Из приведенной таблицы следует, что $k_{каж.} > k_{сов.}$ почти во всем интервале температур и давлений, меньших *15 МПа*. Например, если реальный газ сжимают при давлениях $7 \div 9$ *МПа*, то $k_{каж.} \approx 1{,}37$. Однако при сжатии реального газа в интервале давлений $20 \div 25$ *МПа* показатель $k_{каж.} \approx 1{,}28 - 1{,}32$, то есть близок или даже меньше $k_{сов.}$.

Таким образом, учет реальных свойств природного газа, рассматриваемого в рамках модели реального газа, то есть газа с уравнением состояния $p = Z(p,T)\cdot\rho RT$, показывает, что компримирование газа в центробежных нагнетателях КС является процессом, достаточно близким к адиабатическому. В зависимости от диапазона рабочих давлений и температур индекс политропической зависимости, аппроксимирующей адиабатический процесс сжатия реального газа, может быть как больше, так и меньше показателя адиабаты Пуассона совершенного газа. Этот коэффициент может быть рассчитан на основе уравнения состояния транспортируемого газа. Небольшие отклонения рассчитанных коэффициентов от их фактических значений в центробежных нагнетателях КС могут быть связаны с необратимостью происходящих процессов или теплообменом газа с окружающим оборудованием.

Список литературы

1. Кириллин А. В., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. – М.: Энергоатомиздат. – 1983. – 416 с.

Сведения об авторе

Лурье Михаил Владимирович, *д. т. н., профессор кафедры «Проектирование и эксплуатация нефтегазопроводов», Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина, г. Москва, тел. 8 (499)2339254), e-mail: lurie254@gubkin.ru*

Lurie M. V.*, Doctor of Technical Sciences, professor of the chair «Designing and operation of oil and gas pipelines» Russia State University of Oil and Gas named after Gubkin I. M., phone: 8(499)2339254), e-mail: lurie254@gubkin.ru*

УДК 624.154.1

ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ ОПОР ТРУБОПРОВОДА НАДЗЕМНОЙ ПРОКЛАДКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТРУБОПРОВОДНОЙ СИСТЕМЫ «ЗАПОЛЯРЬЕ — НПС «ПУРПЕ»

PREDICTION OF THE GROUNDS TEMPERATURE BEHAVIOR OF THE SURFACE LAYING PIPELINE SUPPORT FOUNDATIONS FOR ENSURING THE TROUBLE-FREE OPERATION OF THE PIPELINE SYSTEM «ZAPOLYARIE — NPS PURPE»

В. В. Павлов, Ю. В. Богатенков, М. Ю. Зотов, А. Н. Петелин

V. V. Pavlov, Yu. V. Bogatenkov, M. Yu. Zotov, A. N. Petelin

ОАО «Гипротрубопровод», ООО «Научно-исследовательский институт транспорта нефти и нефтепродуктов», г. Москва; ОАО «Сибнефтепровод», г. Тюмень

Ключевые слова: ***прогнозный теплотехнический расчет, термостабилизатор, многолетнемерзлый грунт***

Key words: ***predictable heat engineering calculation, heat stabilizer, permafrost ground***

Строительство и эксплуатация объектов трубопроводного транспорта на территориях распространения многолетнемерзлых грунтов приводит к значительным изменениям геокриологических условий. Развитие негативных геокриологических процессов, влияющих на несущую способность и устойчивость фундаментов, возникает даже при незначительных изменениях теплового баланса в геотехнической системе «атмосфера — сооружение — многолетнемерзлый грунт».

При проектировании и строительстве в районах распространения многолетнемерзлых грунтов в соответствии с действующими нормативными документами [1] необходимо предусматривать комплекс мер, направленных на обеспечение надежной и долговечной эксплуатации возводимых сооружений, а также разрабатывать мероприятия по минимизации негативного техногенного воздействия на окружающую среду.

При строительстве объектов трубопроводного транспорта на территориях распространения многолетнемерзлых грунтов для оценки прогноза динамики температурного режима грунтов оснований на период строительства и эксплуатации сооружения нормативными документами [1, 2] регламентируется проведение теплотехнических расчетов.

Моделирование искусственного замораживания грунтов. Выбор технических решений (мероприятий) по сохранению мерзлого состояния грунтов и обеспечения их расчетного температурного режима производится расчетным путем с учетом технико-экономической целесообразности. Все расчеты теплового взаимодействия произведены на весь прогнозируемый срок трубопроводной системы.

Тепловое взаимодействие сооружений с многолетнемерзлыми породами происходит главным образом за счет кондуктивного механизма переноса тепла (теплопроводности). Фильтрация может играть заметную роль для отдельных гидротехнических сооружений (например, дамб и плотин с мерзлым ядром) и в некоторых других специальных случаях. При необходимости учета теплового влияния переноса влаги в инженерных расчетах обычно вводят соответствующие поправки в решение кондуктивной задачи (например, фильтрационную поправку к коэффициенту теплопроводности). Все методы расчета, нормированные в СНиП, учитывают только кондуктивный механизм переноса тепла.

Кондуктивный перенос тепла описывается эмпирическим законом Фурье [3], который устанавливает пропорциональную зависимость между плотностью теплового потока q и градиентом температуры T:

$$q = -\lambda gradT. \tag{1}$$

Коэффициент пропорциональности λ называется коэффициентом теплопроводности. Знак минус указывает на то, что тепловой поток направлен навстречу градиенту температуры.

Из закона Фурье и закона сохранения энергии получается основное уравнение, описывающее процесс теплопроводности:

$$C\frac{\partial T}{\partial t} = div(\lambda gradT), \tag{2}$$

где C — объемная теплоемкость, t — время. В случае однородной среды коэффициент теплопроводности как константа выносится из-под знака дивергенции, и после деления на C уравнение теплопроводности упрощается:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha\Delta T = \alpha\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right), \tag{3}$$

где $a = \lambda/C$ — коэффициент температуропроводности, который характеризует тепловую инерционность среды и темп протекания процессов переноса тепла, Δ — общепринятое обозначение оператора Лапласа.

Для обеспечения единственности решения уравнения (2) или (3) необходимо задать начальные и граничные условия. Начальные условия задают температурное поле в некоторый момент $t = 0$, который принимается за начальный:

$$T(x,y,z,t)\Big|_{t=0} = 0 = f(x,y,z), \tag{4}$$

где f — заранее известная функция, обычно определяемая по данным изысканий.

Граничные условия описывают теплообмен рассматриваемой системы с внешней средой. В зависимости от температурного режима на границе различают три рода граничных условий. Граничное условие I рода задает температуру на границе расчетной области как известную функцию времени и пространственных координат точек границы:

$$T(x,y,z,t)\Big|_{\Gamma} = f(M,t), \tag{5}$$

где $M(x, y, z)$ обозначает произвольную точку границы Г. Условие I рода описывает идеальный тепловой контакт грунта с внешней средой, когда сопротивлением теплообмену можно пренебречь.

Условием II рода задается значение не самой температуры, а ее производной:

$$-\lambda\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial n}\Big|_{\Gamma} = q(M,t). \tag{6}$$

Здесь символом $\partial/\partial n$ обозначена производная по нормали, а физический смысл данного условия раскрывается законом Фурье (1): задается плотность теплового потока через границу.

Условие II рода можно применять там, где этот тепловой поток не зависит от температуры окружающего грунта и может быть измерен или вычислен. Гораздо чаще применяется условие II рода с нулевым тепловым потоком: его задают на границах, являющихся плоскостями симметрии или достаточно удаленных от тепловыделяющих сооружений. Как правило, такие условия ставятся на нижней и боковых границах расчетной области. На нижней границе может быть задан тепловой поток за счет геотермического градиента.

Граничное условие III рода является более общим и содержит как саму температуру, так и ее производную:

$$-\lambda\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial n}\Big|_{\Gamma} = \alpha(M,t)\left[T(x,y,z,t)\Big|_{\Gamma} - f(M,t)\right], \tag{7}$$

где $\alpha(M, t)$ — коэффициент теплообмена; $f(M, t)$ — температура внешней среды вдоль границы, рассматриваемые как известные функции координат и времени.

Соотношение (7) следует из закона Фурье (левая часть есть плотность теплового потока) и эмпирического закона Ньютона, который устанавливает пропорциональность между разностью температур по обе стороны границы и плотностью теплового потока через нее. Коэффициент пропорциональности α называется коэффициентом теплообмена. Таким образом, граничное условие III рода содержит не одну, а две величины, которые задаются как известные функции времени и координат границы.

Условие III рода ставится для большинства зданий и сооружений, а также на дневной поверхности вне зданий. Оно соответствует наиболее распространенной ситуации, когда между внутренностью сооружения (или наружным воздухом), где температура известна, и грунтом есть преграда (теплоизоляция, снег и т. п.), оказывающая сопротивление теплообмену — термическое сопротивление. Если имеется несколько слоев, препятствующих теплопередаче, то их термические сопротивления складываются. Термическое сопротивление каждого слоя вычисляется как частное от деления его толщины на коэффициент теплопроводности. Для снега этот коэффициент вычисляется по известной высоте и плотности снежного покрова. Величина, обратная термическому сопротивлению, есть коэффициент теплообмена α, который и входит в выражение (7).

При фазовых превращениях «лед — вода» теплопроводность и теплоемкость грунта изменяется, поэтому уравнение теплопроводности записывается отдельно для талой и мерзлой зоны, то есть получается система двух уравнений с двумя неизвестными температурами: $T_1(x, y, z, t)$ в талой зоне и $T_2(x, y, z, t)$ — в мерзлой. Положение границы раздела фаз также является неизвестной функцией времени, которая определяется из так называемого условия Стефана, представляющего собой закон сохранения энергии при выделении скрытой теплоты фазового перехода:

$$\frac{Qfdh}{dt} = \lambda_2 \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial x}\Big|_{x=h} - \lambda_1 \frac{\partial T_1(x,t)}{\partial x}\Big|_{x=h} \qquad (8)$$

где Q_f — скрытая теплота фазового перехода на единицу объема грунта; h — текущая координата фазовой границы, рассматриваемая как неизвестная функция времени; индексы 1 и 2 относятся к талой и мерзлой зоне, соответственно. Задача о фазовых переходах в указанной постановке получила название задачи Стефана.

Несмотря на достаточно обширный набор точных и приближенных аналитических методов, многие задачи инженерной геокриологии не удается решить этими методами. Такие задачи решаются численно. Основным методом численного решения является метод конечных разностей.

Уравнение теплопроводности с граничными условиями решается для трехмерной области, которая анализируется при проектировании объекта. Данная область, как правило, включает в себя геолого-литологические слои грунта, проектируемые основания и фундаменты, устройства для охлаждения грунта и другие элементы.

За верхнюю границу области моделирования, как правило, принимают поверхность земли, а нижнюю границу располагают на достаточно большой глубине, чтобы минимизировать ее влияние на тепловые процессы в интересующей проектировщика области.

На верхней границе области моделирования задаются условия теплообмена с окружающей средой, которые определяются температурой воздуха и коэффициентом теплообмена. Учет влияния снегового покрова на теплообмен поверхности грунта осуществляется путем задания изменения во времени толщины снежного покрова и его теплопроводности.

На нижней границе области моделирования задается температура грунта согласно термометрическим данным. На боковой поверхности области моделирования, как правило, задается нулевой тепловой поток. При этом боковые границы области моделирования должны быть расположены достаточно далеко от интересующего проектировщика участка, чтобы они не оказывали влияние на расчет тепловых процессов.

Следует отметить, что область моделирования состоит из неоднородных слоев грунта с различными теплофизическими свойствами — теплоемкостью, теплопроводностью, плотностью и влагосодержанием. В связи с этим для компьютерного моделирования искусственного замораживания грунтов необходимо построение модели, в которой учтено реальное распределение слоев грунта с различными теплофизическими свойствами. Такое распределение слоев грунта строится на основании данных, полученных в результате инженерно-геологических изысканий.

Следует отметить, что большая ответственность лежит на организациях, выполняющих инженерно-геологические изыскания по трассе строительства, так как на основании их данных выполняются прогнозные теплотехнические расчеты и весь проект в целом. Геодезическая съемка местности, определение физико-механических и деформационных свойств многолетнемерзлых грунтов в мерзлом и талом состоянии, замеры температур грунтов, гидрогеологические изыскания играют ключевую роль в назначении тех или иных технических решений. Именно от качества выполненных инженерных изысканий во многом зависит качество всех остальных видов работ: от проектирования до строительства.

Поскольку для решения уравнения теплопроводности необходимо использовать численные методы, область моделирования дискретизируется расчетной сет-

кой во времени и пространстве, то есть покрывается прямоугольной сеткой, в узлах которой задаются теплофизические характеристики, и определяются искомые температуры.

В результате численного решения уравнения теплопроводности получается распределение температур в моделируемой области для различных моментов времени (рис.1). Полученное тепловое поле используется для анализа тепловых режимов грунтов и изменения их механических свойств. На основании анализа принимается решение по обеспечению несущей способности грунтов.

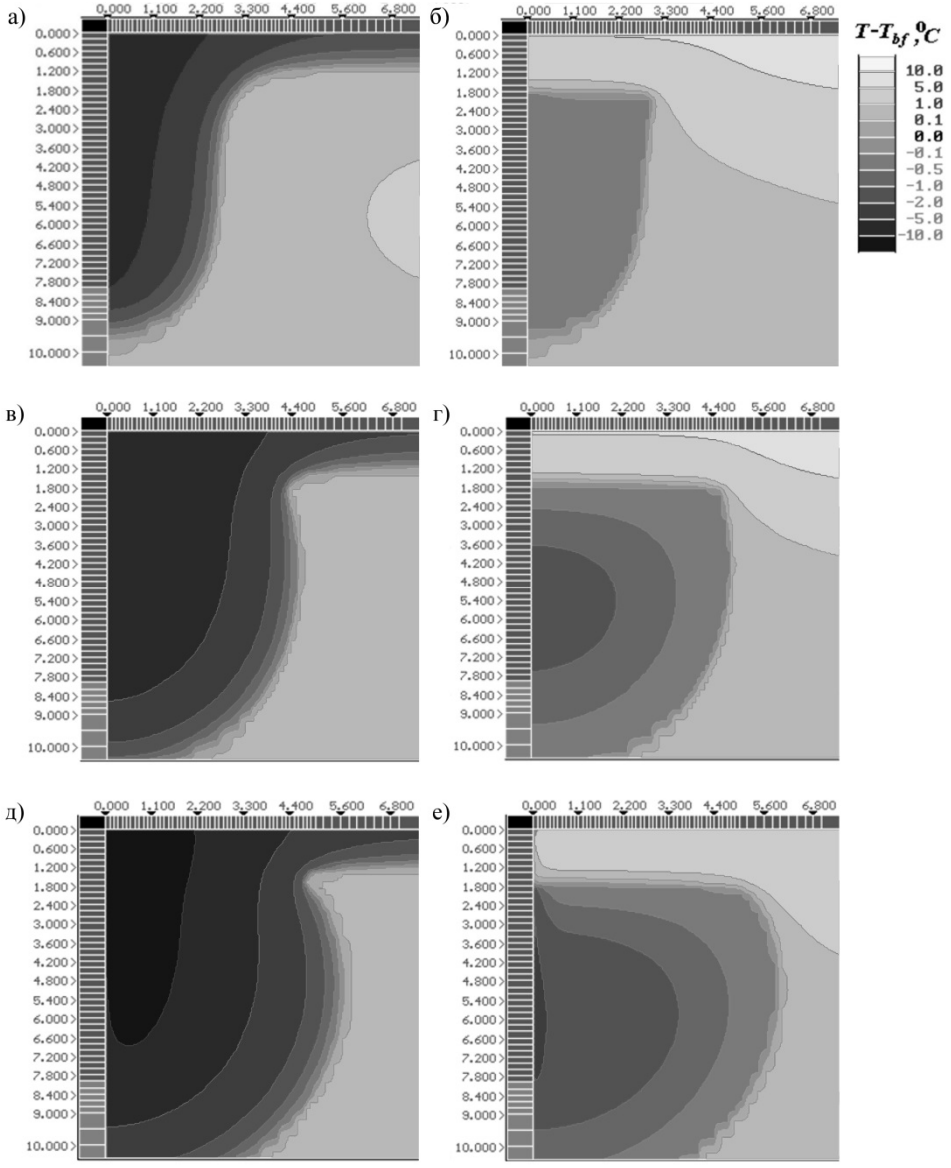

Рис. 1. ***Результаты прогнозного теплотехнического расчета температурного режима грунтов оснований свайных фундаментов опор трубопровода:***
а) конец активного периода 1-го года работы термостабилизаторов; б) конец пассивного периода 1-го года работы термостабилизаторов; в) конец активного периода 1-го года работы термостабилизаторов; г) конец пассивного периода 1-го года работы термостабилизаторов; д) конец активного периода 1-го года работы термостабилизаторов; е) конец пассивного периода 1-го года работы термостабилизаторов

Технические решения по температурной стабилизации грунтов оснований свайных фундаментов опор трубопроводов. Изучение особенностей взаимодействия свайного фундамента опор трубопровода с многолетнемерзлым грунтом позволило разработать надежную систему активной термостабилизации грунтов оснований свайных фундаментовопор для надземной прокладки линейной части магистрального трубопровода «Заполярье – НПС «Пурпе» (рис. 2, 3).

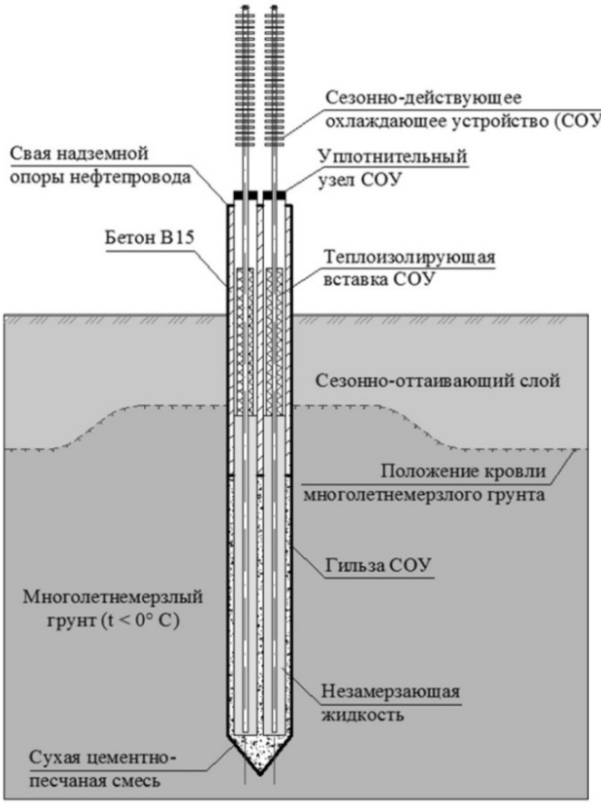

Рис. 2.
Термостабилизация грунтов оснований опор магистрального нефтепровода (на примере бурозабивной сваи)

Принудительное охлаждение или замораживание грунтов было предусмотрено в следующих случаях [4]:

- для обеспечения в установленные проектом сроки требуемого температурного режима грунтов оснований, при котором фундаменты сооружений воспринимают полные проектные нагрузки (температура грунта по боковой поверхности и под торцом свай находится в диапазоне от –0,5 до –1 ^{0}C);
- для перевода суглинистых грунтов, находящихся в пластично-мерзлом состоянии, в твердомерзлое состояние (достижение температуры грунта –1 ^{0}C и ниже);
- для замораживания талых суглинистых грунтов, являющихся основанием зданий и сооружений, с показателем текучести IL более 0,6;
- для минимизации воздействия тепловых источников на расчетный температурный режим грунтов (например, для случая прохождения горячего подземного нефтепровода или размещения подземной горячей емкости вблизи свай, запроектированных по первому принципу).

Во всех случаях применение термостабилизаторов эффективно только при достаточном расчетном обосновании с учетом местных климатических параметров, при которых время выхода на расчетный температурный режим составляет менее одного холодного сезона.

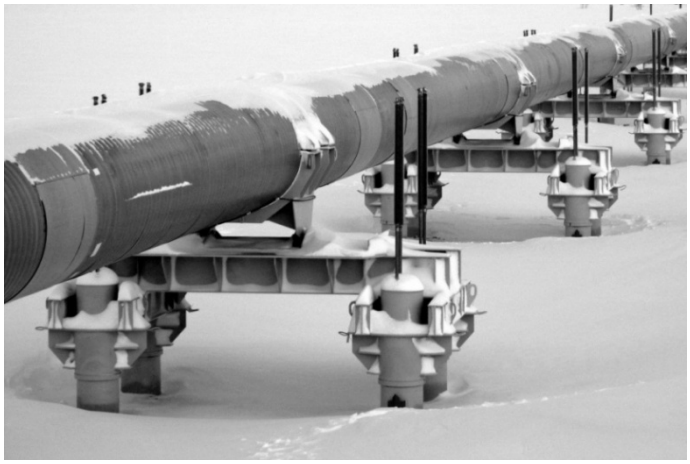

Рис. 3. ***Применение термостабилизированных свайных опор по трассе магистрального нефтепровода «Заполярье – НПС «Пурпе»***

Таким образом, выполнение прогнозных теплотехнических расчетов взаимодействия свайного фундамента опор трубопровода с многолетнемерзлым грунтом является важной частью процесса проектирования, позволяющей принимать обоснованные технические решения, направленные на повышение надежности и долговечности эксплуатируемого объекта.

Комплексный подход к выбору оптимальных проектных решений, частью которого является моделирование теплового взаимодействия в системе сооружение — грунты основания, позволяет оптимизировать затраты без снижения требований к надежности систем.

Применение при моделировании специализированных компьютерных программ (например, таких как TermoStab 67-87, WARM (ТЕПЛО), FROST 3D) позволяет автоматизировать процессы вычислений и сократить сроки разработки и принятия проектных решений.

Список литературы

1. СП 25.13330.2012 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах».
2. СП 11-105-97 «Инженерно-геологические изыскания для строительства».
3. Голубин С. И. Научно-методические основы прогноза взаимодействия подземных газопроводов с засоленными многолетнемерзлыми грунтами полуострова Ямала: Автореф. дис. … кандидата геолого-минералогических наук. – М.: ООО «Газпром ВНИИГАЗ», 2011. – С. 24.
4. Лисин Ю. В., Сощенко А. Е., Павлов В. В., Коргин А. В., Суриков В. И. Технические решения по температурной стабилизации многолетнемерзлых грунтов оснований объектов трубопроводной системы «Заполярье — НПС «Пур-Пе» // Промышленное и гражданское строительство. – 2014. – № 1. – С. 65-68.

Сведения об авторах

Павлов Вячеслав Владимирович*, главный инженер, ОАО «Институт по проектированию магистральных трубопроводов» (ОАО «Гипротрубопровод»), г. Москва, e-mail: gtp@gtp.transneft.ru*

Богатенков Юрий Васильевич, *к. т. н., генеральный директор, ОАО «Сибнефтепровод», г. Тюмень, тел. 8(3452)322710, e-mail: BogatenkovYV@tmn.transneft.ru*

Зотов Михаил Юрьевич*, начальник отдела расчетного обоснования, ОАО «Институт по проектированию магистральных трубопроводов» (ОАО «Гипротрубопровод»), г. Москва, тел. 8(495)9508751, e-mail: ZotovMY@gtp.transneft.ru*

Петелин Александр Николаевич, *ведущий инженер отдела механо-технологического оборудования объектов трубопроводного транспорта, ООО «Научно-исследовательский институт транспорта нефти и нефтепродуктов» (ООО «НИИ ТНН»), г. Москва, тел. 8(495) 9508295, e-mail: PetelinAN@niitnn.transneft.ru*

Pavlov V. V.*, chief engineer of the OJSC «Institute for designing of trunk pipelines, Giprotruboprovod», Moscow, e-mail:gtp@gtp.transneft.ru*

Bogatenkov Yu. V.*, Candidate of Technical Sciences, Director General of OJSC «Sibnefteprovod», Tyumen, phone: (3452)322710, e-mail: BogatenkovYV@tmn.transneft.ru*

***Zotov M. Yu.**, head of the Department for estimation support, OJSC «Institute for designing of trunk pipelines, Giprotruboprovod», Moscow, phone: 8(495)9508751, e-mail: ZotovMY@gtp.transneft.ru*

***Petelin A. N.**, leading engineer of the Department for mechanic-technological equipment of the pipeline transport facilities, LLC «Scientific-Research Institute of oil and oil products transport», Moscow, phone: 8(495)9508295, e-mail: PetelinAN@niitnn.transneft.ru*

Химия и технология переработки нефти и газа

УДК 622.276.6

ВЛИЯНИЕ ГЕЛИРУЮЩИХ АГЕНТОВ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОЛЯНОЙ КИСЛОТЫ

INFLUENCE OF GELLING AGENTS ON FILTRATION CHARACTERISTICS OF HYDROCHLORIC ACID

С. М. Антонов, О. В. Андреев, К. В. Киселев
S. M. Antonov, O. V. Andreev, K. V. Kiselev

Тюменский государственный университет, г. Тюмень

Ключевые слова: ***карбонатные породы, гелирующие агенты, реологические свойства, кинетические кривые, фильтрация кислотных составов***
Key words: ***carbonate rocks, gelling agents, flow properties, kinetic curves, acid compositions filtration***

Основной способ интенсификации притока углеводородных флюидов в карбонатных коллекторах — обработка призабойной зоны пласта соляно-кислотным раствором [1]. Высокая скорость химической реакции соляной кислоты с минералами породы и преимущественное сосредоточение кислотного потока по высокопроницаемым зонам пласта значительно снижают эффективность воздействия [2].

Замедление скорости реакции соляной кислоты с карбонатами достигается снижением активности иона гидроксония за счет добавки сорастворителей [3]. Однако нагнетание подобных жидкостей не приводит к перераспределению потоков фильтрации состава в гидрофобизированные и низкопроницаемые участки пласта [1].

Отмечается [4], что в ряду ньютоновская → псевдопластическая → дилатантная жидкость потокоотклоняющие свойства раствора усиливаются. Изменить характер течения соляной кислоты возможно при модификации состава растворами ПАВ с различной ионной активностью [4, 5], полимеров и водорастворимых спиртов [1].

Эпизодичны данные по фильтрации гелированных соляно-кислотных составов в условиях залегания низкотемпературных карбонатных пластов.

Цель работы состоит в проведении фильтрационных исследований соляно-кислотных растворов, гелированных неионогенным ПАВ, полимером, комплексом неионогенного и амфотерного ПАВ применительно к условиям залегания низкотемпературного карбонатного пласта.

Методика эксперимента. Реологические характеристики соляно-кислотных растворов (C_{HCl} = 12 % мас.), загеленные неионогенным ПАВ (1–10 % мас.), суспензией полимера (0,5–3 % мас.) и комплексом неионогенного и амфотерного ПАВ (1+3 % мас., 2+4 % мас., 2+7 % мас.), устанавливали на 17-скоростном ротационном вискозиметре, позволяющем измерять реологические показатели в широких интервалах скоростей (0,1–1000 об/мин), температур (12–260 ^{0}C) и давлений (до 13,9 МПа). Для сопоставления реакционной способности растворов модифи-