*В.С.Литвиненко, Б.Б.Кудряшов, Н.И.Николаев, Ю.А.Нифонтов, В.К.Чистяков, И.Г.Шелковников, А.М.Яковлев, А.В.Козлов, Н.И.Васильев, В.М.Зубков, А.Н.Дмитриев, Г.Н.Соловьев, П.Г.Талалай, В.В.Никишин, П.Ю.Танинский, Е.Ю.Цыгельнюк*

УДК 622.243

# ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ ПРОГРЕССИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ БУРЕНИЯ СКВАЖИН В ОСЛОЖНЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Изложены основные результаты научных исследований и разработок кафедры технологии и техники бурения скважин, выполненных или завершенных в 2000 г. В области глубокого бурения во льдах Антарктиды главный результат состоит в разработке проекта экологически безопасного вскрытия подледникового озера Восток – уникального природного образования, комплексное изучение которого вызывает исключительный интерес мировой научной общественности. На леднике Академии наук (арх. Северная Земля) в рамках международной экологической программы PEGAIS пробурена с полным отбором керна скважина глубиной 505 м, в ней выполнены геофизические измерения. Создан новый способ бесструбного крепления и изоляции осложненных интервалов скважин с помощью легкоплавких связующих материалов и теплового тампонирующего пенетратора. Разработаны основы теории и технологии ликвидационного тампонирования гидрогеологических скважин с экономически и экологически эффективным применением в составе тампонажных смесей дешевых минеральных отходов горного производства. Результативно продолжены исследования и опытно-конструкторские разработки по комбинированному тепловому и гидродинамическому воздействию на низкодебитные продуктивные горизонты для повышения дебита эксплуатационных скважин на нефть и газ. Уточнены закономерности гидро- и пенотранспорта керна, в последнем случае по одинарной бурильной колонне разработаны новые программы для ЭВМ, позволившие расширить область и повысить достоверность расчетов по регулированию и нормализации циркуляционных и теплообменных процессов при бурении и освоении скважин.

Primary results of research and engineering activities of the Department of Technology and Techniques of Well Sinking performed and completed in the year 2000 are given an account of. The main result of the long-hole drilling in Antarctic ice is the project development of ecologically safe opening-up of the subglacial lake Vostok – a unique natural phenomenon, which complex study is of greatest interest for the world scientific community. On the Academy of Sciences glacier (Northern Land archipelago) within the framework of the international ecological programme PEGAIS a well of 505 m in length has been drilled with the total recovery of core. Geophysical metering has been carried out in the well. A new method of pipeless casing and sealing of abnormal intervals using easily melted binding material and thermal plugging-back penetrator has been developed. There have been developed basic theoretical and technological principles of liquidation plugging of hydro-geological boreholes using economical and ecologically-safe grouting mortar, based on cheap mineral waste. Investigations and experimental development of combined heat and hydrodynamic stimulation of low yield producing sands to increase oil and gas flow rate of production wells have been effectively proceeded with. Regularities of core hydro and foam transfer have been specified. New PC applications that enable data adequacy and range of application increase in regulation and stabilisation estimation of circulation and heat exchanging processes in well sinking and development have been generated.

* * *

Основные направления научно-исследовательских работ кафедры технологии и техники бурения скважин (ТТБС) в 2000 г. были связаны с совершенствованием существующих и созданием новых прогрессивных технологий бурения скважин в сложных геолого-технических и организационных условиях. На фоне сложностей переходного периода к рыночной экономике в последние годы наметился подъем производства в минерально-сырьевом комплексе страны, наблюдается устойчивое наращива-

ние объемов бурения скважин различного назначения с использованием современных ресурсосберегающих и экологически чистых технологий.

Как и в предыдущие годы, исследования и разработки в области теории, техники и технологии бурения скважин в осложненных условиях в 2000 г. проводились по следующим основным направлениям.

1. Теоретическое обоснование разрабатываемых новых способов, технических средств и технологий бурения и освоения скважин.

2. Экспериментальные исследования по совершенствованию существующих и созданию новых методов и средств бурения и крепления скважин.

3. Экологические проблемы бурения и исследования скважин в осложненных условиях.

4. Внедрение результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок в практику бурения скважин в осложненных условиях.

Научно-исследовательские работы по бурению и исследованию скважин в ледниках и ледниковых покровах продолжались в 2000 г. в тесном сотрудничестве с Арктическим и антарктическим НИИ (ГНЦ РФ ААНИИ), Российской антарктической экспедицией (РАЭ), рядом академических и отраслевых институтов, а также международных и национальных иностранных организаций. Эти исследования включали продолжение бурения и исследования глубоких скважин на станции Восток в Антарктиде и на леднике Академии наук (арх. Северная Земля) в Арктике, разработку экологически безопасной технологии вскрытия подледникового озера Восток, участие в международном проекте бурения и исследования глубоких скважин в ледниковом покрове Антарктиды.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА БУРЕНИЯ ПЛАВЛЕНИЕМ СТУПЕНЧАТЫМ ТЕРМОДОЛОТОМ

Ранее полученные нами и другими авторами решения задачи бурения льда (фирна, снега) плавлением [1-6, 10] не пригодны для анализа механизма вскрытия подледникового озера скважиной с двухъярусным забоем, одни из них не учитывают рассеивание теплоты в окружающий массив, другие – экранирующего действия непрерывно образующейся пленки талой воды и гидравлических сопротивлений при ее вытеснении из-под рабочего органа, или этот учет крайне сложен и не доведен до уровня инженерных расчетов.

Рассмотрим установившийся процесс теплообмена с ледяным забоем и окружающей средой пилотного термодолота в форме тела вращения цепной линии вокруг вертикальной оси и кольцевой опорной термокоронки цилиндрической формы со слабоконическим рабочим торцом. Такая методика может быть использована при любой другой форме составных элементов рабочего органа. Принимаем пилотный и опорный элементы рабочего органа в качестве тел с равномерно распределенными тепловыми источниками, верхние торцы обоих элементов теплоизолированы и в теплообмене не участвуют. Теплофизические свойства льда и талой воды характеризуются значениями соответствующих параметров при средней температуре, что соответствует общепринятым в горной теплофизике допущениям. Аналитически рассматривается двухмерная тепловая задача, упрощенная с помощью принципа суперпозиции [9] .В рамках принятых допущений были получены аналитические выражения для определения скорости бурения плавлением ступенчатой коронкой.

Для пилотного термодолота

$$\upsilon_{д} = \frac{2F_1\lambda_{в}}{\pi(R_1+2\delta)^2 c_{в}\rho_{л}\delta}\times$$

$$\times\left[\frac{N_1}{\pi a(\Psi - c_{л}T_{л})\rho_{л}\upsilon_{д} - 4(R_1+\delta)T_{л}b} - 1\right],$$

где $a = (R_1 + 2\delta)^2 \cdot$ $b = \sqrt{\pi\lambda_{л}c_{л}\rho_{л}H_{ц}\upsilon_{д}}$;

$$\delta = \frac{1}{2}\sqrt[3]{\frac{\lambda\upsilon^2\rho_{л}^2 b\left[\left(R_1^2+2b^2\right)\mathrm{sh}\frac{R_1}{b} - 2bR_1\mathrm{ch}\frac{R_1}{b}\right]}{2\rho_{в}\left[2p - g\rho_{в}b\left(\mathrm{ch}\frac{R_1}{b} - 1\right)\right]}}$$

В этих выражениях, совместно представляющих собой трансцендентное уравнение: $R_1$ максимальный радиус термодолота, м; $\delta$ средняя толщина водяной прослойки, м; $c_в$ – удельная массовая теплоемкость воды при средней температуре, Дж/(кг·°С); $\rho_л$ – плотность льда, кг/м$^3$; $\upsilon_д$ – установившаяся скорость бурения, м/с; $\Psi$ – удельная теплота плавления (кристаллизации) льда, Дж/кг; $c_л$ – удельная массовая теплоемкость льда, Дж/(кг·°С); $T_л$ – естественная температура льда в массиве, °С; $\lambda_л$ коэффициент теплопроводности льда, Вт/(м·°С); $\lambda_в$ – коэффициент теплопроводности воды при средней температуре, Вт/(м·С°); $F_1$ – общая площадь рабочей поверхности термодолота, м$^2$; $\rho_в$ – плотность воды, кг/м$^3$· $H_ц$ – высота цилиндра, эквивалентного термодолоту по объему, м; $\lambda$ – безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления; $b$ – параметр цепной линии, м; $p$ – удельное осевое давление на забой, Па.

Для опорной кольцевой термокоронки трансцендентное уравнение имеет подобную структуру с рядом отличий, обусловленных конструктивными особенностями и влиянием пилотного термодолота.

Полученные приближенные аналитические выражения пригодны для расчетов, относящихся, соответственно, к пилотному термодолоту и опорной термокоронке как в случае жесткого, так и скользящего соединения. При скользящем соединении скорость бурения пилотным долотом может быть выше, чем опорной термокоронкой как за счет большей удельной тепловой мощности, так и за счет большего удельного осевого давления в случае, например, подпружиненного скользящего соединения термодолота с опорной термокоронкой.

При жестком соединении удельная осевая нагрузка будет в любом случае одинаковой, но при различии в объемной удельной мощности термодолота и термокоронки будут различны средние температуры их рабочих поверхностей и средние толщины окружающих водяных прослоек.

Приближенность полученных расчетных аналитических формул состоит в использовании при их выводе общепринятых в горной теплофизике допущений и упрощений, заключающихся, главным образом, в осреднении ряда исходных и аналитически определяемых параметров и показателей, а также в применении принципа элементарной суперпозиции. Поставленные и приближенно решенные здесь задачи могут быть аналитически рассмотрены более детально. Например, вместо сравнительно простых расчетных формул для средней температуры или средней толщины водяной прослойки могут быть получены существенно более сложные аналитические выражения для их распределения по рабочей поверхности. Однако многолетний опыт СПГГИ в области анализа, расчетов и разработок термобуровой техники, как и решения целого ряда других задач горной теплофизики [3], показывает отсутствие нужды в излишней детализации и сложных математических построениях, которые не только усложняют расчеты, но в большинстве случаев не дают преимуществ в смысле их точности, например, при оценке определяющих факторов процесса бурения плавлением. Кроме того, точная математическая постановка тепломассообменных задач, как правило, не дает возможности учесть одновременное влияние определяющих конструктивных и технологических параметров. Опыт показывает более важное влияние на точность расчетов достоверного определения параметров, входящих в приближенные расчетные формулы.

## БУРЕНИЕ НА ЛЕДНИКЕ АКАДЕМИИ НАУК

В соответствии с международными программами «Система моря Лаптевых» и «Изучение палеоклимата Арктики по ледяным кернам» (ICEPP) в рамках международного проекта PEGAIS «Глобальные изменения климата Арктики» в СПГГИ по заказу института Альфреда Вегенера (ФРГ) в 1998 г. был спроектирован и изготовлен разборный буровой комплекс для бурения скважин во льдах глубиной до 1000 м.

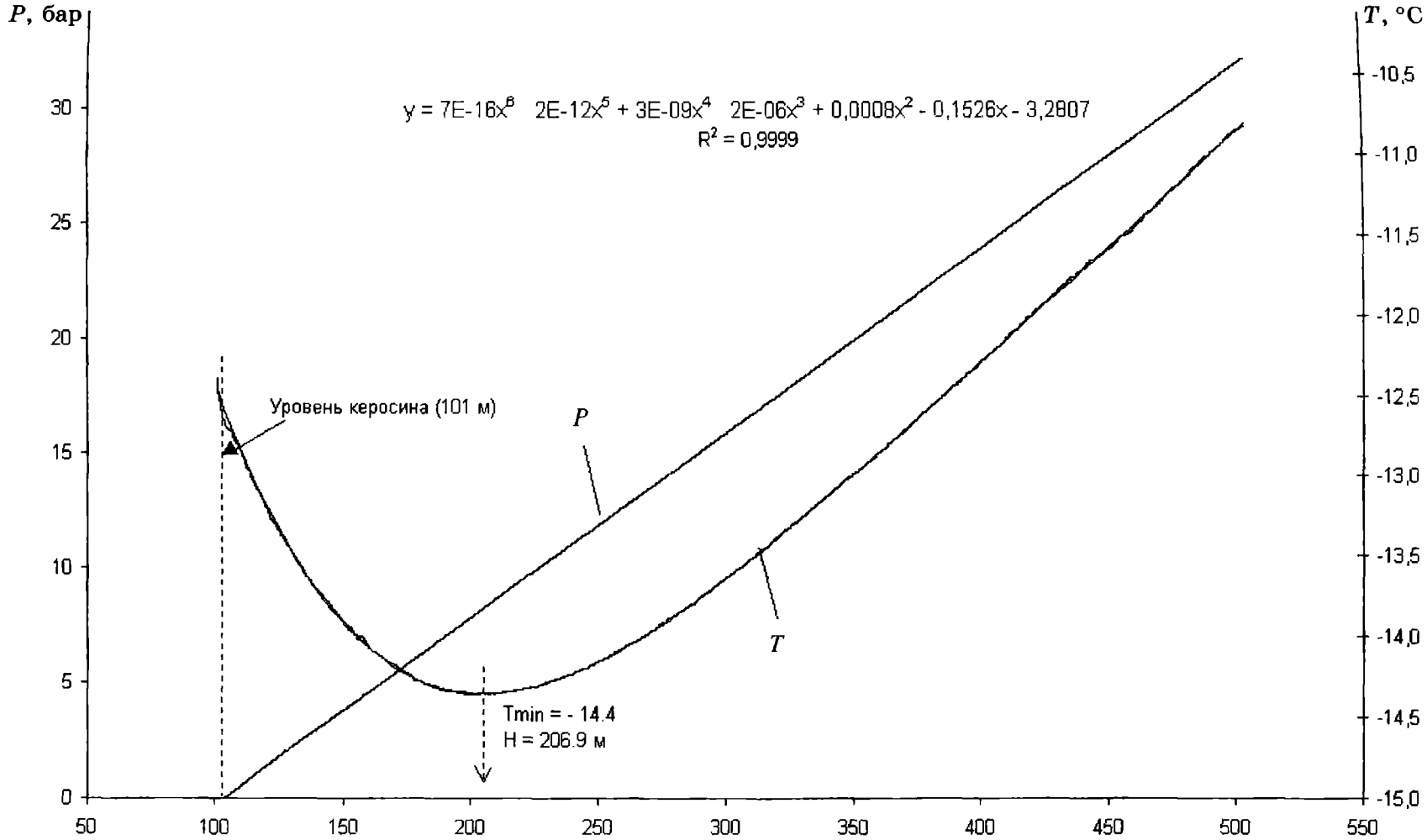



**Рис.1. Результаты измерения температуры и давления по скважине № 1 (купол ледника Академии наук)**

В 1999 г на ледник Академии наук (арх. Северная Земля) было доставлено и смонтировано буровое оборудование. Выполнен 51 рейс бурения, из них 45 рейсов с отбором керна. Глубина скважины достигла 54 м. Бурение было начато колонковым электромеханическим снарядом КЭМС-127 [13] с обратной призабойной циркуляцией воздуха, что позволило в проницаемой снежно-фирновой зоне эффективно очищать забой от шлама, обеспечить высокую механическую скорость бурения при отличном качестве керна.

В 2000 г. после расконсервации бурового комплекса и скважины было продолжено ее бурение с глубины 54 м. До глубины 109 м бурение велось с очисткой забоя от шлама воздухом. При глубине 109 м в скважину залита незамерзающая жидкость, и бурение продолжено до глубины 505 м к концу сезонных работ.

Буровой снаряд работал вполне удовлетворительно. Механическая скорость бурения и рейсовая проходка были близки к расчетным значениям. За все время бурения с заливкой скважины керосином были лишь две остановки из-за выхода из строя электродвигателя насоса и замыкания в цепи основного электродвигателя по причине нарушения изоляции токоведущего провода. После окончания бурения проведены одновременные измерения температуры по стволу скважины и давления заливочной жидкости (рис.1) с помощью скважинного манометра-термометра типа КМТ-01.

Результаты термометрии могут рассматриваться лишь в качестве предварительных данных о температурном режиме ледника, поскольку время выстойки скважины после окончания буровых работ и последней заливки керосина составляло всего несколько часов. Результаты инклинометрии свидетельствуют о практически вертикальном положении ствола скважины.

## ПРОЕКТ ВСКРЫТИЯ ОЗЕРА ВОСТОК

Вскрытие озера Восток предполагается выполнить из уже пробуренной скважины 5Г-1 в несколько этапов с применением двух типов буровых снарядов и двух типов заливочных жидкостей.

Первый этап работ предусматривает бурение в скважине 5Г-1 дополнительно около 100 м с помощью бурового снаряда КЭМС-132 и комплекса надежного поверхностного бурового оборудования, давно здесь используемого и безопасного в экологическом отношении. Это позволит отобрать около 100 м керна базальных слоев ледника, содержащих уникальную информацию об эволюции озера.

Перед вторым этапом работ на забой скважины доставляется биологически стерильная и экологически совершенно безопасная жидкость (кремнийорганическая), которая создает буферный слой мощностью до 100 м, разделяющий забой и ранее использовавшуюся заливочную жидкость (смесь авиационного керосина ТС-1 и фреона 141b).

Второй этап работ (бурение около 30 м льда до контакта с озером) предполагается выполнить с использованием термобурового снаряда со ступенчатым рабочим органом, благодаря чему под снарядом формируется пилот-скважина с диаметром в три-четыре раза меньше, чем диаметр основной скважины. Во время бурения в скважине обеспечивается недокомпенсация горного давления от 2 до 3 бар.

При достижении забоем пилотной скважины поверхности озера (рис.2) возможны три варианта соотношений давления столба жидкости у забоя $P_ж$ и давления воды в озере $P_0$ 1) $P_ж < P_0$; 2) $P_ж = P_0$; 3) $P_ж > P_0$. Первый вариант является ожидаемым, а второй и третий рассматриваются как маловероятные.

При $P_ж < P_0$ озерная вода поднимется в скважине на высоту $\Delta h$, соответствующую разнице давлений в озере и в скважине $\Delta P = P_0 - P_ж$. При термобурении рабочий орган должен быть в постоянном контакте с поверхностью забоя под действием силы, равной части веса бурового снаряда. Таким образом, прямой проход воды из озера в скважину невозможен. Вода может подняться в скважину, если буровой снаряд будет поднят над забоем с помощью грузонесущего кабеля или под действием усилия, которое может возникнуть в момент контакта с поверхностью озера из-за разности давлений, если оно будет больше усилия, прижимающего буровой сна-

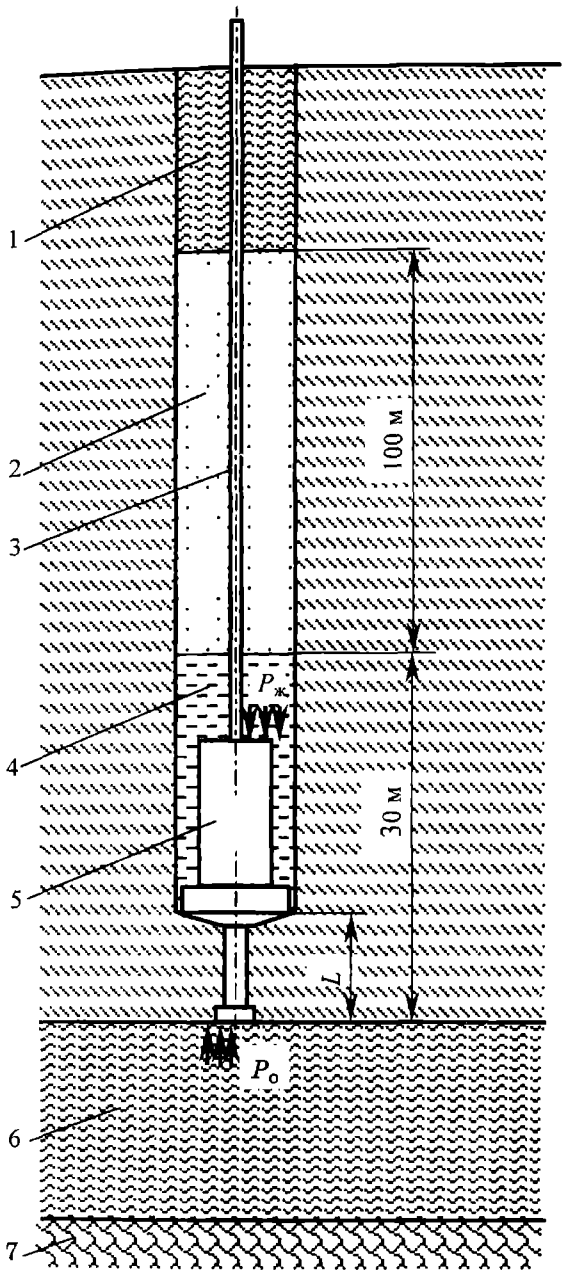



Рис.2. Схема вскрытия озера

1 – заливочная жидкость; 2 – кремнийорганическая жидкость; 3 – грузонесущий кабель; 4 – талая вода; 5 – термобуровой снаряд; 6 – подледное озеро; 7 – донные осадки

ряд к забою (вес бурового снаряда за вычетом архимедовой выталкивающей силы).

При $P_ж = P_0$ подъем озерной воды в скважину будет происходить при подъеме снаряда по мере снижения гидростатического давления заливочной жидкости, т.е. объем извлеченного из скважины кабеля будет замещаться озерной водой.

При $P_ж > P_0$, что практически исключено, в момент контакта пилотного термодолота с поверхностью озера на буровой снаряд начнет действовать усилие $P_г$, прижимающее его к кольцевому забою скважины. При прекращении электропитания кольцевая коронка будет прижата к уступу забоя и изолирует озеро от скважины. После этого необходимо откачать часть жидкости из скважины, опустив ее уровень на такую величину, чтобы обеспечить неравенство $P_ж < P_0$ Ситуация будет приведена к первому варианту, и начнется извлечение бурового снаряда из скважины.

Таким образом, термобуровой снаряд будет выполнять функцию клапана, обеспечивающего экологическую безопасность, разобщая скважину и озеро в момент контакта пилотного термодолота с его поверхностью.

Бурение последних 30 м льда до контакта с озером будет производиться термобуровым снарядом без его отрыва от забоя. При протаивании снарядом льда будет происходить естественное очищение снаряда и кабеля от заливочной жидкости талой водой, столб которой образует еще один буферный слой, расположенный ниже кремнийорганической жидкости (рис.2).

После достижения поверхности озера Восток (окончание второго этапа) работы в скважине 5Г-1 прекращаются на период замерзания внедрившейся в скважину озерной воды. Затем производится отбор части льда, образовавшегося из озерной воды, снарядом КЭМС-132 в виде ледяного керна. Остаток льда не разбуривается, что обеспечивает полную изоляцию ствола скважины 5Г-1 от поверхности озера.

По сути дела, в соответствии с разрабатываемой экологически безопасной технологией, на данном этапе вскрытия озера Восток не скважина проникает в озеро, а озеро проникает в скважину.

Для обеспечения вскрытия озера Восток в 2000 г. выполнено эскизное проектирование конструкции термобурового снаряда, вспомогательного бурового оборудо-

вания, системы контроля и управления его работой.

В прямой связи с задачей преодоления скважиной антарктического ледника на всю его максимальную мощность продолжаются исследования и разработки жидкостного термоэлектробурового снаряда. Этой теме посвящена кандидатская диссертация аспиранта В.В.Никишина, защищенная в конце 1999 г. Залегающий на больших глубинах в районе станции Восток базальный лед отличается весьма высокой вязкостью, что вызывает серьезные затруднения при механическом бурении-резании. В этих условиях, тем более применительно к задаче вскрытия подледникового озера Восток, целесообразно применение жидкостного термобурового снаряда. Главное преимущество жидкостного снаряда в том, что его тепловая мощность практически не ограничена, поскольку теплота генерируется не в радиально узком кольцевом рабочем органе, как в других электротермобуровых снарядах [4-6], а во встроенном в состав снаряда котле, откуда жидкий теплоноситель под влиянием разрежения, создаваемого электронасосом в кольцевом рабочем органе, подается на открытый забой. Используемая в качестве промежуточного теплоносителя горячая заливочная жидкость разрушает ледяной забой за счет теплового и гидродинамического воздействия, что обеспечивает достаточно высокую скорость бурения. Кроме того, в снаряд встроен полнопоточный фильтр, обеспечивающий непрерывную очистку заливочной жидкости.

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГЛУБОКОЙ СКВАЖИНЫ НА СТАНЦИИ ВОСТОК

В сезонный период 45-й РАЭ (декабрь 1999 г. январь 2000 г.) продолжены комплексные геофизические исследования в глубокой скважине 5Г-1 и проведены технологические буровые работы с целью оценки состояния скважины после продолжительного простоя. По ряду организационных причин работы в скважине 5Г-1 на станции Восток в период 44-й РАЭ не проводились, и скважина находилась в состоянии покоя в течение двух лет.

В соответствии с программой работ проведены следующие наблюдения в скважине 5Г-1: измерения уровня заливочной жидкости, диаметра скважины, инклинометрия, измерения давления и плотности заливочной жидкости.

Длительный простой скважины 5Г-1 до начала сезонных работ 45-й РАЭ явился положительным фактором с точки зрения восстановления температурного режима ледяного массива, нарушенного при бурении скважины и других операциях. Уровень заливочной жидкости, определенный при первом спуске специальным снарядом, находился на глубине 87 м. В дальнейшем уровень заливочной жидкости фиксировался при каждом рейсе по показаниям датчика нагрузки на забой.

Прямые измерения проводились модернизированным скважинным манометром-термометром КМТ-А, который позволяет одновременно выполнять высокоточные измерения температуры и давления заливочной жидкости в экстремально суровых условиях антарктического ледника. Техническая характеристика КМТ-А:

| | |
|---|---|
| Пределы измерения давления, МПа | 0÷40 |
| Приведенная погрешность измерения давления | –0,2 % |
| Разрешающая способность по давлению, МПа | 0,001 |
| Пределы измерения температуры, °С | +10÷–55 |
| Абсолютная погрешность измерения температуры, °С | ±0,1 |
| Разрешающая способность по температуре, °С | 0,01 |

Всего в сезонный период 45-й РАЭ в скважине 5Г-1 было выполнено три полных цикла измерений температуры и давления.

Измерения температуры и давления производились непрерывно, как при движении кабеля, так и при остановках через 5 м. При этом с клавиатуры ПК в программу вводились значения истинной глубины по промеру. Температурный профиль по скважине 5Г-1, полученный в результате первичной обработки файла данных, приведен на рис.3. Полученные экс-

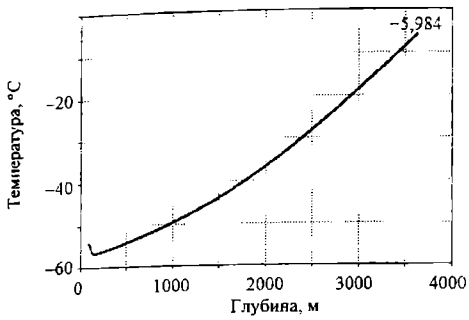



Рис.3 .Температурный профиль по скважине 5Г-1 (21.12.99 г.)

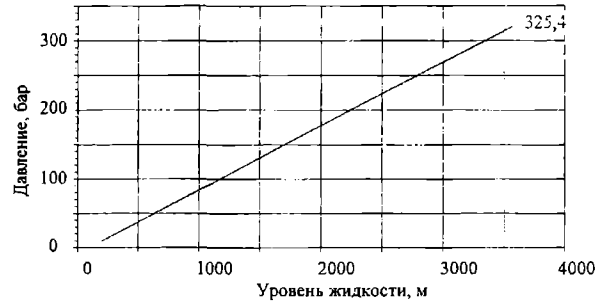



Рис.4. Профиль распределения давления по скважине 5Г-1 (21.12.99 г.)

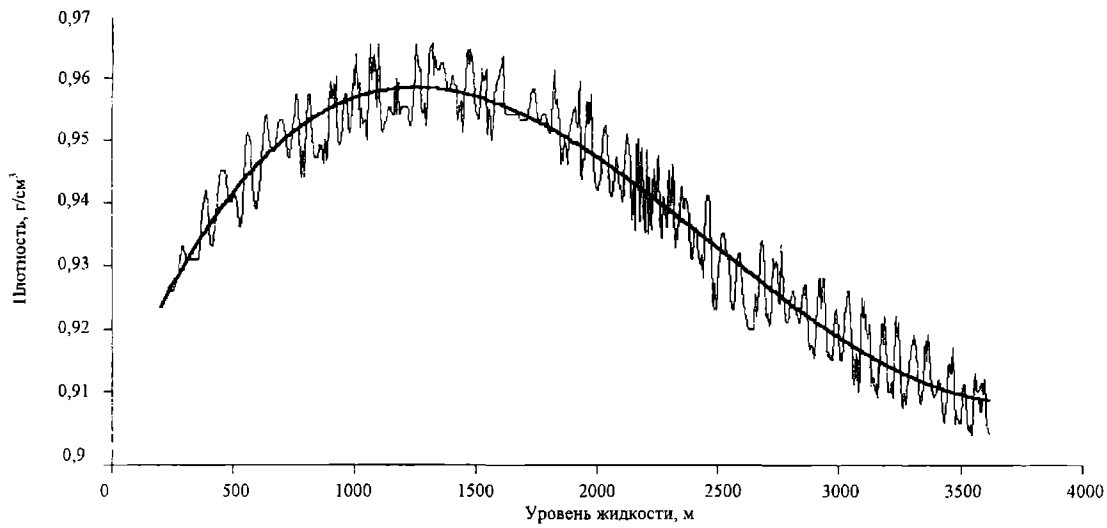



Рис.5. Расчетные значения плотности заливочной жидкости в скважине 5Г-1 (21.12.99 г.)

периментальные данные о распределении температуры в ледниковом покрове использовались при расчете «температурного метронома» для палеоклиматических реконструкций.

Данные о распределении давления и плотности заливочной жидкости по глубине (рис.4 и 5) учитывались при анализе технического состояния скважины.

Согласно измерениям, выполненным перед консервацией скважины в январе 1998 г., с глубины 2700 м и до забоя горное давление было практически скомпенсировано давлением заливочной жидкости. Эти данные совпадают с результатами новых прямых измерений давления жидкости в скважине прибором КМТ-А и косвенно подтверждаются отсутствием деформаций стенок скважины в течение двухлетнего простоя.

Как показали результаты измерений диаметра скважины, выполненные в интервале 2000-3623 м, сколько-нибудь заметного сужения ствола скважины за время ее простоя не наблюдается (рис.6).

Измерения зенитных и азимутальных углов в скважине выполнялись с помощью серийного инклинометра типа "КИТ", основная погрешность которого составляла соответственно ±0,5° и ±10° (при зенитном угле более 3°). До глубины 2000 м скважина

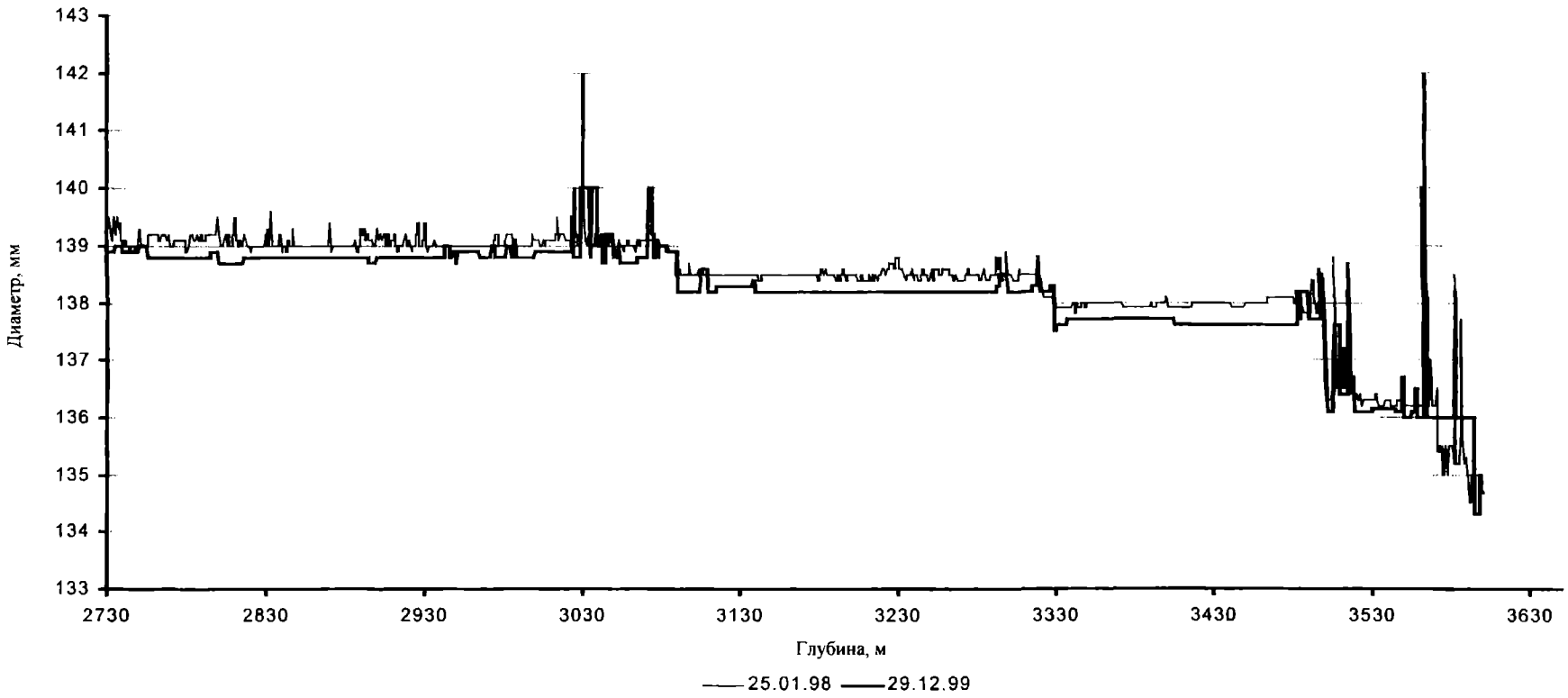
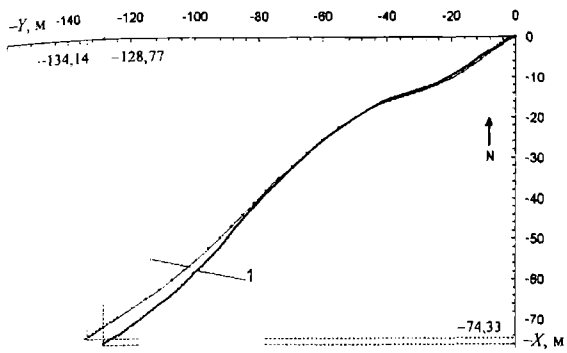



Рис.6. Диаграммы изменения диаметра скважины 5Г-1 по глубине

*а*




*б*

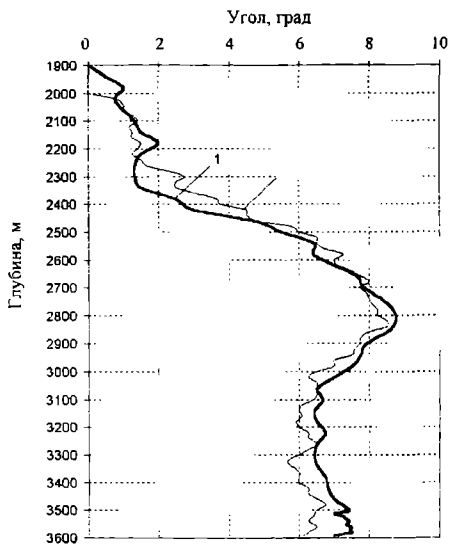



Рис.7 Результаты инклинометрии скважины 5Г-1: *а* – горизонтальная проекция; *б* – график изменения угла наклона

1 – измерения в 45-й РАЭ; 2 – измерения в 43-й РАЭ

5Г-1 практически вертикальна зенитный угол не превышает 0,5° (рис.7); на более глубоких горизонтах зенитный угол довольно резко возрастает, достигая 8,5° в интервале глубин 2780-2860 м при среднем азимуте 235° Далее зенитный угол уменьшается и в области забоя скважины составляет 6° при азимуте 243° При этом отклонение проекции забоя скважины от ее устья (в плоскости *XY*) составляет 149,5 м.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ПЛОТНОСТИ И ВЯЗКОСТИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ПРОМЫВОЧНЫХ ЖИДКОСТЕЙ

Одним из основных факторов, определяющих эффективность разработанных технологий бурения глубоких скважин в ледниках, является обоснованный выбор специальных низкотемпературных промывочных жидкостей [5]. Помимо обеспечения экологической безопасности, важнейшим из технологических требований, предъявляемых к этим жидкостям, является допустимость регулирования их плотности и вязкости в пределах значений, определяемых возможностями успешного преодоления скважиной всей ледниковой толщи и обеспечения длительной устойчивости ее ствола.

В настоящее время при бурении скважин в ледниках широко используются низкотемпературные промывочные жидкости на основе жидких углеводородов с добавками для регулирования их плотности различных утяжелителей [11, 12]. С точки зрения экологической безопасности, эти жидкости не могут быть использованы для вскрытия и исследования подледниковых водных толщ, так как их основа содержит 20-22 % токсичных ароматических углеводородов, которые даже при малых концентрациях оказывают отравляющее действие на низшие формы жизни.

С целью предотвращения «загрязнения» реликтовой среды подледникового озера Восток предложено в качестве заливочной жидкости, непосредственно контактирующей с водой озера, использовать химически инертные и биологически стерильные низкотемпературные полиметилсилоксановые соединения (ПМС), относящиеся к классу кремнийорганических. Кремнийорганические жидкости широко используются в промышленности в качестве охлаждающих и гидравлических сред, способных работать при низких отрицательных температурах (до –100 °С). Они доступны и относительно недороги, способны долго сохраняться в широком диапазоне температур и давлений (табл.1).

*Таблица 1*

**Основные свойства низкотемпературных полиметилсилоксановых жидкостей [8]**

| Торговая марка | Молекулярная масса | $\rho^*$, кг/м$^3$ | $\mu^*$, мПа·с | $t_{заст.}$, °С | $t_{вспыш}$, °С | $t_{воспл}$, °С |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ПМС-1,5 | 260-300 | 850 | 1,5 | -88 | 40 | 71 |
| ПМС-2,0 | 340-370 | 870-878 | 2,0 | -83 | 56 | 79 |
| ПМС-5,0 | 690 | 920 | 5,0±0,5 | -60 | 115 | 135 |

* При температуре 20 °С

Применение наименее вязких ПМС все же ограничено относительно высокой их вязкостью при низких отрицательных температурах (более 12 мПа·с при –55 °С), что резко снижает скорость спуско-подъемных операций при бурении глубоких скважин снарядами на грузонесущем кабеле. Их использование возможно при уменьшении вязкости за счет добавок специальных разжижителей или при заполнении призабойных интервалов скважин, где температура не превышает –10 °С.

Для регулирования плотности и вязкости ПМС предложено использовать в качестве добавок к ним хорошо зарекомендовавшие себя озонобезопасные фторорганические соединения. Для оценки оптимальной концентрации этих добавок в лаборатории кафедры ТТБС в 2000 г. проведены экспериментальные исследования зависимости плотности и вязкости кремнийорганической жидкости от температуры и концентрации фторорганических добавок.

На первом этапе исследования эксперименты проводились со смесью жидкости ПМС-5 с фтортрихлорметаном (хладон-11). Для создания необходимых низких температур использовалась японская холодильная установка Mini-Subzero (MS-71). Для измерения вязкости использовался капиллярный вискозиметр ВПЖ-1, плотности – ареометры АОН-1.

Эксперименты проводились с тремя смесями плотностью 950, 1000, 1050 кг/м$^3$ при температуре 0 °С, что соответствовало массовой концентрации в них хладона-11 соответственно 5, 13 и 21 %. Вязкость и плотность смесей измерялись при температуре 0 °С, после чего они поочередно охлаждались до температуры –50 °С. Затем измерения повторялись при постепенном нагреве испытуемых жидкостей до 0 °С с интервалом в 10 °С. Результаты исследований представлены в табл.2.

*Таблица 2*

**Результаты определения плотности и вязкости различных смесей ПМС-5 с хладоном 11**

| $T_{смеси.}$, °С | Концентрация хладона-11 в смеси, % | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 5 | | | 13 | | | 21 | | |
| | ρ, кг/м$^3$ | μ, мПа·с | ν $10^{-6}$, м$^2$/с | ρ, кг/м$^3$ | μ, мПа·с | ν $10^{-6}$, м$^2$/с | ρ, кг/м$^3$ | μ, мПа·с | ν $10^{-6}$, м$^2$/с |
| 0 | 950 | 6,08 | 6,4 | 1000 | 4,2 | 4,2 | 1050 | 3,04 | 2,9 |
| –10 | 958 | 6,32 | 6,6 | 1010 | 4,54 | 4,5 | 1057 | 3,28 | 3,1 |
| –20 | 966 | 6,86 | 7,1 | 1020 | 5,20 | 5,1 | 1065 | 3,73 | 3,5 |
| –30 | 974 | 7,60 | 7,8 | 1030 | 5,97 | 5,8 | 1073 | 4,40 | 4,1 |
| –40 | 982 | 8,51 | 8,7 | 1040 | 7,18 | 6,9 | 1081 | 5,51 | 5,1 |
| –50 | 990 | 10,00 | 10,1 | 1050 | 8,71 | 8,3 | 1090 | 6,87 | 6,3 |

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы.

1. При изменении температуры от 0 °С до –50 °С плотность смеси ПМС-5 с хладоном-11 меняется практически линейно. Увеличение плотности с уменьшением температуры находится в пределах 0,8-1,0 кг/(м$^3$·°С), что позволяет контролировать гидростатическое давление в скважине.

2. Вязкость исследуемых жидкостей в интервале температур от 0 °С до –50 °С колеблется от 2,9 $10^{-6}$ до 10,1 $10^{-6}$ м$^2$/с (от 3,04 до 10 мПа·с), что значительно ниже вязкости чистой жидкости ПМС-5, равной 6,0-17,5 м$^2$/с (5,60-16,8 мПа·с) в том же температурном интервале.

Для окончательного решения вопроса об эффективности использования низкотемпературной жидкости нового типа для бурения глубоких скважин в ледниках необходимо изучить влияние ее сжимаемости на изменение плотности и вязкости с глубиной.

## ЛИКВИДАЦИОННЫЙ ТАМПОНАЖ СКВАЖИН, ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И УТИЛИЗАЦИЯ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВЫХ ОТХОДОВ

Одним из новых направлений работ кафедры ТТБС в 2000 г. явились исследования, связанные с комплексом вопросов надежности установки разделительных мостов в скважинах с целью обеспечения экологической безопасности при их ликвидации. При этом решались следующие задачи:

- разработка методики и экспериментального стенда для исследования особенностей взаимодействия тампонажных смесей с горными породами и обсадными трубами;
- исследование напряженного состояния на контакте изоляционного моста, перекрывающего участки водопроявлений, со стенками скважины;
- разработка эффективных составов смесей для ликвидационного тампонирования скважин;
- исследование физико-механических свойств смесей и тампонажного камня с учетом продолжительности и условий твердения;
- разработка конструкций технических средств и технологии ликвидационного тампонирования скважин.

Основным условием надежного разобщения водоносных горизонтов в пробуренных скважинах является устойчивость создаваемых изоляционных перемычек, определяемая как параметрами и условиями установки мостов, так и характеристиками используемых для этих целей тампонажных материалов.

Одной из перспективных технологических схем ликвидации высоконапорных самоизливающихся гидрогеологических скважин можно считать установку моста выше напорного горизонта. В этом случае решение задачи об устойчивости моста в скважине сводится к определению касательных напряжений на границе «цементный камень – горная порода», зависящих от давления пластовых флюидов, прочности тампонажного камня, диаметра скважины, протяженности и веса моста, глубины его установки, трещиноватости и пористости пород, чистоты поверхности стенок скважины, гидростатического давления над мостом.

Исходя из уравнения равновесия сил, действующих на изоляционную перемычку, и условия прочности тампонажного камня при сдвиге, получено решение задачи по определению потребной длины моста и контактных напряжений, возникающих на границе «цементный камень – порода»

$$\tau_a = \frac{D}{4l\delta}\left\{\frac{8\lambda Q^2 \rho_в h}{\pi^2 D^5} + \left[\rho_в h - \rho_ж (h-l) - \rho_ц l\right] g\right\} - \frac{\tau_в k_п}{\delta},$$

где $D$ – диаметр скважины, м; $l$ – длина моста, м; $\delta$ – коэффициент чистоты поверхности стенок скважины; $\lambda$ – коэффициент гидравлического сопротивления; $Q$ – дебит самоизливающейся скважины, м$^3$/с; $h$ – глубина установки моста, м; $\rho_в$ плотность воды, кг/м$^3$; $\rho_ж$ – плотность промывочной жидкости, кг/м$^3$; $\rho_ц$ – плотность цемента, кг/м$^3$; $g$ – ускорение свободного падения, м/с$^2$; $\tau_a$ – адгезионная составляющая сдвиговых напряжений, Па; $\tau_в$ – механическая составляющая

сдвиговых напряжений, Па; $k_п$ – коэффициент, учитывающий трещиноватость и пористость пород.

Касательные напряжения на контакте с горными породами в общем случае можно охарактеризовать как сумму контактных напряжений, вызываемых силами физико-химического взаимодействия тампонажного материала с горными породами, и напряжений, обусловленных их механическим зацеплением,

$$\tau_{сд} = (\tau_а \delta + \tau_в k_п).$$

Отсутствие единой общепринятой методики, определяющей силы контактного взаимодействия цементного камня с поверхностью ствола скважины и обсадной колонны, вызвало необходимость разработки метода количественной оценки адгезионной и механической составляющих сдвиговых напряжений.

Для решения этой задачи создана экспериментальная установка, состоящая из гидравлического пресса, кюветы, заполняемой тампонажным материалом, цилиндрических образцов, подставки, центрирующей крышки. Использовались образцы трех видов: для определения адгезионных связей смеси с горной породой и обсадными трубами керн и металлический стержень, а для определения сил механического взаимодействия – металлический стержень с кольцевыми проточками, причем для исключения влияния адгезионных сил он покрывался смазкой.

Результаты показали, что с увеличением пористости и трещиноватости пород одного и того же минерального состава сила сцепления керна с цементом возрастает. Для определения зависимости этих усилий от «пустотности» образцов проведены испытания на металлических цилиндрах с проточками, причем глубина проточек и их количество менялись.

Установлено, что механическая составляющая контактных напряжений прямо пропорциональна времени твердения образцов, числу проточек и практически не зависит от их глубины. Основным фактором, контролирующим механическое зацепление цементного камня с породой, является касательное напряжение, возникающее по сдвиговым площадкам и зависящее только от площади сдвигаемых поверхностей и прочностных характеристик цементного камня.

В подтверждение этого тезиса были проведены сравнительные испытания тампонажного камня на сдвиг стандартным методом. Сопоставление полученных данных показывает достаточную их сходимость ~95 %. Отсюда следует вывод, что критерием количественной оценки механического сцепления тампонажного материала с горными породами является предел прочности цементного камня при сдвиге.

Для организаций, проводящих буровые работы, ликвидация скважин связана со значительными затратами, так как тампонажный цемент является дорогостоящим вяжущим материалом. Поэтому целесообразно включать в состав тампонажных материалов дешевые инертные наполнители, в частности такие распространенные, как минеральные отходы переработки руд. Учитывая большие объемы бурения, можно параллельно решать не менее важную задачу утилизации этих отходов.

Анализ компонентного состава и экологической безопасности отходов, скапливающихся в «хвостохранилищах» некоторых горно-обогатительных комбинатов Северо-Западного региона, выявил перспективность использования в качестве наполнителей минеральных отходов ОАО «Апатит» и ОАО «Фосфорит». В качестве базового вяжущего материала использовался портландцемент М-400. Наполнители вводились в состав смеси в количестве 20, 40, 50, 60 %.

Результаты исследований показали, что прочность тампонажного камня с течением времени возрастает при твердении смесей как в воде, так и на воздухе, однако в водной среде различие этого показателя для базового материала и смесей с добавлением наполнителей менее существенно. Так, для смесей с содержанием отходов ОАО «Апатит» происходит снижение прочности композиционного тампонажного камня в сравнении с базовым соответственно на 17-55 %

(28 суток твердения), а для композиций с добавлением отходов ОАО «Фосфорит» – на 7-39 % соответственно.

Интенсивность структурообразования смесей снижается с увеличением процентного содержания отходов, но она вполне приемлема для выполнения технологических операций в скважинах при их ликвидационном тампонировании. Так, время начала схватывания смесей с максимальным содержанием отходов в среднем увеличивается (по отношению к базовому материалу) в 1,4 раза, а конец схватывания – в 1,6 раза. Причем влияние на эти показатели отходов ОАО «Фосфорит» сказывается в меньшей степени, чем отходов ОАО «Апатит».

Так как с помощью указанных смесей предполагается ликвидация скважин, в том числе и в условиях минерализации подземных вод, были исследованы физико-механические свойства этих смесей при их твердении в условиях хлорнатриевой агрессии с концентрацией NaCl, равной 3, 5, 10 и 29 %. Результаты показали перспективность использования разработанных смесей для ликвидационного тампонирования скважин при концентрации соли в воде до 10 %.

При всем многообразии условий процесса межпластовой изоляции подземных вод разработаны пять типовых технологических схем ликвидации скважин.

Для реализации этих схем и оперативной доставки и переработки тампонажного материала разработаны несколько типов тампонирующих устройств. Испытания опытного образца тампонирующего снаряда, проведенные в экспериментальной скважине, показали его работоспособность, надежность и простоту в эксплуатации.

По результатам исследований в области ликвидационного тампонирования скважин аспиранткой кафедры ТТБС Е.Ю.Цыгельнюк подготовлена к защите кандидатская диссертация.

Для дальнейшего развития технологии ликвидационного тампонирования скважин различного назначения необходимо продолжить исследования новых композиций тампонажных смесей с расширенным диапазоном использования наполнителей, разработку технических средств для их доставки и переработки в скважине.

Новые направления в научных исследованиях кафедры в 2000 г. включали разработки, направленные на снижение экологической напряженности при добыче каменного угля на Севере РФ и рациональное использование отходов его обогащения, что явилось содержанием докторской диссертации проф. Ю.А.Нифонтова.

Эффективная утилизация каменноугольной мелочи с различными качественными показателями возможна посредством ее окускования способом брикетирования с применением тонкодисперсных активных связующих материалов при использовании специально разработанной технологии, основанной на управлении процессом структурообразования и миграции сложных флюидных систем. На стадии термообработки брикетов из каменноугольной мелочи с тонкодисперсным активным связующим происходит интенсивная миграция флюидных систем от центра к периферии, которая в результате температурной деструкции и адсорбции компонентов этих систем на поверхности угольных частиц сопровождается циклическим выпадением из них твердой фазы на радиально расположенных относительно центра уровнях, обеспечивающих дополнительное армирование и упрочнение брикета без увеличения расхода связующих материалов. Структурообразование брикета из каменноугольной мелочи с применением тонкодисперсных активных связующих материалов происходит в соответствии с гипотезой, которая, определяя брикет как открытую сильно неравновесную систему, в качестве основного фактора самоструктурирования выделяет протекающую под воздействием внешнего возмущения миграцию сложных флюидных систем, состоящих из внутренней влаги, растворенного в ней связующего, минеральных компонентов и органических частиц угля.

### ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ТЕПЛОТЫ ПРИ БУРЕНИИ И ОСВОЕНИИ СКВАЖИН

В 2000 г. продолжались исследования и разработки тепловых пенетраторов и генераторов теплоты [5]. Новый жаропрочный

композиционный материал на основе углерода и кремния, ставший доступным благодаря конверсии российской военной промышленности, отличается высокой стойкостью против окисления и не требует применения инертного газа при работе высокотемпературного пенетратора уплотняющего типа. Это делает экономически целесообразным бурение неглубоких скважин в рыхлых, слабосвязных, пористых породах с одновременным экологически чистым беструбным креплением за счет уплотнения и термических преобразований проходимых пород. Вполне реально сооружение таких скважин для водоснабжения, прокладки коммуникаций в городском и заводском хозяйстве, для закрепления осыпей, бортов карьеров и отвалов, фундаментов старинных зданий и др.

Для крепления и изоляции отдельных интервалов глубоких скважин, в том числе нефтяных и газовых, можно использовать тампонирующие пенетраторы вытяжного типа из нового материала в сочетании, например, со стеклообразующей шихтой (песок, поташ, сода). В 2000 г. в кандидатской диссертации, защищенной асс. П.Ю.Танинским, доказана возможность и определены пределы экологически безопасного применения легкоплавких органических связующих материалов – полиэтилена и полипропилена в сочетании с инертными наполнителями. В этом случае для изготовления тампонирующего пенетратора может быть использована обычная легированная сталь.

На основе анализа механических и теплообменных процессов, сопровождающих крепление и изоляцию осложненных интервалов скважин легкоплавкими материалами, с использованием общепринятых в горной теплофизике упрощающих допущений получено приближенное аналитическое выражение для радиальной толщины изолирующего экрана из застывшего расплава в пустотах и трещинах обрабатываемого интервала

$$r_1 = \sqrt{r_0^2 + \frac{kN\left[\rho_н + (1/m)\rho_т\right]}{\pi \upsilon n \rho_н \rho_т \left\{\psi + \left[c_т + c_н (1/m - 1)\right](t_ф - t)\right]}},$$

где $r_1$ – внешний радиус зоны застывшего расплава смеси, м; $r_0$ – радиус пенетратора в его максимальном сечении, м; $k$ – коэффициент полезного действия, учитывающий нерациональные потери теплоты на рассеивание в массиве и на перегрев расплава смеси, доли единицы; $N$ – электрическая мощность пенетратора, Вт; $\rho_н$ – плотность наполнителя, кг/м$^3$; $m$ – массовое содержание термопласта в смеси, доли единицы; $\rho_т$ плотность термопласта, кг/м$^3$; $\upsilon$ – скорость принудительного перемещения тампонирующего пенетратора к устью скважины, м/с; $n$ – пустотность массива (относительная площадь сечения дренажных каналов), доли единицы; $\psi$ – теплота фазового перехода термопласта, Дж/кг; $c_т$, $c_н$ – удельная массовая теплоемкость, соответственно термопласта и наполнителя, Дж/(кг·°С); $t_ф$ – температура фазового перехода термопласта, °С; $t$ – естественная температура полимера и наполнителя, °С.

С помощью полученных аналитических выражений применительно к условиям проведения экспериментов на стенде по специально разработанной программе на ПЭВМ выполнен детальный расчетный анализ влияния всех основных природных и технологических факторов на радиальную толщину оболочки из застывшего расплава.

На рис.8 приводится сопоставление опытных и расчетных значений распределения плотности тампонажного камня в пустотах модели проницаемой породы в радиальном направлении, показывающее для столь сложного многофакторного процесса удовлетворительное совпадение. По результатам экспериментов толщина изолирующего слоя застывшего расплава в среднем составляет 12 мм, что практически полностью совпадает с расчетными данными (при $N = 2$ кВт, $\upsilon = 10$ м/ч, $m = 0{,}6$, $n = 0{,}3$). Заметное отклонение расчетной плотности тампонажного камня в большую сторону при $r > 70$ мм объясняется недостаточно глубоким проникновением гранулированной смеси в дренажные каналы и малым сопротивлением механическому уплотнению смеси при высокой пустотности модельного массива ($n = 0{,}3$).

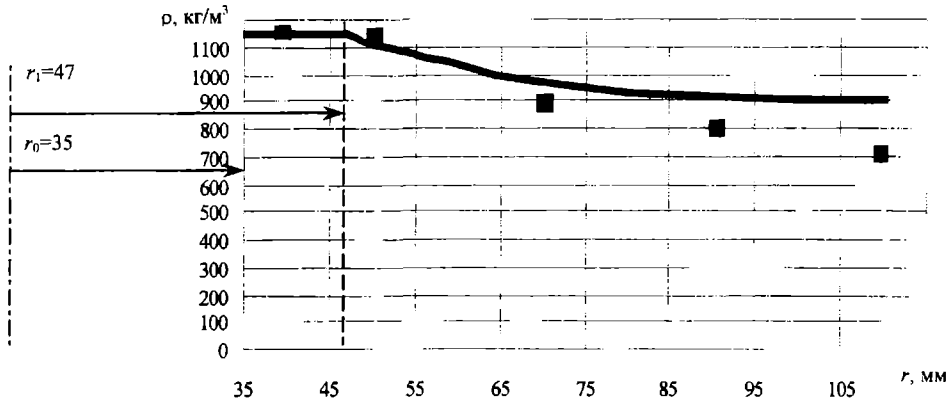



Рис.8. Расчетная кривая и опытные значения распределения плотности тампонажного камня в пустотах и трещинах массива в радиальном направлении

Полученные приближенные аналитические выражения учитывают все основные технологические факторы: мощность и габариты тампонирующего пенетратора, скорость его принудительного перемещения, количество, состав и теплофизические свойства компонентов легкоплавкой тампонажной смеси и могут быть положены в основу разработки теории нового способа беструбного крепления скважин.

Преимущества нового композиционного жаропрочного материала дают возможность создания высокотемпературного генератора теплоты для комбинированного теплового и гидродинамического воздействия на изолированную пакерами зону продуктивного пласта вплоть до его гидроразрыва для повышения дебита эксплуатационных скважин. При этом отпадает необходимость в применении колонны труб и мощных насосов, поскольку тепловой генератор с пакерами может опускаться в скважину на грузонесущем электрокабеле.

Есть резервы упрощения конструкций и технологии изготовления высокотемпературных пенетраторов и теплогенераторов за счет повышения электросопротивления композиционного жаропрочного материала.

Проведен анализ способа термомеханической обработки прискважинной зоны продуктивного пласта [7]. Получены зависимости продолжительности термообработки призабойной зоны скважины (ПЗС) от ее глубины. Результаты расчетов представлены графиками на рис.9.

Выполненный анализ позволяет сделать следующие выводы. Как видно из рис.9, общее (суммарное) время (кривая 3) обработки изолированной пакером призабойной зоны скважины в зависимости от ее глубины монотонно снижается, что свидетельствует в пользу предлагаемого способа обработки при больших глубинах.

Быстрый переход воды в обрабатываемой замкнутой зоне скважины в пар (~5 мин) способствует, наряду с тепловым, энергичному гидродинамическому воздействию на пласт. Более детальными расчетами можно показать быстрое нарастание давления в замкнутой зоне и реальную возможность обеспечения гидроразрыва

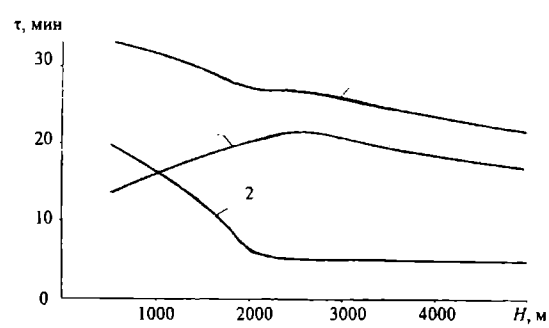



Рис. 9. Расчетные графики зависимости продолжительности термообработки ПЗС от глубины расположения изолированного участка скважины

1 – время на подогрев воды до температуры кипения; 2 – время на испарение воды; 3 – суммарное время

пласта без применения колонны труб и мощных насосов.

Эффективность комбинированного теплового и гидродинамического воздействия на обрабатываемый коллектор можно повысить за счет многократного повторения операции, требующей (после конденсации пара и заполнения изолированной от остального ствола зоны пластовыми флюидами) не более получаса (рис.9).

Мощность разработанного электротермического оборудования ограничена пропускной способностью выпускаемых отечественной промышленностью кабелей.

Помимо рассмотренных направлений, в 2000 г. продолжались традиционные для кафедры ТТБС исследования в области совершенствования технологии бурения в многолетнемерзлых породах, применения пены как эффективной разновидности очистных агентов, гидро- и пенотранспорта керна и др. Разработаны новые программы для ЭВМ, основанные на численных методах и позволяющие расширить область и повысить достоверность расчетов по регулированию и нормализации циркуляционных и теплообменных процессов при бурении и освоении скважин. Значительное внимание уделено исследованию малоизученных вопросов циркуляции газожидкостных смесей (ГЖС) и пены:

зависимости эффективной вязкости от компонентного состава жидкой фазы;

влиянию вида, крупности и концентрации шлама на гидравлические сопротивления;

критериям разграничения режимов течения ГЖС (пузырьковый, поршневой, кольцевой);

влиянию реологических свойств пены и режимов циркуляции на процесс пенотранспорта керна;

влиянию поглощений и водопритоков на режим циркуляции пены.

На основе накопленного в предыдущие годы опыта в области анализа и расчетов по регулированию и нормализации температурного фактора при бурении скважин с продувкой воздухом (газом), в частности в мерзлых породах, в 2000 г. на кафедре ТТБС аналитическим и численным методами исследован температурный режим действующего магистрального газопровода. Выполненные расчеты дали близкие совпадения с фактическими данными по эксплуатируемым газопроводам и позволили сформулировать полезные практические рекомендации.

О результативности научных исследований и разработок кафедры свидетельствует повышение квалификации ее преподавателей: в 2000 г. ВАК РФ утвердил присуждение ученой степени доктора технических наук Ю.А.Нифонтову и кандидата технических наук В.В.Никишину и П.Ю.Танинскому. В истекшем году профессорами, преподавателями и сотрудниками кафедры ТТБС по тематике научных исследований и разработок опубликованы монография, 45 статей и докладов, получены три патента РФ.

На международных выставках патентов в 2000-2001 гг. разработки кафедры ТТБС в Брюсселе и Москве удостоены бронзовых медалей, а в Париже – диплома I степени и золотой медали.

### ЛИТЕРАТУРА


1. *Зотиков И.А.* Термическое бурение ледниковых покровов / И.А.Зотиков, А.П.Капица, Е.В.Кудрявцев, А.А.Суханов // Антарктика. Доклады комиссии АН СССР. Вып.11. М.: Наука, 1972. С.141-156.

2. *Кудряшов Б.Б.* Анализ тепломассообмена при колонковом бурении скважин плавлением / Б.Б.Кудряшов, А.Н.Саламатин, В.К.Чистяков // Антарктика. Доклады комиссии АН СССР. Вып.18. М.: Наука, 1979. С.106-112.

3. *Кудряшов Б.Б.* К методике приближенного решения некоторых задач горной теплофизики / Б.Б.Кудряшов, А.Н.Саламатин, В.А.Чугунов // Зап. ЛГИ. Вып.1. Т.66. Л., 1973. С.38-46.

4. *Кудряшов Б.Б.* К теории бурения-протаивания снежно-фирновых отложений и льдов Антарктиды / Б.Б.Кудряшов, В.Ф.Фисенко // Антарктика. Доклады комиссии АН СССР. Вып.12. М.: Наука, 1973. С.153-158.

5. *Кудряшов Б.Б.* Бурение скважин в условиях изменения агрегатного состояния горных пород / Б.Б.Кудряшов, В.К.Чистяков, В.С.Литвиненко. Л.: Недра, 1991. 295 с.

6. *Кудряшов Б.Б.* Закономерности процесса глубокого теплового бурения скважин во льду /

Б.Б.Кудряшов, А.М.Шкурко // Зап. ЛГИ. Т.93. Л., 1982. С.13-24.

7. *Литвиненко В.С.* Способ гидравлического разрыва пласта. Патент РФ № 2046184 / В.С.Литвиненко, Ю.М.Парийский, Г.Н.Соловьев и др., Бюл. изобретений. 1995. № 29.

8. *Литвиненко В.С.* Возможности способа беструбного крепления скважин с применением легкоплавких вяжущих материалов / В.С.Литвиненко, Г.Н.Соловьев, П.Ю.Танинский; Междунар. бюро по горной теплофизике. VIII пленарное заседание: Доклады / СПГГИ. СПб, 2000. С.14-21.

9. *Пехович А.И.* Расчеты теплового режима твердых тел / А.И.Пехович, В.М.Жидких. Л.: Энергия, 1968. 304 с.

10. *Чистяков В.К.* Тепломассоперенос при контактном плавлении / В.К.Чистяков, А.Н.Саламатин, С.А.Фомин, В.А.Чугунов. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1984. 176 с.

11. *Чистяков В.К.* Особенности промывки при бурении скважин в ледниках и ледниковых покровах / В.К.Чистяков, П.Г.Талалай; Сб. науч. тр. НГА Украины. 1999. № 6. Т.4. С.85-89.

12. *Чистяков В.К.* Промывочные среды для бурения скважин в мерзлых породах и льдах / В.К.Чистяков, П.Г.Талалай, А.А.Яковлев и др. М.: Геоинформмарк, 1999. 78 с.

13. *Kudryashov B.B., Vasiliev N.I. and Talalay P.G.* (1994): KEMS-112 electromechanical ice core drill; Proceedings of a Fourth International Workshop on Ice Drilling Technology, Tokyo, April 20-23, 1993, edited by Okitsugu Watanabe. Tokyo, Met. Natl Inst. Polar Res. Spec. Issue, 49, p.138-152.