© В.И. Смирнов, М.Н. Шуплик, И.С. Вакуленко, 2014

УДК 69.035.4

В.И. Смирнов, М.Н. Шуплик, И.С. Вакуленко

ПРАКТИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ СТРОИТЕЛЬСТВА ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ПОРОДАХ

Показано, что для герметизации подземного резервуара в период эксплуатации хранилища на внутренней поверхности выработок – емкостей необходимо намораживать ледяную облицовку. В практике нашел применение способ намораживания ледяной облицовки путем заполнения всего объема выработок пресной водой с выдержкой ее в течение расчетного времени и откачкой незамерзшей воды при достижении ледяной облицовкой проектной толщины. Установлено, что оттаивания и разрушения вечномерзлых пород окрестности выработок не происходит, если скорость подвода тепла к поверхности теплообмена не превышает способности мерзлых пород отводить тепло вглубь массива. Исходя из этого условия, разработаны методики расчета максимально допустимых температур воды и топлива по условию сохранения породы в твердомерзлом состоянии (формулы 1 и 2).

Проведенные комплексные исследования, строительство опытных и промышленных хранилищ в вечномерзлых породах позволяют осуществлять строительство подземных хранилищ жидких углеводородов в вечномерзлых породах в восточном секторе Арктики, на нефтяных и газовых месторождениях севера Тюменской области и Красноярского края, а также в Якутии и других районах Крайнего Севера.

Ключевые слова: подземное хранилище, вечномерзлые породы, жидкие углеводороды, тепловое воздействие.

Прогресс в решении глобальной проблемы освоения подземного пространства и, в частности, использование верхних слоев земной коры как среды для строительства подземных хранилищ различного назначения, основан на резком увеличении использования газообразных и жидких углеводородов.

Особая роль газонефтепродуктов в решении энергетических и экономических проблем страны способствовала разработке принципиально новых технологических решений в области строительства подземных резервуаров.

К хранилищам нефтепродуктов предъявляются жесткие требования: обеспечение безопасности обслуживающего персонала и населения; предотвращение экологических нарушений окружающей среды, а также способность противостоять коррозионному воздействию хранимых продуктов. Решить проблему хранения жидких углеводородов путем строительства резервуарных парков из традиционных металлических резервуаров при значительных объемах хранения и перечисленных требованиях к безопасности, надежности и экономической эффективности практически невозможно.

Подземное хранилище – это комплекс подземных и надземных сооружений, обеспечивающих прием, хранение и отбор нефтепродуктов.

Создание подземных хранилищ шахтного типа в практически непроницаемых вечномерзлых породах отличается определенной спецификой. При эксплуатации таких хранилищ требуется соблюдать необходимые температурные условия. Это связано с тем, что прочностные и фильтрационные свойства мерзлых пород и ледя-

ной облицовки выработок – емкостей существенно зависят от температуры поступающих в хранилища продуктов. Чем ниже температура продуктов, тем сохраннее ледяная облицовка.

Герметичность подземных выработок хранилища обеспечивается, если максимальная естественная температура рабочей толщи (массив, в котором размещаются выработки) ниже температуры его оттаивания для дисперсных пород на 3 °С, а для скальных – на 1 °С.

В этой связи становится очевидным, что важнейшим условием применения подземных хранилищ в вечномерзлых породах является соблюдение теплового режима резервуара как в период его строительства, так и в процессе эксплуатации [1].

Подземное хранилище нефтепродуктов в вечномерзлых породах представляет собой систему горизонтальных выработок – емкостей, примыкающих с одной или с двух сторон к центральной выработке [2]. При двустороннем примыкании они располагаются в шахматном порядке (рис. 1).

В первую очередь проходят выработки, обеспечивающие создание сквозной вентиляции. Вентиляционные скважины для проветривания выработок бурят до начала проходческих работ. Практика показала, что в выработки – емкости не следует допускать поступления воздуха с температурой выше -3 ÷ -4 °С.

Для герметизации подземного резервуара и предотвращения оттаивания мерзлой породы в период эксплуатации хранилища на внутренней поверхности выработок – емкостей необходимо намораживать ледяную облицовку толщиной 50–100 мм. В практике применяется способ намораживания ледяной облицовки путем заполнения всего объема выработок пресной водой с выдержкой ее в течение расчетного периода времени

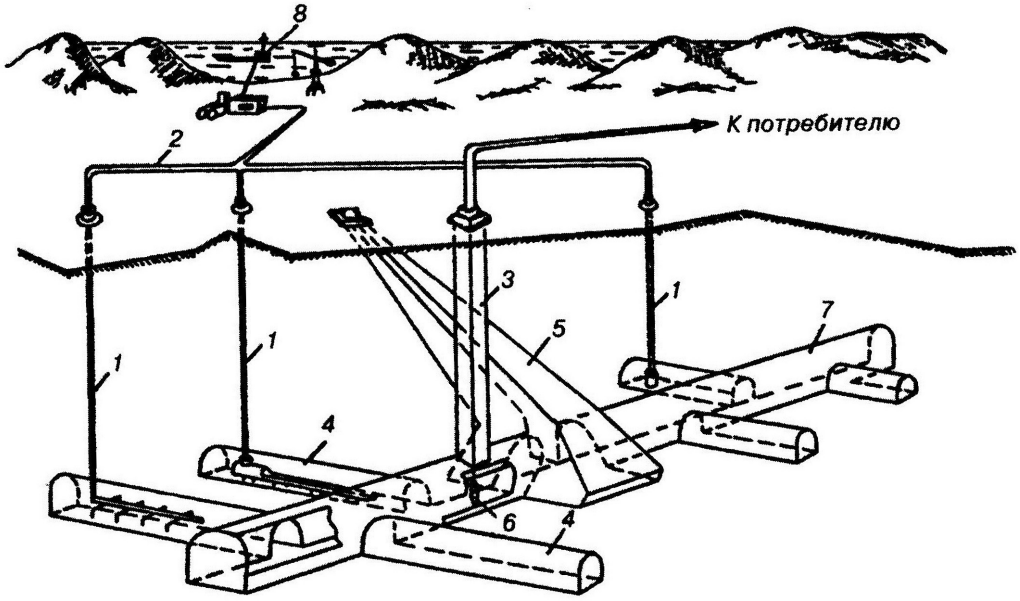


Рис. 1. Объемно-планировочная и технологическая схема подземного хранилища шахтного типа в вечномерзлых породах: 1 – скважины для слива нефтепродуктов; 2 – трубопроводы; 3 – эксплуатационный колодец; 4 – выработки-емкости; 5 – наклонный ствол; 6 – погружной насос; 7 – центральная выработка-емкость; 8 – танкер

(20–25 сут) и последующей откачки незамерзшей воды при достижении ледяной облицовкой проектной толщины.

Намораживание ледяной облицовки происходит вследствие теплообмена между водой и массивом породы. Время намораживания зависит от теплофизических свойств грунта, температуры воды, заливаемой в подземные выработки, и отношения площади смоченной поверхности к объему воды [3].

В результате работ, выполненных в лабораторных и натурных условиях, получена зависимость для определения максимально допустимой температуры воды tmax (°C), сливаемой в выработки – емкости для намораживания ледяной облицовки:

$$t_{\max} = t_p + \frac{2\lambda_r \left(t_p - t_r\right)\left(S_q + \frac{2}{3}S_w\right)}{C_w\sqrt{\pi a_r VQ}}, \quad (1)$$

где t_p – температура фазового перехода воды в лед, °C; t_r – естественная температура вечномерзлых пород, °C; λ_r – коэффициент теплопроводности вечномерзлых пород, Вт/м°C; S_q – площадь почвы выработок – емкостей, м^2; S_w – суммарная площадь стен выработок – емкостей, м^2; C_w – объемная теплоемкость воды, Дж/(м^3 °C); a_r – коэффициент температуропроводности вечномерзлых пород, м^2/с; V – объем выработок – емкостей, м^3; Q – производительность заполнения выработок – емкостей водой, м^3/с.

Расчеты и опыт показали, что заполнять выработки водой и откачивать воду после намораживания ледяной облицовки целесообразно с максимально возможной производительностью, предусмотрев меры, исключающие гидравлическое разрушение вечномерзлых пород.

Продолжительность заполнения водой выработок – емкостей подземного хранилища объемом 25 тыс. м^3 не превышает трех суток. Откачку воды после намораживания ледяной облицовки осуществляют непрерывно.

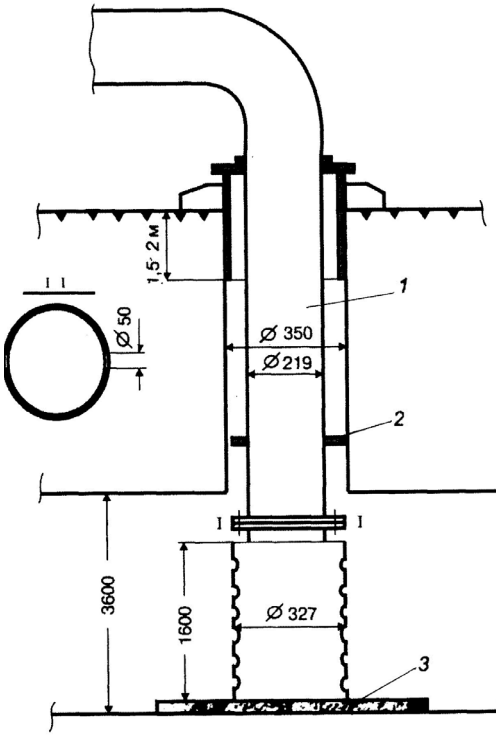
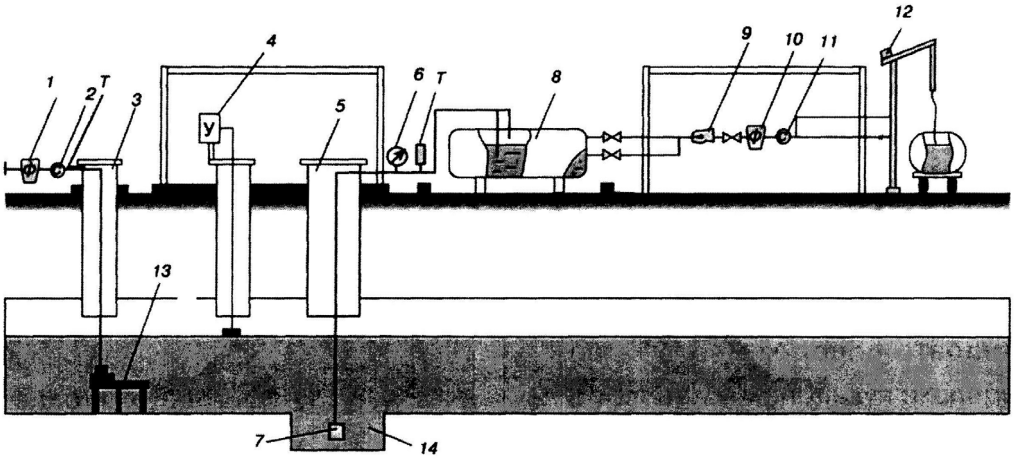


Рис. 2. Конструкция технологической скважины для заполнения выработок-емкостей воды: 1 – водовод; 2 – центрирующее кольцо; 3 – железобетонная плита

В качестве технологических скважин для подачи воды в шахту целесообразно использовать вентиляционные скважины, обсаженные трубами с поверхности земли до глубины 1,5–2 м. В скважину опускают водовод (рис. 2), последний став которого перфорирован и устанавливается на железобетонную плиту, либо свободно подвешен в нижней части выработки. До ввода подземного хранилища в эксплуатацию узел подачи воды должен быть демонтирован, а скважина ликвидирована.

Слив нефтепродуктов в подземные резервуары производится через технологические скважины 3 (рис. 3).



Технологическая схема эксплуатации подземного хранилища: 1, 10 – фильтры; 2, 11 – жидкостные счетчики; 3 – технологическая скважина для слива нефтепродуктов; 4 –указатель уровня топлива в выработке-емкости; 5 – технологическая скважина для отбора нефтепродуктов; 6 – манометр; 7 – погружной насос; 8 – металлический резервуар; 9 – насос; 12 – наливной стояк; 13 – устройство для рассредоточения тепловой нагрузки при сливе нефтепродукта по длине выработки-емкости; 14 – зумпф; Т – термокран с термометром

Термометрами, установленными в термокарманах *Т*, замеряется температура сливаемого продукта. В выработке – емкости технологическая скважина оборудуется распределительным устройством *13*, обеспечивающим рассредоточение тепловой нагрузки по длине выработки. Распределительное устройство может быть выполнено в виде подземного теплообменника, который вмораживается в лед скреперной дорожки центральной выработки в процессе намораживания ледяной облицовки. В зависимости от требуемой протяженности трубопровода, он может быть уложен в одну или более ниток или выполнен в форме змеевика. Конструктивные параметры теплообменника (диаметр и общая протяженность труб) определяются расчетом.

Технологические скважины для слива нефтепродуктов в хранилище оборудуются двумя соосно расположенными трубами по всей глубине. Внешняя труба (219х9 мм) является обсадной, а внутренняя (108х4 мм) – технологической, по которой производится слив продукта в резервуар.

Затрубное пространство обсадной колонны скважины герметизируют путем послойного промораживания водопесчаной пульпы. После полной проморозки водопесчаной пульпы в затрубном пространстве скважин производят теплогидроизоляцию их оголовков. Общая высота теплогидроизоляционного слоя составляет 0,5 – 0,6 м. Расчеты и практика показали, что такой слой теплогидроизоляции обеспечивает сохранение теплового режима оголовка скважин.

Опыт эксплуатации подземных хранилищ, построенных в вечномерзлых породах, свидетельствует о необходимости надежного обеспечения устойчивости и герметичности технологических скважин. При закачке нефтепродуктов с положительной температурой через нетеплоизолированную колонну труб обсадная колонна и замороженная водопесчаная смесь нагреваются, в результате чего в затрубном пространстве образуется пульпа, которая начинает поступать в выработку –

емкость. При этом технологическая скважина теряет устойчивость и становится негерметичной. Дальнейшая эксплуатация нетеплоизолированной скважины может привести к опусканию обсадной колонны и обрушению пород в зоне сопряжения скважины с выработкой – емкостью.

Оттаивания и разрушения вечномерзлых пород в окрестности выработок не происходит, если скорость подвода тепла к поверхности теплообмена не превышает способности мерзлых пород отводить тепло вглубь массива. Исходя из этого условия и используя экспериментальные данные, разработаны методики расчета максимально допустимой температуры топлива ($t_{дп}$) по условию сохранения породы в твердомерзлом состоянии.

$$t_{дп} = \frac{\lambda_r \left(t_p - t_r\right)\sqrt{Q_T}}{\sqrt{\pi a_r V_T}} \cdot \left[\frac{1}{\alpha_ж} + \frac{2}{C_T Q_T}\left(S_q + \frac{2}{3} P_q h\right)\right], \qquad (2)$$

где $Q_т$ – производительность заполнения резервуара нефтепродуктом, м^3/с; $V_т$ – объем нефтепродукта, слитого в выработки – емкости, м^3; $\alpha_ж$ – коэффициент теплоотдачи от нефтепродукта к внутренней стенке трубы или к мерзлой породе, Вт/(м^3 °С); $C_т$ – объемная теплоемкость нефтепродута, Дж/(м^3 °С); P_q – периметр почвы выработок – емкостей, м; h – уровень залитого топлива, м; остальные обозначения приводились в формуле (1).

Технологические скважины для отбора топлива располагаются непосредственно над зумпфом в центральной выработке. Узел отбора топлива и замера его уровня размещается в выработках – емкостях в технологической скважине, обсаженной трубами диаметром не менее 500 мм. Откачка продукта из хранилища осуществляется погружным насосом, размещенном в зумпфе (рис. 4). В период закачки топлива в выработки – емкости, во время хранения, а также в процессе отбора топлива ведется наблюдение за его уровнем.

В целом опыт строительства и эксплуатации подземных хранилищ в вечномерзлых породах показывает, что основные сложности возникают в ре-

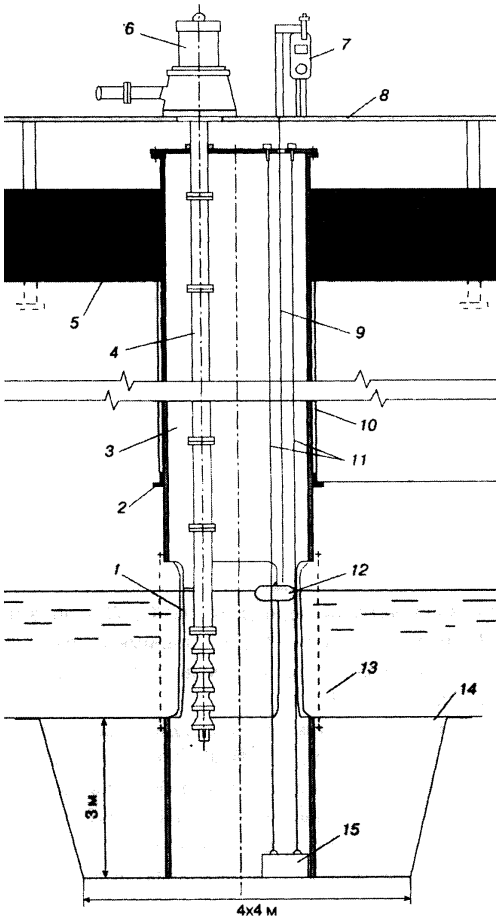


Схема технологической скважины (колодца), оборудованной для эксплуатации хранилища: 1 – два отверстия 0,7x1,8 м; 2 – два полукольца на сварке; 3 – шурф; 4 – секции трубы насоса; 5 – грунтовая отсыпка; 6 – электродвигатель насоса; 7 – уровнемер; 8 – пол насосной; 9 – лента уровнемера; 10 – водопесчаная пульпа; 11 – направляющие струны; 12 –поплавок; 13 – съемная сетка; 14 – зумпф; 15 – груз

зультате нарушения теплового режима ледопородных выработок – емкостей, так как в большинство районов Крайнего Севера топливо доставляют летом с температурой 5–15 °С. Возможно охлаждение жидкого топлива непосредственно перед его сливом в подземный резервуар. Однако применение холодильных машин в условиях Крайнего Севера, как правило, экономически не оправдано, а прокачка поступающего на хранение теплого топлива по трубам, вмороженным в лед, позволяет понизить температуру топлива при сливе его в резервуар только в области положительных значений, что не дает возможность сохранить естественную температуру мерзлой породы в период эксплуатации хранилища.

На базе исследований, выполненных в лабораторных и натурных условиях, научно обоснованы, разработаны и внедрены технические решения, обеспечивающие надежную эксплуатацию шахтных хранилищ, сущность которых заключается в следующем.

1. Создание теплового буфера, в качестве которого служит ледяная облицовка, намораживаемая на внутренней поверхности выработок – емкостей путем их временного заполнения пресной водой. Температура воды должна быть близкой к 0 °С, но не выше рассчитанной по формуле (1), с целью предотвращения оттаивания вечномерзлых пород на поверхности выработок-емкостей. Поскольку при намораживании ледяной облицовки существенно повышается температура вечномерзлых пород, возможно их охлаждение принудительной вентиляцией в холодное время года.

2. Предотвращение оттаивания выработок-емкостей в период их заполнения теплым продуктом путем регулирования скорости его слива.

3. Ежегодная аккумуляция холода атмосферного воздуха в вечномерзлых породах, вмещающих выработки-емкости. Понижение температуры вечномерзлых пород осуществляется в результате теплообмена с топливом, охлаждаемым в морозный период года посредством его прокачки через наземный трубопровод.

4. Рассредоточение тепловой нагрузки по поверхности теплообмена; охлаждение топлива путем его перемешивания с холодным остатком топлива в резервуаре; снижение гидравлической нагрузки на мерзлую породу при помощи специальных устройств для приема воды и топлива.

5. Предотвращение оттаивания вечномерзлых пород и возможного прорыва талых вод в выработки – емкости путем теплоизоляции технологических скважин.

Разработанная технология строительства и эксплуатации ледопородных шахтных хранилищ обеспечивает сохранность пород, вмещающих выработки-емкости, в мерзлом состоянии и позволяет поддерживать среднегодовую температуру вечномерзлых пород не выше естественной (с тенденцией к возможному понижению); обоснована возможность повышения температуры на контуре резервуара до температуры фазовых переходов воды в период намораживания ледяной облицовки и заполнения жидким топливом.

Проведенные комплексные исследования, строительство опытных и промышленных хранилищ в вечномерзлых породах, разработка необходимых технических условий, государственных и ведомственных нормативных документов позволяет осуществлять строительство подземных хранилищ жидких углеводородных топлив в вечномерзлых породах в Восточном секторе Арктики, на нефтяных и газовых месторождениях севера Тюменской области и Красноярского края, а также в Якутии и других районах Крайнего Севера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Байко В.Н., Смирнов В.И., Скосарева Т.В.* Опыт строительства и эксплуатации хранилищ шахтного типа в районах Крайнего Севера // Колыма. – 1987. – № 2. – С. 13–16.

2. *Смирнов В.И., Скосарева Т.В., Кабанов Н.И., Калинкин А.В.* Хранение жидких углеводородов в вечномерзлых породах // Газовая промышленность. – 1999. – № 9.

3. *Смирнов В.И.* Строительство подземных газонефтехранилищ. – М.: Газойл пресс, 2000. ГИАБ

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Смирнов Вячеслав Иванович – доктор технических наук, профессор,
советник союза золотопромышленников России, *e*-mail: Smirnov_VI@mail.ru,
Шуплик Михаил Николаевич – доктор технических наук, профессор,
Вакуленко Иван Сергеевич – студент,
Московский государственный горный университет, *e*-mail: ud@msmu.ru.

UDC 69.035.4

PRACTICE AND PROSPECTS FOR CONSTRUCTION OF UNDERGROUND LIQUID HYDROCARBON STORAGES IN PERMAFROST

Smirnov V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Councillor, Russia's Gold Producers Union, *e*-mail: Smirnov_VI@mail.ru,
Shuplik M.N., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Vakulenko I.S., Student,
Moscow State Mining University, *e*-mail: ud@msmu.ru.

Quick pace of the industrial advance in the Far North results from the acceleration of mining operations at the largest mineral deposits.

Reliability of handling and distribution systems for liquid and gaseous hydrocarbons in the areas of the Far North is only achievable through holding of oil products in storages with sufficient volume to meet annual demands for a given oil product.

The Far North territory, with lumped mining of nearly all gas, oil, nonferrous metals and gold in Russia, has the wide-spread and thick cover of dispersed permafrost suitable for construction of underground support-free storages.

Russia has the developed technology and hands-on experience of constructing and operating the underground storages of liquid hydrocarbons in permafrost.

The author shows that sealing of an underground storage during operation requires freezing of ice jacketing on inner surface of the storage.

The practically applied technique of the constructed ice jacketing consists of feeling the underground storage with fresh water, holding the water for a design time period and then pumping out of unfrozen water when the ice jacket has reached design thickness.

It has been found that permafrost surrounding such storages does not melt and fail if the thermal input rate at the heat transfer surface is not higher than the capacity of the permafrost to spread depthward.

Based on this condition, the calculation procedures for maximum allowable temperatures of water and fuel are developed under condition of the ever-frozen state retention (formulas 1 and 2).

The comprehensive research and practical experience of pilot commercial storage construction in permafrost confirm feasibility of underground liquid hydrocarbon storage construction in ever-frozen subsoil on the east of the Arctic Region, at oil and gas reservoirs on the north of the Tyumen Region and Krasnoyarsk Territory as well as in Yakutia and other regions of the Far North.

Key words: underground storage, permafrost soils, liquid hydrocarbons, thermal effects

REFERENCES

1. Bajko V.N., Smirnov V.I., Skosareva T.V. *Kolyma*, 1987, no 2, pp. 13–16.

2. Smirnov V.I., Skosareva T.V., Kabanov N.I., Kalinkin A.V. *Gazovaja promyshlennost'*, 1999, no 9.

3. Smirnov V.I. *Stroitel'stvo podzemnyh gazoneftehranilishh* (Construction of underground gas and oil storages), Moscow, Gazojl press, 2000.