пропуска бурового снаряда через обсадную трубу 4 происходит синхронное выдвигание породоразрушающих сегментов долота 8, предотвращающее осевое перемещение обсадной трубы 4, жестко соединенной с забивным башмаком 3, к забою. Извлечение бурового снаряда происходит за счет уменьшения диаметра долота при вращения бурового става в обратном направлении. В России при бурении с обсадкой наибольшее распространение получило раздвижное долото SliderBit в силу простоты конструкции (по сравнению с ODEX и Symmetrix) и низкой стоимости изготовления.

Практика применения рассмотренных долот показывает, что при бурении погружными пневмоударниками производительность повышается за счет импульсного воздействия пневмоударника непосредственно на забой скважины и использования его в качестве молота для погружения обсадной трубы. В результате этого скорость бурения практически не зависит от глубины скважины. Использование сжатого воздуха в качестве энергоносителя и очистного агента делает технологию бурения более рациональной.

Чтобы добиться эффективного продвижения тяжелой обсадной трубы, требуется увеличение массы бойка-ударника и энергии удара погружного пневмоударника. В настоящее время в мировой практике пневмоударного бурения широко известным способом повышения энергии и частоты ударов погружных машин является использование сжатого воздуха с давлением от 1.2 до 3.5 МПа. Это дает возможность увеличить как массу ударника, так и его скорость в момент удара.

В России при бурении скважин на воду массово применяются отечественные самоходные установки, оснащенные компрессорным оборудованием низкого давления 0.6–0.8 МПа и серийными погружными пневмоударниками низкого давления, у которых потенциал повышения энергетических параметров практически исчерпан.

В Институте горного дела (ИГД) СО РАН для работы с такими установками и погружными пневмоударниками разработан модельный ряд буровых долот, удовлетворяющих требованиям технологии бурения скважин с одновременной обсадкой. Но опыт их эксплуатации с 2012 г. по настоящее время подтвердил недостаточную производительность бурения скважин из-за невысокой энергии удара погружных пневмоударников. Это обстоятельство вынуждает потребите-

лей отечественной продукции переходить на импортные машины низкого давления, которые представлены на российском рынке продукцией КНР. Их характерными особенностями являются повышенные по сравнению с отечественными энергия единичного удара и производительность, меньшая стоимость. Однако, по данным компаний, занимающихся бурением скважин на воду с их одновременной обсадкой, ресурс таких пневмоударников ниже, чем у российских.

Учитывая потребность производственных предприятий в пневмоударниках с более высокой, чем у аналогов, энергией удара, а также для снижения зависимости от импорта зарубежной техники в ИГД СО РАН разработаны опытные образцы пневмоударников ПП110ГМ и ПП110НК и проведены их сравнительные испытания как между собой, так и с серийным пневмоударником ПП-110-3,2 (АО «Машиностроительный холдинг», г. Екатеринбург). Экспедиционные работы проводились в мае – июне 2017 г. в условиях Республики Алтай (Чемальский район) при бурении скважин на воду с одновременной обсадкой (рис. 2).



Рис. 2. Место испытаний (а) и инструмент для бурения скважин с их одновременной обсадкой на воду (б)

На рис. 3 представлены принципиальные схемы новых машин, а также серийного образца.

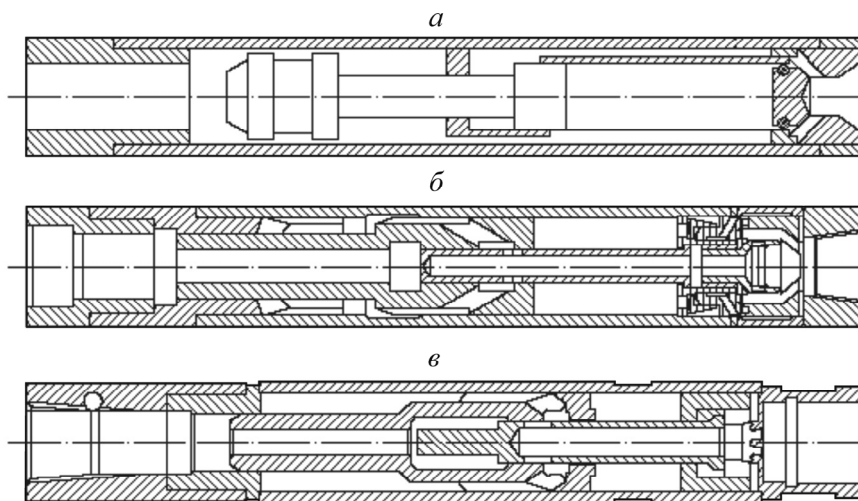


Рис. 3. Принципиальные схемы погружных пневмоударников ПП110ГМ (а), ПП110НК (б), ПП-110-3,2 (в)

Испытания первых прототипов новых машин (рис. 3а, б) в лабораторных условиях выявили их более высокие энергетические показатели по сравнению с серийными образцами машин при работе на низком сетевом давлении энергоносителя [1 – 3]. При этом в одинаковых условиях эти машины ранее не сравнивались с серийными пневмоударниками, в том числе при бурении скважин на воду с одновременной обсадкой.

В табл. 1 представлены технические характеристики комплекта бурового оборудования, участвовавшего в сравнительных испытаниях.

ТАБЛИЦА 1. Технические характеристики бурового комплекта оборудования

Показатель	Значение		
Буровой станок			
Марка	УРБ 74		
Диаметр буримых скважин, мм	145/110		
Вращательный момент (max), Н·м	2500		
Усилие подачи, на подъем (max), кН	46		
Усилие подачи на подачу вниз (max), кН	26		
Рабочее давление p_{max} , МПа	0.6		
Максимальный расход воздуха Q_{max} , м ³ /мин	7		
Расход масла, л/смену	0.15 – 0.20		
Длина буровой штанги L , м	4		
Наружный диаметр буровой штанги d , м	0.0635		
Внутренний диаметр буровой штанги, м	0.03		
Масса буровой штанги, кг	20		
Пневмоударники			
Марка	ПП110ГМ	ПП110НК	П-110-3,2Ш
Длина, мм	590	690	615
Диаметр корпуса, мм	98	96	99
Масса ударника, кг	5.5	5.4	4.9
Воздухораспределение	Клапанное	Клапанное	Бесклапанное
Обратный клапан	+	+	–
Влагоотделитель	–	–	–
Буровые долота			
Марка	РД-133	КНШ-110	
Диаметр буримой скважины, мм	145	110	
Масса коронки, кг	17.5	6.6	
Твердосплавные инденторы буровой коронки			
Форма	Полусфера		
Диаметр инденторов (периферия/центр), мм	14/12		
Общее количество, шт.	15		
Количество по периферии, шт.	8		
Соединение с ПП	Шлицевое		
Твердосплавные инденторы буровой коронки (раздвижное долото)			
Форма	Полусфера		
Диаметр, мм	12		
Общее количество, шт.	22		
Количество по периферии, шт.	8		
Соединение с ПП	Шлицевое		
Энергетические характеристики ППУ по результатам стендовых исследований при $p = 0.6$ МПа			
Энергия удара, Дж	135	187	103
Частота ударов, Гц (стендовые испытания)	22.43	19.95	21.03
Ударная мощность, кВт	3.0	3.7	2.2

Подробный учет и анализ технических характеристик бурового оборудования (табл. 1) при проведении сравнительных испытаний буровых машин в условиях конкретного породного массива весьма важен для исследователей-разработчиков, так как позволяет прогнозировать шаги, направленные на повышение производительности буровых работ. Так, например, более совершенное буровое долото, адаптированное по форме, размеру и количеству инденторов к конкретным условиям проходки скважин, может привести к снижению себестоимости проходки 1 п.м скважин или улучшить другие показатели [4].

Во время испытаний пневмоударники были снабжены одинаковым буровым инструментом. Пневмоударник ПП110НК имел самую высокую мощность из трех образцов машин за счет комбинированного воздухораспределения со ступенчатым клапаном, позволяющим обеспечить максимальную энергию удара при сетевом давлении 0.6–0.8 МПа. Дополнительно пневмоударник оснащен шламозащитным обратным клапаном, который исключает попадание буровой мелочи в рабочие камеры машины. У пневмоударника ПП110ГМ ударная мощность машины несколько уступает ПП110НК, но он имеет большую частоту ударов при достаточно высокой энергии удара в сравнении с серийным образцом.

Важно отметить, все технические решения, реализованные в конструкциях погружных пневмоударников ИГД СО РАН, защищены патентами РФ [5–7]. Сравнительная оценка результатов бурения выполнялась с помощью методики, используемой ИГД СО РАН при проведении экспедиционных работ в производственных условиях [8], и включала следующие этапы.

Подготовительный: регистрация в протоколе испытаний исходных данных о месте, дате проведения испытаний, горно-геологических и горнотехнических условиях породного массива бурового участка и технических характеристик комплекта оборудования (буровой станок, пневмоударник и его инструмент), а также технико-экономических параметров для расчета себестоимости прямых затрат на бурение 1 п.м скважин.

Регистрационный: регистрация перемещения исполнительных органов на станках ударно-вращательного бурения с одновременной записью акустических сигналов, возникающих при их работе в процессе бурения скважин, и режимных параметров бурения при наличии приборов учета на буровых станках или автономных (экспедиционных).

Измерительно-расчетный: обработка данных измерительной аппаратуры и определение технических и технико-экономических параметров, полученных в процессе бурения скважин с занесением в паспорта эффективности погружных машин.

Отчетно-аналитический: построение технико-экономических диаграмм оценки эффективности испытываемых комплектов бурового оборудования при проходке скважин; анализ полученных данных; составление отчетной документации с рекомендациями по выбору и адаптации конкретной модели погружного пневмоударника и породоразрушающего инструмента с предоставлением рациональных режимных параметров бурения, рекомендаций по очистке скважины от шлама и своевременной заточке породоразрушающих вставок буровых долот.

На рис. 4 представлен геологический разрез породного массива, в котором проводились испытания пневмоударников, и области установки обсадных труб для каждого бурового комплекта [9]. К технологическим особенностям бурения с одновременной обсадкой на воду относится внедрение трубы в скальную породу (не менее 1 м) для укрепления стенок скважины и изоляции нижних водозаборных горизонтов от верхних, что улучшает качество воды.

На рис. 5 приведена циклограмма проходки скважины на воду с одновременной обсадкой, где бурение скважины осуществляется за два рейса для каждого из пневмоударников: сначала с одновременной обсадкой с использованием долота РД-133, а затем сплошным забоем долотом КНШ-110. Штриховой линией обозначен участок подъема бурового става для смены буровых долот, разделяющий рейсы буримой скважины.

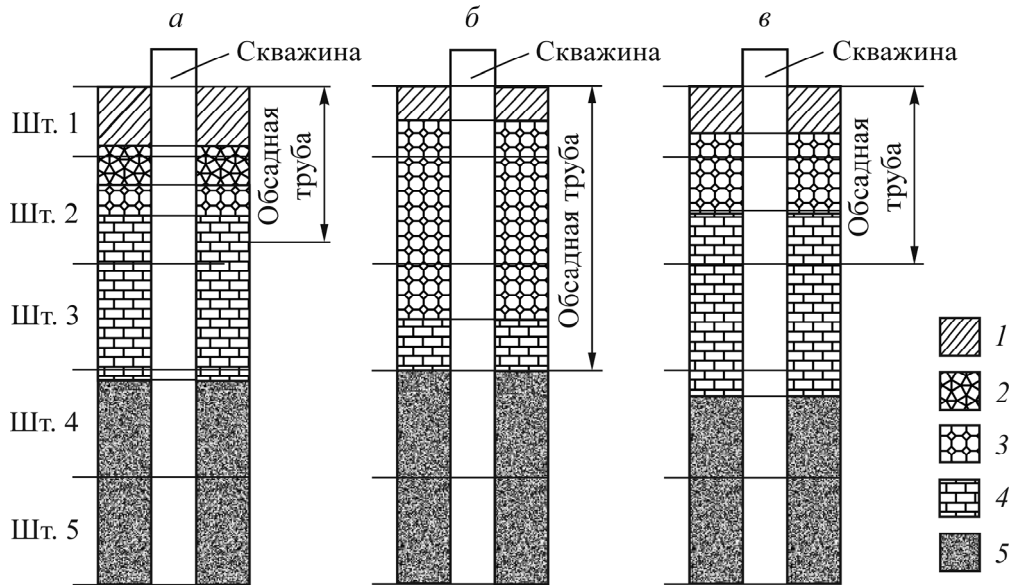


Рис. 4. Геологический разрез породного массива в районе испытаний пневмоударников ПП110-3,2 (а), ПП110ГМ (б), ПП110НК (в): 1 — грунт; 2 — пролювиальные отложения; 3 — галечник с валунами ($R_{сж} = 20$ МПа); 4 — мергели и известняки ($R_{сж} = 65$ МПа); 5 — мергели и известняки — водоносный горизонт ($R_{сж} = 80$ МПа)



Рис. 5. Циклограмма бурения скважины на воду с одновременной обсадкой: $L_{скв}$ — глубина скважины; $t_{ос}$ — время основных операций (время бурения); $t_{вс}$ — время вспомогательных операций; $t_{оп}$ — оперативное время; 1–6 — участки

Особенностью применяемой технологии бурения является повышенная продолжительность вспомогательных операций в течение оперативного времени бурения $t_{оп}$. Технологические звенья процесса содержат следующие операции: 1 — вспомогательные операции (позиционирование установки на месте бурения, установка буровой системы с обсадкой); 2 — основное время работы (бурение); 3 — вспомогательные операции (продувка, сварка труб, наращивание бурового става); 4 — вспомогательные операции (продувка, извлечение става, замена долота на долото со сплошным забоем, наращивание бурового става); 5 — вспомогательная операция (наращивание бурового става); 6 — вспомогательные операции (продувка для очистки скважины от буровой мелочи для последующей установки погружного водяного насоса, подъем става, установка запорной крышки устья скважины).

Определение технических и технико-экономических параметров проходки скважин осуществлялось при помощи способа исследования процесса воздействия исполнительных органов горных и строительных машин на массив геосреды, разработанного в ИГД СО РАН и получившего апробацию в условиях горного производства на карьерах и рудниках [10]. Расчеты себестоимости прямых затрат на бурение 1 п.м скважины проводились по данным, полученным с пяти контрольных участков длиной 4 м (каждой из машин) по формуле:

$$C = \frac{C_{\text{сп}}(t_{\text{осн}} + t_{\text{вс}}) + C_{\text{д}} + C_{\text{п}} + C_{\text{т}}}{L},$$

где C — себестоимость бурения 1 п.м скважины, руб./м; $C_{\text{сп}}$ — стоимость потребления энергоносителей, руб./ч; $C_{\text{д}}$ — фактическая стоимость расходов на буровые долота, руб.; $C_{\text{п}}$ — стоимость расходов на погружной пневмоударник с учетом установленных фактических ресурсных показателей, руб.; $C_{\text{т}}$ — стоимость трубы, руб.; L — длина контрольного участка, м;

$$C_{\text{сп}} = C_{\text{воз}} + C_{\text{бур}} + C_{\text{м}} + C_{\text{св}},$$

здесь $C_{\text{воз}}$, $C_{\text{бур}}$ — стоимость потребления воздуха и потребления горюче-смазочных материалов буровым комплексом, руб./ч; $C_{\text{м}}$ — стоимость масла, руб./ч; $C_{\text{св}}$ — стоимость сварки обсадных труб, руб./ч.

Стоимость потребления энергоносителей $C_{\text{сп}}$ составляет 700 руб./ч; $C_{\text{д}}$ для долота РД-133 — 1600 руб./п.м, для долота КНШ-105 — 500 руб./п.м; $C_{\text{п}}$ для пневмоударника ПП110ГМ — 82.3 руб./п.м, для ПП110НК — 83 руб./п.м и для ПП110-3,2 — 72 руб./п.м; $C_{\text{т}}$ — 600 руб./п.м.

На рис. 6 показаны диаграммы технико-экономической эффективности погружных пневмоударников. В начальный период бурения наблюдается рост механической скорости, так как буровой инструмент проходит по грунтам. Однако с повышением сопротивляемости пород разрушению скорость выравнивается (для ПП110ГМ — 0.144 м/мин, для ПП110НК — 0.239 и ПП-110-3,2 — 0.112 м/мин). Впоследствии наблюдается относительно низкая скорость проходки на участке с обсадной трубой, что обусловлено дополнительными расходами энергии удара на перемещение труб, а также породоразрушающего инструмента (РД-133), масса которого в 2.7 раза больше массы долота сплошного забоя КНШ-110.

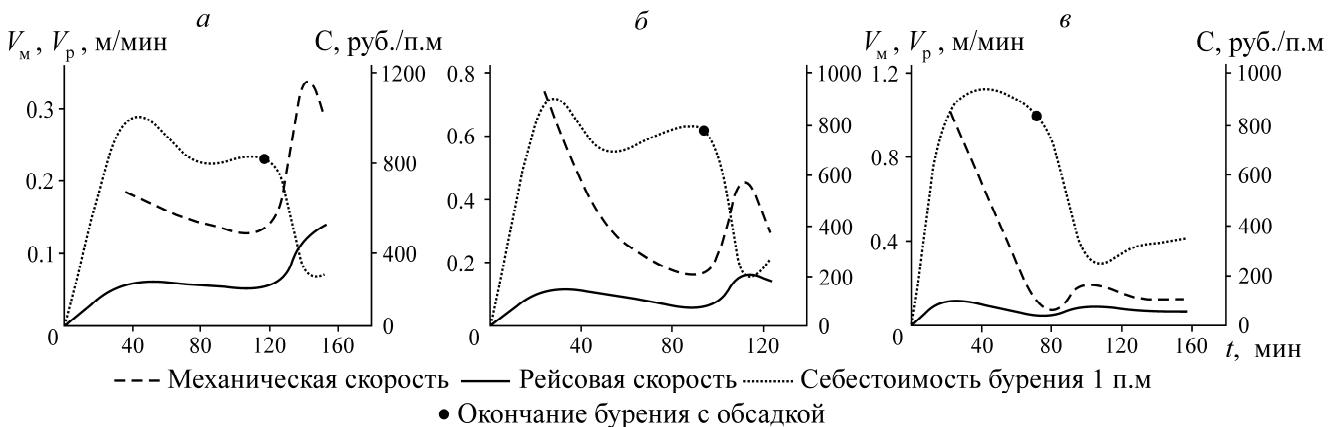


Рис. 6. Диаграммы технико-экономической эффективности погружных пневмоударников ПП110ГМ (а), ПП110НК (б), ПП-110-3,2 (е)

В табл. 2 приведены паспорта технико-экономической эффективности пневмоударников, в которых номинальное давление для всех пневмоударников $p = 0.6$ МПа, $L = 4$ м.

При выборе бурового оборудования ориентируются на два ключевых фактора: производительность бурения и себестоимость буровых работ. Проходка скважин с обсадной трубой характеризуется дополнительными затратами на трубы и увеличением числа вспомогательных операций, что ведет к повышению себестоимости буровых работ. Средние показатели себестоимости бурения 1 п.м с окончанием бурения с обсадкой при переходе на бурение сплошным забоем заметно снижаются: у ПП110ГМ с 838 до 262 руб./п.м, у ПП110НК с 777 до 240 руб./п.м и у ПП-110-3,2 с 838 до 310 руб./п.м.

ТАБЛИЦА 2. Паспорта технико-экономической эффективности пневмоударников

Показатель	ПП110ГМ					ПП110НК					ПП-110-3,2				
	Бурение с одновременной обсадкой (Ø145 мм)		Бурение сплошным забоем, без обсадки (Ø110 мм)		Бурение с одновременной обсадкой (Ø145 мм)	Бурение сплошным забоем, без обсадки (Ø110 мм)		Бурение с одновременной обсадкой (Ø145 мм)		Бурение сплошным забоем, без обсадки (Ø110 мм)		Бурение с одновременной обсадкой (Ø145 мм)		Бурение сплошным забоем, без обсадки (Ø110 мм)	
Номер штанги	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
N	—	—	—	3.3	3.3	33.9	35.4	38.1	26.1	28.7	—	—	2.8	2.8	2.8
n	34.2	34.8	34.0	37.2	40.8	0.57	0.59	0.64	0.44	0.48	28.8	34.7	34.8	34.8	34.5
$f_{ар}$	0.57	0.58	0.57	0.62	0.68	14.9	18.8	19.6	19.5	18.5	0.48	0.59	0.58	0.58	0.58
$f_{уд}$	17.9	23.6	23.6	19.2	21.4	13.7	11.2	11.7	8.1	9.31	21.7	22.0	23.0	24.5	25.0
γ	11.4	8.8	8.6	11.6	11.4	244	766	1605	529	749	7.9	9.6	9.0	8.4	8.3
n_U	968	1660	1660	720	756	0.068	0.213	0.446	0.147	0.208	180	2134	1166	1724	1670
$R_{мг}$	0.269	0.461	0.461	0.200	0.210	22	59	111	130	138	0.05	0.593	0.324	0.479	0.464
$R_{ц.н}$	39	111	173	162	198	0.738	0.313	0.168	0.453	0.288	30	97	137	191	203
V_m	0.186	0.145	0.145	0.300	0.286	0.107	0.099	0.058	0.157	0.140	1.000	0.113	0.206	0.139	0.129
V_p	0.057	0.057	0.057	0.116	0.139	16.10	5.10	2.40	1.17	0.82	0.115	0.046	0.087	0.069	0.064
$V_{об}$	4.00	2.38	2.38	0.86	0.81	870.5	689.1	773.2	220.2	259.6	22.00	1.85	0.53	0.36	0.37
C	964.6	775.8	775.7	277.9	245.8	33.9	35.4	38.1	26.1	28.7	858.4	819.1	276.6	312.8	341.7

Примечание. N — усилие подачи, кН; n — обороты става, об./мин; $f_{ар}$ — частота вращения става, Гц; $f_{уд}$ — частота ударов, Гц; γ — угол между ударными нагрузками, град; n_U — количество оборотов става на пройденном участке; $R_{мг}$ — нагрузка машины с инструментом, молотчасы; $R_{ц.н}$ — количество циклов нагружения ударного узла машины, ед. (10^3); V_m , V_p — механическая, рейсовая, м/мин, и $V_{об}$ — объемная скорость бурения погружных машин, м³/мин · 10⁻³.

Отметим также, что показатель C_n у ПП110НК и ПП110ГМ имеет меньшее влияние на себестоимость бурения 1 п.м скважины, так как ресурс данных пневмоударников превышает показатели серийного образца в 2 раза согласно результатам эксплуатационных испытаний в рудниках, где прочность пород значительно выше [11].

На рис. 7 представлены зависимости скорости проходки скважин и себестоимости бурения 1 п.м от энергии удара погружных пневмоударников, определенные по средним показаниям участков 4 и 5 (квазиоднородные для всех машин).

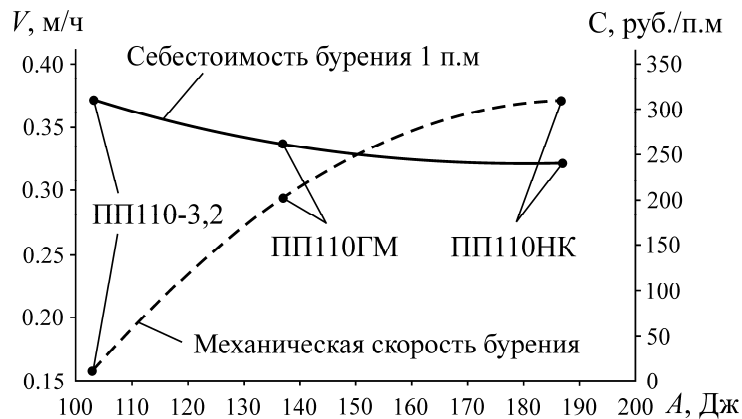


Рис. 7. Зависимости механической скорости проходки скважин и себестоимости бурения 1 п.м от энергии единичного удара погружных пневмоударников

ВЫВОДЫ

Установлено, что для погружных пневмоударников ПП110ГМ и ПП110НК разработки ИГД СО РАН увеличение энергии единичного удара на 33 и 81 % соответственно за счет введения кольцевого упругого клапана в систему воздухораспределения и его оптимальных настроек, полученных при математическом и физическом моделировании, обеспечивает рост скорости проходки скважины на 85 и 134 % по сравнению с серийным пневмоударником ПП110-3,2. Себестоимость бурения снижается на 77 и 84 % соответственно по сравнению с серийным образцом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимонин В. В. Погружные пневмоударники для подземных условий разработки // Горное оборудование и электромеханика. — 2015. — № 2 (111). — С. 13–17.
2. Репин А. А., Алексеев С. Е., Кокоулин Д. И., Карпов В. Н. Бурение скважин с обсадкой // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. — 2016. — № 3. — С. 536–540.
3. Интернет-канал ИГД СО РАН: <https://www.youtube.com/watch?v=D2mApXJ1328>.
4. Опарин В. Н., Тимонин В. В., Карпов В. Н., Смоляницкий Б. Н. О применении энергетического критерия объемного разрушения горных пород при совершенствовании технологии ударно-вращательного бурения скважин // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — С. 81–104.
5. Пат. 2463431 РФ, МПК E21B 4/14 (2006.1). Погружной пневмоударник / А. А. Липин, Н. Н. Заблоцкая; заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН, № 2011116060/03; заявл. 22.04.2011 // Оpubл. в БИ. — 2012. — № 28. — 7 с.

6. Пат. 85185 РФ, МПК E21B 4/14 (2006.1). Погружной пневмоударник / А. А. Липин, А. В. Белоусов, В. В. Тимонин; заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН, № 2008148279; заявл. 08.12.2008 // Оpubл. в БИ. — 2009. — № 21. — 6 с.
7. ПМ 121854 РФ. Погружной пневмоударник / А. А. Репин, С. Е. Алексеев, В. Н. Карпов; заявитель и патентообладатель ИГД СО РАН, № 2012118740/03; заявл. 04.05.2012 // Оpubл. в БИ. — 2012. — № 31.
8. Карпов В. Н. Методика проведения оценочных испытаний погружных пневмоударников в производственных условиях // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2016. — № 3. — С. 74–80.
9. Новиков И. С. Морфотектоника Алтая / науч. ред. Е. Г. Девяткин, Г. Ф. Уфимцев. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал “Гео”, 2004. — 313 с.
10. Опарин В. Н., Тимонин В. В., Карпов В. Н., Смоляницкий Б. Н. О применении энергетического критерия объемного разрушения горных пород при совершенствовании технологии ударно-вращательного бурения скважин // ФТПРПИ. — 2017. — № 6. — С. 81–104.
11. Eremenko V. A., Karpov V. N., Timonin V. V., Shakhtorin I. O., and Barnov N. G. Basic trends in development of drilling equipment for ore mining with block caving method, J. of Mining Science, 2015, Vol. 51, No. 6. — P. 1113–1125.

Поступила в редакцию 25/XII 2017