Записки Санкт-Петербургского горного института.
Т. 138. СПб, 1993

УДК 622:243.94

В.С.ЛИТВИНЕНКО, Г.Н.СОЛОВЬЕВ
(Санкт-Петербургский горный ин-т)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ПЕНЕТРАТОРА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ БУРЕНИЯ ПЛАВЛЕНИЕМ

Под эффективностью процесса бурения горных пород плавлением следует понимать не только скорость углубки в породу, но и такие факторы, как диаметр скважины, его соотношение с диаметром пенетратора, количество образующегося в единицу времени расплава, толщину остеклованного расплава на стенках скважины, его прочность, удельный расход энергии на единицу проходки и многие другие. Имеющиеся теоретические оценки сравнительных преимуществ основных возможных форм теплового пенетратора [2] не дают и не могут дать ответ на все эти вопросы. Форму пенетратора нельзя рассматривать в отрыве от его размеров, технических возможностей размещения в его корпусе источника тепловой энергии (на современном этапе в виде жаропрочного электросопротивления), габаритов и мощности этого источника, а также технических и технологических условий обеспечения его надежной и долговечной работы. Выбор и обоснование наиболее рациональной формы высокотемпературного пенетратора требуют детального экспериментального изучения.

В лаборатории кафедры технологии и техники бурения скважин С-ПГИ проведено экспериментальное бурение плавлением по легкоплавким материалам – льду и парафину моделями пенетраторов различных форм.

Поскольку пенетратор теоретически рассматривается нами как тело с равномерно рассредоточенным источником тепла, в целях получения сравнимых

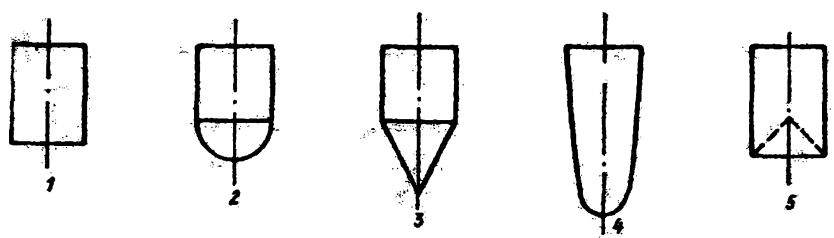


Рис.1. Формы моделей пенетраторов

результатов были сконструированы и изготовлены из алюминиевого сплава модели пенетраторов одинакового наружного диаметра (верхнего нерабочего торца) D = 50 мм и одинакового объема V = 131 см^3 пяти различных форм (рис.1): 1 – цилиндр; 2 – полусфера плюс цилиндр; 3 – конус, высотой равный диаметру, плюс цилиндр; 4 – тело вращения цепной линии вокруг вертикальной оси; 5 – цилиндр с внутренним конусом, диаметром и высотой равными диаметру цилиндра. В качестве нагревательных элементов были использованы трубчатые электронагреватели (ТЭНы) мощностью 0,5 кВт (наружный диаметр трубки 5 мм).

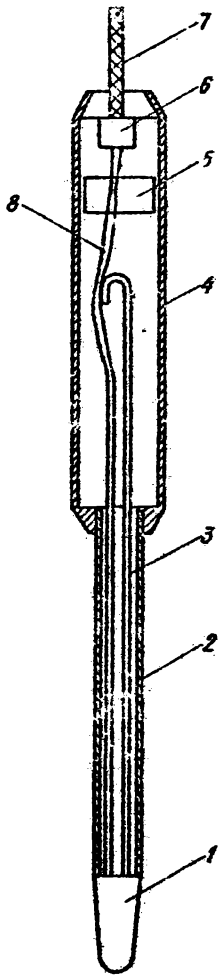


Рис.2. Макет термобурового снаряда
1 – пенетратор; 2 – колонковая труба; 3 – водоподъемная трубка; 4 – водосборный бак; 5 – турбокомпрессор; 6 – кабельный замок; 7 – электрокабель; 8 – электропровод

Технология изготовления моделей состояла в следующем. ТЭНы, скрученные в виде цилиндрической спирали (поперечные размеры 35/25 мм), закреплялись соосно внутри тонкостенных цилиндрических емкостей – форм в верхней части с таким расчетом, чтобы нижний виток спирали в каждом случае находился на одинаковом расстоянии, равном 45 мм от верхнего края формы, и заливались расплавленным алюминием. Затем заготовки обрабатывались на токарном станке в соответствии с заданными формами. В процессе токарной обработки верхней нерабочей торцевой части моделей производилось их периодическое взвешение на весах марки ВЛКТ-500г-М для обеспечения равенства масс (с точностью до 5 г). Рабочая поверхность моделей шлифовалась и полировалась.

Эксперименты проводились на специально сооруженном стенде. Для бурения по льду был изготовлен специальный снаряд (рис.2) по схеме термоэлектробура для «сухих» скважин [2]. Снаряд обеспечивал при бурении удаление талой воды с верхнего торца модели пенетратора с помощью всасывающего турбокомпрессора.

Методикой экспериментов предусматривалось определять скорость бурения плавлением и диаметр образующейся скважины при соблюдении равенства объема, массы и электрической мощности моделей пенетраторов всех форм и постоянства осевой нагрузки. Естественно, что при равенстве объемов модели различных форм имеют и различную рабочую поверхность, что, на первый взгляд, и должно определяться различие в скоростях бурения и прочих показателях его эффективности. Определенную роль при этом должна играть и гидро-

динамическая сторона процесса, «обтекаемость" пенетратора. Как выяснилось в дальнейшем, результат определяется далеко не полностью и даже не в первую очередь указанными факторами.

В процессе первой серии экспериментов по бурению моделями пенетраторов различных форм по блокам льда тепловая мощность моделей с помощью регулятора напряжения поддерживалась во всех случаях практически постоянной (около 460 Вт), осевая нагрузка определялась массой термобурового снаряда и составляла 450 Н. Талая вода удалялась с верхнего (нерабочего) торца моделей с помощью вакуумного турбокомпрессора в составе термобурового снаряда. Температура льда составляла -II÷-I2 °С. Рейс бурения во всех случаях составлял 0,6 м. Через каждые 0,I м проходки регистрировалось время по секундомеру. В расчет скорости бурения принималась проходка после полного погружения модели пенетратора в лед.

Условия и результаты первой серии экспериментов приведены в табл.I. Средняя скорость бурения плавлением по льду в соответствии с нумерацией форм моделей на рис.I распределилась в убывающей последовательности следующим образом: 2 - I,09 м/ч; 5 - 0,98 м/ч; I - 0,85 м/ч; 3 - 0,8I м/ч; 4 - 0,72 м/ч. В противовес теоретическим предпосылкам о том, что наилучшей формой теплового пенетратора является параболоид вращения [3] или тело вращения цепной линии вокруг ее вертикальной оси [I], наименьшая скорость бурения получена именно в последнем случае. Однако причина не в недостатках формы. Дело в том, что источник тепловой энергии - скрученный спиралью ТЭН - расположен в каждом случае ниже верхнего торца модели до глубины 45 мм и поэтому в моделях 3 и 4 - особенно далеко от нижней точки пенетратора. В этом легко убедиться, сопоставив значения высоты моделей различных форм (табл.I).

Во второй серии экспериментов, выполненных по аналогичной методике, использовались при бурении по льду с температурой -7 °С те же модели пенетраторов, но их мощность поддерживалась пропорциональной высоте модели: I - 298 Вт; 2 - 338 Вт; 3 - 443 Вт; 4 - 487 Вт; 5 - 223 Вт (в последнем случае за высоту модели принято расстояние от верхнего торца до середины высоты внутреннего конуса, равное 50 мм). Все остальные условия экспериментов аналогичны первой серии (табл.2). Средняя скорость бурения льда плавлением в соответствии с нумерацией форм моделей (рис.I) распределилась в следующей убывающей последовательности: 4 - 0,98 м/ч; 3 - 0,9I м/ч; I - 0,83 м/ч; 2 - 0,82 м/ч; 5 - 0,63 м/ч. В данном случае максимальную скорость показала модель в форме тела вращения цепной линии вокруг ее вертикальной оси, на втором месте модель формы 3.

Несмотря на условность использованного приема, а именно мощности источника тепловой энергии, пропорциональной высоте модели пенетратора, результаты второй серии опытов свидетельствуют в пользу пенетратора в форме тела вращения цепной линии. Преимуществом данной формы для высокотемпературного пенетратора является плавный переход в цилиндр (при любой длине), что полезно для уплотнения рыхлой породы и устойчивого выдавливания расплава. Кроме того, теплота, рассеивающаяся в радиальном направлении,

Таблица 1

Влияние формы пенетратора на скорость бурения плавлением по блокам льда

Показатели	Номер формы пенетратора				
	1	2	3	4	5
	Цилиндр	Цилиндр + полусфера	Цилиндр + конус наружный	Тело вращения цепной линии	Цилиндр конус внутренний
Высота модели, мм	67	75	100	108	75
Площадь рабочей поверхности, $см^2$	124,4	117,8	122,5	131,4	145,6
Осевая нагрузка, Н	480	450	450	450	480
Подводимое напряжение к пенетратору U, В	218[x] / 176	224 / 158	220 / 217	225 / 232	218 / 153
Ток в цепи пенетратора J, А	2,10 / 1,69	2,05 / 1,71	2,09 / 2,04	2,04 / 2,10	2,11 / 1,48
Подводимая мощность к пенетратору N, Вт	457,8 / 296	459,3 / 338	459,8 / 443	459,0 / 487	459,9 / 223
Температура льда $t_л$, °С	-13 / -7	-12 / -7	-12 / -7	-11 / -7	-11 / -7
Температура расплава (воды) $t_р$, °С	+20	+16,5 / +13	+22 / +20	+24 / +21	+18 / +14
Средний диаметр скважины D, мм	66,9 / 63	58 / 63	64 / 66	67 / 73	- / 68
Глубина скважины H, мм	500 / 400	500	500	500 / 400	500 / 400
Объем расплава (воды)[xx] V, $см^3$	1790 / 1480	1740 / 1186	1730 / 1416	- / 1087	1430 / 1286
Время бурения τ, с	2120 / 1745	1650 / 2205	2225 / 1970	2590 / 1470	1830 / 2235
Скорость бурения v, м/ч	0,85 / 0,83	1,09 / 0,82	0,81 / 0,91	0,72 / 0,93	0,98 / 0,83

[x] В числителе результаты первой серии экспериментов; в знаменателе - второй.

[xx] Вода отобрана по всей скважине для первой серии экспериментов, для второй - после полного внедрения пенетратора в лед.

затрачивается в большей мере полезно (в сравнении с другими испытанными формами) на прогрев массива, который еще должен быть расплавлен по мере поступательного движения пенетратора. Наконец, в силу большей высоты в сравнении с другими формами при равном объеме тело вращения цепной линии вокруг ее вертикальной оси позволяет разместить более длинный и, следовательно, более мощный элемент электросопротивления стержневого типа (например, из карбида кремния) и в большей мере приблизить его к нижней точке, чем, например, при конической форме. Для подтверждения полученных результатов была выполнена третья серия экспериментов, заключающаяся в бурении плавлением

Таблица 2

Влияние формы пенетратора на скорость бурения плавлением по блокам парафина

Показатели	Номер формы пенетратора			
	1	2	3	4
	Цилиндр	Цилиндр + полусфера	Цилиндр + конус наружный	Тело вращения цепной линии
Максимальный диаметр, мм	50	50	50	50
Высота модели, мм	67	75	100	108
Высота стержневого нагревателя, мм	60	65	90	100
Площадь рабочей поверхности, $см^2$	124,4	117,8	122,5	131,4
Масса пенетратора, г	366,81	367,19	367,22	372,58
Подводимое напряжение U, В	47,5	52,0	51,5	52,5
Подводимый ток J, А	2,52	2,30	2,33	2,29
Мощность N, Вт	119,7	119,6	120,0	120,2
Глубина скважины L, мм	200	400	300	400
Время бурения τ, с	779	1370	777	1024
Средний диаметр скважины, мм	65–68	54	51	50,5
Средняя скорость бурения v, м/ч	0,92	1,06	1,39	1,41

по блокам парафина без удаления расплава из скважины. Вместо термобурового снаряда использовалась стальная труба диаметром 25 мм, внутри которой был проложен питающий кабель, в нижней части закреплялась та или иная модель пенетратора. Этот упрощенный снаряд устанавливался внутри вертикально расположенной направляющей трубы. Постоянная во всех случаях осевая нагрузка создавалась силой веса снаряда и составляла 120 Н.

При экспериментах использовались усовершенствованные модели различных форм, кроме цилиндра с внутренним конусом. Модернизация заключалась в том, что в теле каждой модели соосно был установлен нагреватель стержневого типа по всей их длине (не доходя 10 мм до нижней точки). При экспериментах соблюдались условия равенства объемов, массы и тепловой мощности, а следовательно, и удельной тепловой мощности моделей пенетраторов.

Условия и результаты экспериментов представлены в табл.2 и убедительно подтверждают справедливость высказанных выше соображений в отношении рационального использования большей высоты пенетратора в форме тела вращения цепной линии для размещения более длинного и мощного стержневого источника тепловой энергии.

Вместе с тем нельзя увлекаться увеличением высоты пенетратора ради повышения тепловой мощности. Выяснению влияния высоты пенетратора при пропорциональном росте тепловой мощности на эффективность бурения плавле-

нием была посвящена четвертая серия опытов. Бурение велось моделями пенетраторов цилиндрической формы с полусферической призабойной частью диаметром 5,6 мм, длиной 100 и 200 мм и мощностью соответственно 186 и 368 Вт по льду с температурой $t_л = -7$ °С и 62 и 133 Вт по парафину комнатной температуры. Пенетраторы прикреплялись к стальной штанге диаметром 5 мм с проложенным внутри изолированным токопроводом. Осевая нагрузка при бурении по льду менялась в пределах от 1,6 до 115,2 Н, а при бурении по парафину составляла в первом случае (при длине пенетратора 100 мм) 1.6 Н, во втором (200 мм) – 1,8 Н. Талая вода и расплавленный парафин из скважины не удалялись. В зависимости от глубины бурения по льду (до 0,6 м) при пенетраторе длиной 100 мм диаметр скважины составлял 18–20 мм, а длиной 200 мм – 27–33 мм, при бурении по парафину (до 0,5 м) соответственно 10 и 14,5 мм. Скорость бурения по льду пенетратором длиной 100 мм в зависимости от нагрузки изменялась в пределах от 4,5 до 5,9 м/ч, а по парафину от 7,1 до 8,3 м/ч. Пенетратор высотой 200 мм, несмотря на более чем двойную мощность, не обеспечил повышения скорости бурения плавлением. Она составляла по льду 5,3–5,4 м/ч при осевой нагрузке 50 Н и в парафине 7,2 м/ч при нагрузке 1,8 Н.

Установленные факты свидетельствуют, что при излишне большой высоте пенетратора (при пропорциональном увеличении мощности) в действие вступают явления, не учитываемые современной теорией бурения плавлением. В кольцевом пространстве вокруг пенетратора в условиях эксперимента возникает естественная конвекция расплава, приводящая к интенсивному и нерациональному расплавлению массива в радиальном направлении. Возможно также кипение расплава, полностью исключающее целесообразность дальнейшего увеличения тепловой мощности пенетратора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Кудряшов Б.Б., Литвиненко В.С. Исследование влияния высоты пенетратора на эффективность бурения горных пород плавлением // Техника и технология геолого-разведочных работ / МГРИ. М., 1987, № 10.

2. Кудряшов Б.Б., Яковлев А.М. Бурение скважин в мерзлых породах. М.: Недра, 1983.

3. Тепломассоперенос при контактном плавлении / В.К.Чистяков, А.Н.Саламатин, В.А.Чугунов, С.А.Фомин. Казань: Изд-во Казанского ун-та. 1984.