Зап. Санкт-Петербургского горного института.
Т. 136. СПб, 1993

УДК 622.24.051

А.А.ЯКОВЛЕВ, А.В.КОЗЛОВ
(Санкт-Петербургский горный ин-т)

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ СТУПЕНЧАТЫХ АЛМАЗНЫХ КОРОНОК ПРИ БУРЕНИИ С ПЕНОЙ

Накопленный опыт показал необходимость учета влияния температурного фактора при проектировании рациональных конструкций алмазного породоразрушающего инструмента, предназначенных для проходки скважин с очисткой забоя пеной, и оптимальной технологии их отработки [2, 6, 7].

В С-ПГИ разработаны математическая модель и аналитические зависимости для распределения температуры в теле алмазной коронки [3, 6], составлена программа ее совместной реализации с моделью гидродинамических процессов циркуляции пены в скважине [7, 8], учитывающие алмазовооруженность, конструктивные и теплофизические параметры матрицы и короночного кольца инструмента, газожидкостное соотношение в пене, ее реологические и теплофизические свойства с учетом забойных давлений и глубины скважины и пригодные для расчетов по прогнозу температурного режима породоразрушающего инструмента алмазных коронок и долот с различной формой матрицы с достаточной для практики точностью [4].

Целью настоящей работы является исследование влияния конструктивных параметров ступенчатых алмазных коронок на их температурный режим и разработка рекомендаций по совершенствованию серийного и проектированию нового породоразрушающего инструмента для бурения скважин с промывкой пеной.

Моделирование на ПЭВМ и расчетный анализ температурного режима проведен для ступенчатых алмазных коронок ССК диаметром 59 мм для скважины глубиной 200 м при механической скорости бурения – 3 м/ч и мощности, реализуемой на забое, равной 6 кВт, при расходе пенообразующего раствора 5 л/мин и подаче сжатого воздуха 0,5 $м^3$/мин. На забое скважины параметры пены имели следующие значения: газосодержание 0,74, скорость восходящего потока 0,49 м/ч, объемный расход 19 $м^3$/мин, плотность 295 кг/$м^3$, теплопроводность 0,127 Вт/(м·^{0}С), теплоемкость 3849 Дж/(кг·^{0}С) при забойном давлении 3,58 МПа и давлении нагнетания 3,24 МПа. В качестве базового варианта взята шестиступенчатая коронка К-01-3 с массовым содержанием алмазов на пилоте $M(0)$ = 7,28 кар и на ступенях $M(1)$ = 4,92 кар при их зернистости z = 90÷60 шт/кар. Количество работающих алмазов принято одинаковым на всех ступенях матрицы.

Таблица I

Расчетное распределение температур в теле серийных коронок ССК

Марка серийной коронки	Зернистость алмазов, шт/кар[x]	Масса алмазов, кар	Температура в теле различных элементов алмазной коронки, °С[xx]																												$W_{пр}$, кВт
			Пилот				Ступень I				Ступень 2				Ступень 3				Ступень 4				Ступень 5				Ступень 6				Корпус		
			T0(0,0)	T0(0,I)	TI(0,0)	TI(0,I)	T0(I,0)	T0(I,I)	TI(I,0)	TI(I,I)	T0(2,0)	T0(2,I)	TI(2,0)	TI(2,I)	T0(3,0)	T0(3,I)	TI(3,0)	TI(3,I)	T0(4,0)	T0(4,I)	TI(4,0)	TI(4,I)	T0(5,0)	T0(5,I)	TI(5,0)	TI(5,I)	T0(6,0)	T0(6,I)	TI(6,0)	TI(6,I)	T(0)	T(2)	
К-0I (3 ступени)	30-20 30-20	5 2,4	397	36I	326	284	408	372	337	239	4I9	382	347	228	427	392	356	52	-	-	-	-	-		-	-	-	-		-	4I	2I	7,4
К-0I-I (4 ступени)	50-30 50-30	3,6 2,6	307	278	250	2I9	3I3	285	256	I8I	3I9	290	262	I66	325	297	268	I62	332	304	275	40	-		-				-	-	3I	2I	9,4
К-0I-2 (5 ступеней)	60-40 60-40	2,8 2,0	282	252	222	I97	288	257	227	I63	293	263	233	I46	299	268	238	I42	302	27I	24I	I40	305	274	244	34				-	37	2I	9,9
I-0I-3 (6 ступеней)	90-60 90-60	8 3	209	200	I92	I65	2I2	203	I94	I33	2I5	206	I97	I20	2I8	208	200	II2	220	2II	203	I09	223	2I4	205	I08	227	2I7	209	29	25	2I	I6,I
К-08 (4 ступени)	400-I50 60-30	I0	374	352	330	273	I65	I40	II6	20I	I68	I43	II9	I66	I7I	I46	I2I	I42	I74	I49	I25	60	-					-	-	-	40	2I	20,6

[x] Зернистость и масса алмазов: в числителе - пилота; в знаменателе - ступеней матрицы.

[xx] T0 (I, j); TI (I, j); T (j) - температуры в теле объемных алмазов, элементов матрицы и температуры в корпусе коронки (j = 0 - торец; I - середина; 2 - конец дачного элемента; j - место замера температуры).

В табл.I приведены расчетные температуры в теле серийных алмазных коронок для ССК-59 и значения предельно допустимой мощности $w_{пр}$, которая может быть реализована на забое скважины при бурении с пеной для перечисленных условий. В табл.I четко прослеживается зависимость роста предельно допустимой забойной мощности и снижения температуры во всех элементах инструмента при увеличении числа ступеней матрицы, что можно объяснить увеличением площади наружной боковой поверхности матрицы коронки и, следовательно, усилением теплоотвода в очистной агент. У коронок, армированных алмазами зернистостью до 90 шт./кар, минимальная температура режущих граней - на объемных алмазах пилота, а максимальная - на алмазах последней перед короночным кольцом ступени. В сечении матрицы коронки, соответствующем верхнему кольцу предыдущей ступени и торцу следующей, происходит скачок температур. Это объясняется суммированием в этом сечении двух тепловых потоков: первого - из нижней ступени и второго - с объемных алмазов торца следующей ступени. У всех рассмотренных коронок основное падение температуры происходит на алмазах и в матрице породоразрушающего инструмента, короночное кольцо играет менее заметную роль в процессе его охлаждения.

Отдельно следует выделить коронки К-08, пилот которых армирован алмазами зернистостью 400-150 шт./кар, а ступени - 60-30 шт./кар. В отличие от остальных коронок максимальная температура режущих граней имеет место на объемных алмазах ее пилота. Изменение температуры нагрева граней алмазов на ступенях ее матрицы повторяет картину, характерную для всех рассмотренных коронок ССК. Наличие максимальной температуры на объемных алмазах пилота можно объяснить тем, что при использовании более мелких алмазов (400-150 шт./кар) ухудшаются условия теплоотдачи по сравнению с более крупными алмазами зернистостью до 90 шт./кар, а также увеличением их числа и, следовательно, ростом теплового потока в них.

Анализ табл.I показывает, что температуры в теле ступенчатых коронок ССК значительно ниже, чем в породоразрушающем инструменте для одинарных колонковых наборов [4, 5], что связано со снижением удельных затрат мощности на разрушение породы при увеличении числа ступеней матрицы. Преимущества ступенчатого забоя объясняются ослаблением породы на ступенях, так как она находится в состоянии двухосного, а не трехосного сжатия, как при плоском или закругленном забое. За счет этого увеличивается механическая скорость бурения данными коронками при одинаковой или меньшей мощности, реализуемой на забое, чем у породоразрушающего инструмента со стандартной формой торца матрицы [I].

Таким образом, при бурении с пеной эффективно применение ступенчатых алмазных коронок, так как их использование обеспечивает повышенную механическую скорость бурения и поддержание нормального теплового режима инструмента.

Рассмотрим влияние алмазовооруженности, конструктивных и теплофизических параметров ступенчатых алмазных коронок ССК на их температурный режим. Результаты математического моделирования температурного поля в теле этих буровых коронок приведены в табл.2.

Таблица

Расчетное распределение температуры в теле шестиступенчатой алмазной коронки для снарядов ССК в зависимости от изменения их конструктивных параметров

Изменяемый параметр	Значения изменяемого параметра	Температура в теле различных элементов алмазной коронки, °С																					$\omega_{пр}$, кВт
		Пилот			Ступень 1			Ступень 2			Ступень 3			Ступень 4			Ступень 5			Ступень 6			Корпус		
		T0(0,0)	T1(0,0)	T1(0,1)	T0(1,0)	T1(1,0)	T1(1,1)	T0(2,0)	T1(2,0)	T1(2,1)	T0(3,0)	T1(3,0)	T1(3,1)	T0(4,0)	T1(4,0)	T1(4,1)	T0(5,0)	T1(5,0)	T1(5,1)	T0(6,0)	T1(6,0)	T1(6,1)	T(0)	T(2)	
Масса объемных алмазов на пилоте $M(0)$ и ступенях матрицы $M(I)$, кар	$M(0) = 6{,}28$; $M(I) = 4{,}92$	236	216	182	240	220	137	243	223	126	246	226	119	249	229	117	252	232	116	256	236	22	21	21	10,8
	$M(0) = 8{,}5$; $M(I) = 5{,}0$	238	216	183	241	219	140	245	222	129	248	226	123	251	229	120	254	232	119	258	236	31	21	21	10,7
	$M(0) = 6{,}5$; $M(I) = 4{,}0$	243	217	183	247	221	138	250	224	127	253	227	120	236	230	118	259	233	117	264	237	23	21	21	10.5
	$M(0) = 5{,}0$; $M(I) = 3{,}0$	253	219	185	257	223	138	260	226	127	263	229	121	267	233	118	270	236	117	274	240	23	21	21	10,0
Зернистость и масса алмазов на пилоте $z(0)$ и $M(0)$ и ступенях $z(I)$ и $M(I)$, шт/кар	$z(0) = 60 \div 40$; $M(0) = 6{,}4$ $z(I) = 60 \div 40$; $M(I) = 4$	264	229	194	268	233	147	272	237	136	275	240	129	278	243	126	282	247	125	287	252	22	21	21	8,8
	$z(0) = 30 \div 20$; $M(0) = 4{,}1$ $z(I) = 30 \div 20$; $M(I) = 3{,}2$	318	240	209	322	244	162	326	249	152	330	252	146	334	256	142	338	260	141	343	266	22	21	21	
Ширина промывочных каналов при их количестве $K(I) = 8$, где $I = 0 \div 6$, м	0,007	317	295	257	323	301	178	328	306	167	333	311	161	338	316	159	343	321	159	350	328	30	21	21	8,0
	0,005	263	240	201	280	258	132	284	262	127	288	266	124	292	269	125	295	273	126	300	278	30	21	21	10,1
	0,003	238	216	182	242	220	132	245	223	121	248	226	114	252	229	111	255	232	109	259	237	30	21	21	11,9
Ширина промывочных каналов $C1(I)$ и их количество $K(I)$, где $I = 0 \div 6$, м	$C1(I) = 0{,}005$; $K(0) = 4$; $K(I) = 8$	373	352	313	381	359	189	389	367	177	396	374	171	403	381	170	409	388	171	419	397	26	21	21	7,1
	$C1(I) = 0{,}003$; $K(0) = 4$; $K(I) = 8$	253	231	198	245	222	135	260	238	138	252	230	132	267	244	246	259	237	125	275	252	31	21	21	11,2
	$C1(0) = 0$; $K(0) = 4$; $C1(I) = 3$; $K(I) = 8$; $C1(2) = 5$; $K(I) = 4$	214	193	162	213	191	128	221	199	115	219	196	110	227	204	105	224	202	104	233	210	31	21	21	13,4
Высота пилота ступеней матрицы, где $I = 1 \div 6$, м	$H1(0) = 0{,}004$; $H1(I) = 0{,}004$; $H1(6) = 0{,}01$	236	213	180	237	215	137	242	220	126	243	221	120	248	226	117	249	227	116	256	23	31	21	21	12,1
	$H1(0) = 0{,}01$; $H1(I) = 0{,}004$;	224	202	169	227	205	114	230	208	89	233	211	77	236	214	71	239	217	69	243	221	31	21	21	12,7
	$H1(0) = 0{,}01$; $H1(I) = 0{,}004$; $H1(6) = 0{,}01$	238	216	141	241	219	82	244	222	72	246	225	67	251	228	65	254	231	65	256	236	31			
Теплопроводность матрицы, Вт/(м·град)	150	259	237	194	263	241	142	267	244	129	270	248	122	274	251	118	2	255	117	282	260	31	21		10,7
	280	219	196	172	222	199	137	225	202	129	227	205	124	230	208	123	233	211	122	236	214	30	21		1[illegible]

Окончание табл.2

Изменяемый параметр	Значение изменяемого параметра	Температура в теле различных элементов алмазной коронки, °С																						$\omega_{пр}$, кДж
		Пилот			Ступень 1			Ступень 2			Ступень 3			Ступень 4			Ступень 5			Ступень 6			Корпус		
		T0(0,0)	T1(0,0)	T1(0,1)	T0(1,0)	T1(1,0)	T1(1,1)	T0(2,0)	T1(2,0)	T1(2,1)	T0(3,0)	T1(3,0)	T1(3,1)	T0(4,0)	T1(4,0)	T1(4,1)	T0(5,0)	T1(5,0)	T1(5,1)	T0(6,0)	T1(6,0)	T1(6,1)	T(0)	T(2)	
Теплопроводность корпуса, Вт/(м·град)	150	237	214	181	240	218	138	243	221	127	246	224	122	249	227	118	252	230	117	257	234	26	21	21	13,1
	280	236	214	181	239	217	138	243	220	127	246	223	121	249	226	118	252	229	116	256	234	21	21	21	12,1
Высота кольцевого кольца, м	0,065	238	216	141	241	219	82	244	222	72	248	225	67	251	226	65	254	231	65	258	236	31	21	21	12,0
	0,130	238	216	183	241	219	140	245	222	129	248	226	123	251	229	120	254	232	119	258	236	31	21	21	12,0
	0,210	238	216	183	241	219	140	245	222	129	248	226	123	251	229	120	254	232	119	258	236	31	21	21	12,0
Наружные диаметры пилота $D(0)$ и ступеней $D(I)$, где I = 1÷6, м	$D(0)$ = 0,042; $D(1)$ = 0,045 $D(2)$ = 0,048; $D(3)$ = 0,056 $D(4)$ = 0,054; $D(5)$ = 0,056 $D(6)$ = 0,059	250	227	171	256	233	130	261	239	126	267	244	127	272	249	130	275	253	129	280	257	30	21	21	11,0
То же	$D(0)$ = 0,0495; $D(1)$ = 0,051 $D(2)$ = 0,0525; $D(3)$ = 0,054 $D(4)$ = 0,0555; $D(5)$ = 0,057 $D(6)$ = 0,059	234	212	188	237	215	146	239	217	134	241	219	126	243	221	121	243	228	118	248	226	31	21	21	12,5
-"-	$D(0)$ = 0,052; $D(1)$ = 0,053 $D(2)$ = 0,054; $D(3)$ = 0,055 $D(4)$ = 0,056; $D(5)$ = 0,057 $D(6)$ = 0,059;	224	202	180	226	203	143	227	205	130	228	206	121	230	207	114	231	209	108	234	211	32	21	21	13,4
-"-	$D(0)$ = 0,041; $D(1)$ = 0,044 $D(2)$ = 0,047; $D(3)$ = 0,05 $D(4)$ = 0,053; $D(5)$ = 0,056 $D(6)$ = 0,059	255	233	167	261	239	126	267	245	123	272	250	125	278	256	129	283	261	134	288	266	30	21	21	10,6

Из табл.2 видно, что увеличение насыщенности алмазами пилота буровой коронки способствует снижению температуры их режущих граней. Так, при изменении масс алмазов пилота с 5 до 8,5 кар при постоянной их зернистости температура снизилась на 7 %. Рост массового содержания алмазов на ступенях матрицы с 3 до 5 кар способствует уменьшению температуры режущих граней алмазов на всех ступенях в среднем на 6,6 %. На распределение температуры в теле матрицы и корпуса буровой коронки изменение данного фактора оказывает незначительное влияние.

Увеличение зернистости объемных алмазов на пилоте и ступенях матрицы при соответствующем повышении их массового содержания вызывает снижение температуры рабочих граней алмазов и рост предельно допустимой забойной мощности, а также способствует уменьшению температур во всех элементах буровой коронки, начиная с пилота и кончая короночным кольцом породоразрушающего инструмента. Следует отметить значительное снижение температуры во всем теле буровой коронки при использовании для армирования пилота алмазов зернистостью 400-150 шт./кар и ступеней - 60-40 шт./кар при повышенном их массовом содержании.

Для алмазного бурения с пеной возможно использование серийных ступенчатых коронок со стандартной зернистостью и массовым содержанием объемных алмазов. Однако с целью расширения границ возможного применения алмазного бурения с пеной, увеличения предельно допустимой мощности, реализуемой на забое скважины, целесообразна разработка буровых коронок с повышенным содержанием и зернистостью алмазов на пилоте и ступенях их матриц.

Геометрия промывочной системы. Увеличение числа промывочных каналов на пилоте и ступенях с 4 до 8 вызывает повышение температуры режущих граней алмазов на всех элементах матрицы: на пилоте на 9,5 % и на ступенях - на 14 % (табл.2). При этом происходит также рост температуры матрицы и короночного кольца породоразрушающего инструмента. Отсюда можно сделать вывод о целесообразности сохранения стандартного количества промывочных каналов при их постоянных размерах в коронках ССК и возможном уменьшении их числа до нуля.

Как и для породоразрушающего инструмента одинарных колонковых наборов, уменьшение ширины промывочных каналов способствует снижению температуры во всех элементах буровых коронок (см. табл.1). Так, при изменении ширины восьми каналов с 0,005 до 0,003 м уменьшаются температуры: режущих граней алмазов пилота на 10 % и ступеней на 14 %, торца пилота на 10 % и ступеней на 14 %. Снижение ширины промывочных каналов в тех же пределах, но при их различном количестве на пилоте и ступенях (соответственно 4 и 8) также вызывает падение температуры режущих граней объемных алмазов в элементов алмазной коронки (табл.2).

Представляет интерес следующая конструкция алмазной коронки: на пилоте - 4 промывочных канала шириной 0,005 м, на 1-й ступени - 8 каналов шириной 0,003 м, на 2-й - опять 4 канала шириной 0,005 м и т.д. Из всех рассмотренных вариантов конструкций породоразрушающего инструмента со стандартной зернистостью и массой алмазов уровень температур в объемных

алмазах, матрице и корпусе данной коронки наиболее низок. Предельно допустимая мощность, которая может быть реализована на забое при бурении коронкой такой конструкции, на 20 % выше, чем у базовой. На ступенях матрицы с четырьмя каналами температура выше, чем на имеющих восемь каналов, что объясняется ухудшенными условиями теплоотдачи на ступенях с меньшим количеством промывочных окон и большей их шириной.

Анализ влияния изменения геометрии промывочной системы породоразрушающего инструмента на его температурный режим позволяет сделать следующие рекомендации: при стандартной ширине промывочных каналов целесообразно их количество оставлять на том же уровне, что и в серийных коронках. При уменьшении их ширины до 0,003 м эффективно создание матриц коронок с повышенным до восьми количеством окон. Перспективно создание ступенчатых коронок без промывочных каналов, что позволит усилить теплоотдачу в поток очистного агента с наружной и внутренней поверхностей матрицы.

Конструктивные параметры коронки. Из трех рассмотренных вариантов коронок с различной высотой элементов матрицы наиболее перспективен с точки зрения поддержания нормального температурного режима породоразрушающего инструмента следующий: пилот высотой 0,01 м, каждая из ступеней 0,004 м (табл.2). Предельно допустимая мощность, которая может быть реализована на забое скважины при бурении коронками такой конструкции, на 16 % выше, чем у базовой. Увеличение высот пилота и ступеней способствует снижению температур во всех элементах инструмента.

Из табл.2 видно, что увеличение высоты короночного кольца в два раза и более | не влияет на температурное поле в теле алмазных коронок ССК и предельно допустимую забойную мощность. При разработке специальных конструкций породоразрушающего инструмента для снарядов со съемными керноприемниками высоту корпуса следует оставлять такой же, как и у серийных коронок.

Анализ влияния толщины пилота и ступеней матрицы коронок ССК показывает, что увеличение их наружных диаметров при постоянном внутреннем вызывает падение температур в объемных алмазах и матрице инструмента (табл.2). При этом наиболее оптимальной представляется конструкция коронки с формой матрицы, близкой усеченному полому конусу с утолщенным пилотом. Применение коронок ССК с такой формой матрицы позволяет повысить границу предельно допустимой забойной мощности на 20 % по сравнению с базовой.

Увеличение теплопроводности материала матрицы, как и в случае с коронками для одинарных колонковых наборов [5], способствует снижению температур в теле породоразрушающего инструмента ССК и росту предельно допустимой мощности, в то время как такое же изменение теплопроводности материала короночного кольца практически не оказывает влияния на температурное поле алмазных коронок ССК (табл.2). Отсюда вывод о необходимости подбора наиболее теплопроводных вольфрамо-кобальтовых и других смесей и твердых сплавов для изготовления алмазосодержащих матриц инструмента.

Таким образом, математическое моделирование на ПЭВМ и расчетный анализ температурного режима ступенчатых алмазных коронок для снарядов со съемными керноприемниками при бурении скважин с промывкой пеной позволили сделать следующие выводы:

1. Применение породоразрушающего инструмента со ступенчатой формой торца более эффективно по сравнению с буровыми коронками с плоским или закругленным торцом, так как при этом обеспечивается нормальный температурный режим его работы при повышенной механической скорости бурения. Увеличение числа ступеней матрицы способствует лучшему теплообмену инструмента с очистным агентом и, следовательно, росту предельно допустимой мощности, которая может быть реализована на забое скважины.

2. Для алмазного бурения с пеной возможно использование серийных ступенчатых коронок ССК со стандартной зернистостью и массовым содержанием объемных алмазов, при этом более эффективен серийный инструмент с повышенной зернистостью. Однако с целью расширения границ их возможного применения, т.е. увеличения предельно допустимой мощности, перспективна разработка породоразрушающего инструмента с повышенной в 1,5–2 раза насыщенностью объемными алмазами в зависимости от их зернистости. Следует более широко использовать при армировании пилота и ступеней коронок мелкие алмазы зернистостью 400–150 шт./кар и более.

3. С целью улучшения условий охлаждения породоразрушающего инструмента целесообразно уменьшение размеров промывочных каналов и их количества. Перспективно создание ступенчатых коронок без заранее выполненных промывочных каналов в теле матрицы алмазных коронок.

4. Увеличение высот пилота и ступеней матрицы вызывает падение температур в теле объемных алмазов и самой буровой коронки. Целесообразна разработка ступенчатых коронок с увеличенными высотами пилота в 2–2,5 раза и каждой ступени в 1,5–2 раза по сравнению с серийным инструментом. Применение удлиненных по сравнению со стандартными корпусов коронок практически не влияет на их температурный режим.

5. Перспективна разработка конструкций ступенчатых коронок с формой матрицы, близкой к усеченному полому конусу с утолщенным пилотом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кардыш В.Г., Мурзаков Б.В., Окмянский А.С. Энергоемкость бурения геологоразведочных скважин. М.: Недра, 1984.

2. Коваленко В.И., Климов В.Я., Яковлев А.А. Бурение скважин с промывкой пеной //Обзор ВИЭМС; Сер. технология и техника геолого-разведочных работ. М., 1986.

3. Кудряшов Б.Б., Яковлев А.А. Анализ и расчет температурного поля в теле алмазной коронки // Зап. ЛГИ. 1985. Т. 105.

Экспериментальное исследование температурного режима алмазных коронок при бурении пеной / В.Г.Кнышов, А.А.Яковлев, А.Н.Заводчиков и др. // Зап. ЛГИ. 1988. Т. 116.

5. Яковлев А.А. Исследование и разработка технологии алмазного бурения с применением пены: Автореф. канд. дисс. / Ленинградский горный ин-т. Л., 1987.

6. Яковлев А.А., Козлов А.В. Совершенствование технологии алмазного бурения с очисткой скважин пеной // Обзор ВИЭМС; Сер. технология и техника геолого-разведочных работ. М., 1989.

7. Яковлев А.М., Коваленко В.И. Бурение скважин с пеной на твердые полезные ископаемые. Л.: Недра, 1987.

8. Яковлев А.М., Саламатин А.Н. Методика расчета параметров циркуляции газожидкостных систем при бурении скважин // Совершенствование техники и технологии бурения скважин на твердые полезные ископаемые / Свердловский горный ин-т. 1981. Вып. 4.