

Введение Очистка нефтяных скважин и призабойной зоны направлено на удаление асфальтеносмолапарафиновых отложений (АСПО) на внутрискважинном оборудовании, стенках НКТ и обсадной колонны, в порах коллектора, а также штангах и насосе. Пульсационная очистка нефтяной скважины приводит к возникновению нестационарных перетоков в призабойной зоне пласта. Ее эффективность может быть повышена путем использования различных растворителей и технологий кислотной обработки [1]. Для определения скорости тепло-массообмена в работах [2-4] предложена квазистационарная модель расчета, в которой сначала рассчитывается гидродинамика движения жидкости по трубопроводной арматуре, а затем теплообмен. В рамках этой модели коэффициент теплоотдачи можно получить согласно уравнениям: $h = \frac{k}{\delta} \cdot \text{Nu}$, (1) где δ - тепловой пограничный слой, Nu - число Прандтля. Толщина гидродинамического пограничного слоя определяется через интегральный коэффициент сопротивления R , [5] (2) Коэффициенты теплоотдачи вычисляются по принципу аналогии теплообмена. Однако приведенные выше уравнения не учитывают особенности локальных процессов диссипации кинетической энергии в турбулентном потоке жидкости и в особенности в пограничном слое. В связи с этим в работе поставлена задача - произвести расчеты теплообмена для пульсационной динамики движения жидкости в рамках модели турбулентности, где производится учет вышеизложенных особенностей. Семейство моделей относится к двум параметрическим моделям турбулентности, в которых решаются два уравнения переноса определяющие турбулентную скорость и масштаб длины. Выбор модели турбулентности зависит от характера турбулентного потока, требуемой точности, доступных вычислительных ресурсов, и временных затрат необходимых на процесс моделирования. Для адекватного выбора модели турбулентности необходимо четко представлять свойства и ограничения каждой модели турбулентности. Традиционно считается, что стандартная модель турбулентности Лаундера-Сполдинга пригодна для высокорейнольдсовых течений (порядка $Re=10^5$) и обеспечивает хорошие результаты при моделировании течений с малыми градиентами скоростей, а также с использованием расчетной сетки, разрешающей только логарифмический подслой. А ее низкорейнольдсовые модификации: "RNG" и "Realizable" k-ε модели учитывают конечную скорость турбулентной диссипации ϵ и улучшает точность решения высоконапряженных потоков с циркуляцией турбулентности, что улучшает точность расчета течений с закруткой потока. «RNG» теория предлагает аналитическую формулу турбулентных чисел Прандтля, в то время, как в стандартной k-ε модели данный параметр является константой. Практические исследования показали, что "RNG" и "Realizable" k-ε модели турбулентности завышают либо занижают значение турбулентной вязкости. Поэтому для расчетов в работе использовалась стандартная k-ε модель

турбулентности. 1. Пульсационная гидродинамика в призабойной зоне скважины

На рис. 1 схематически показана структура потоков в призабойной зоне скважины. На концевике НКТ расположен высокочастотный индукционный нагреватель ВИН, способный за 2-3 мин нагреть поверхность НКТ до температуры 70-80°C [6]. Хвостовик насосно-компрессорной трубы имеет изоляционное фланцевое соединение от основной части НКТ, так, что поток тепла не распространяется вдоль поверхности металла, а также опущен ниже интервала перфорации на длину равную L , порядка 10-15 метров

Рис. 1 - Потоки рабочей жидкости в призабойной зоне скважины с высокочастотным индукционным нагревом на концевике

Согласно [3] средняя температура потока жидкости растет согласно закону (3) где T_0 - начальная температура (порядка 20-250 °C), τ - характерное время нагрева до температуры стенки. Поток по НКТ подается сверху и возвращается по затрубному пространству. После переключения клапана управления на устье, направления потоков меняются на противоположные. На рис. 2 представлена динамика изменения объемного расхода в затрубье для воды.

Рис. 2 - Динамика изменения потока в затрубье

Соответствующие этой динамике мгновенные значения коэффициентов тепло α Вт/м²К и массоотдачи β м/с, рассчитанные по квазистационарной модели (КСМ) (1), (2) показаны на рис. 3 а, б

Рис. 3 - Мгновенные значения коэффициентов тепло и массоотдачи для воды по КСМ модели

2. Расчет коэффициентов теплоотдачи по стандартной k-е модели турбулентности

Расчет коэффициентов теплоотдачи по стандартной k-е модели турбулентности производился в программном комплексе FLUENT, где используется метод конечных элементов (МКЭ). Геометрическая модель объекта задавалась в виде круглой цилиндрической трубы с длиной равной зоне интервала перфораций ($l=2-4$ м) со стандартным диаметром НКТ ($d=145$ мм). Математическое описание задавалось системой дифференциальных уравнений Навье Стокса, дополненных уравнениями неразрывности и энергии, с заданными краевыми условиями переноса тепла. Коэффициенты массоотдачи вычислялись из условий подобия. В качестве растворителей были выбраны нефрас, пластовая вода, газойль, керосин. Расчет производился по двум методам: Метод 1 «Wall Func. Heat Tran. Coef.» Коэффициент теплоотдачи определяется из соотношения (4) где ρ - плотность, c_p - теплоемкость, k_p - турбулентная кинетическая энергия в точке p . Согласно стандартной k-е модели турбулентная вязкость μ_t выражается через величины k (турбулентная энергия) и ϵ (скорость диссипации турбулентной энергии k) следующим образом, C_μ - константа k - е модели турбулентности, T^* определяется по следующему выражению [7], [8] : Метод 2 «Surface Heat Transfer Coef.» В этом методе коэффициент теплоотдачи определяется из соотношения (5) где q - конвективный тепловой поток, T_{wall} - температура стенки, T_{ref} - температура жидкости вдали от стенки, задается в программе как постоянная величина. Мгновенные значения коэффициентов теплоотдачи α Вт/м²К для

воды, рассчитанные по методам 1 и 2 показаны на рис. 4 Рис. 4 - Мгновенные значения коэффициентов теплоотдачи для воды по k-е модели турбулентности В таблицах 1, 2 приведены средние (по периоду пульсаций) значения коэффициентов тепло и массоотдачи для различных растворителей Таблица 1 Средние по периоду коэффициенты теплоотдачи при тепловой очистке скважины для различных моделей и растворителей Растворитель Модель KCM Модель k - e турбулентности Метод 1 Метод 2 Газойль 49 201 202 Керосин 80 37 38 Нефрас 152 49 51 Вода 961 1210 1211 Таблица 2 - Средние по периоду коэффициенты массоотдачи при тепловой очистке скважины для различных моделей и растворителей Растворитель Модель KCM Модель k - e турбулентности Метод 1 Метод 2 Газойль 1,64E-06 4,60E-06 4,63E-06 Керосин 3,14E-06 9,70E-07 1,00E-06 Нефрас 6,55E-06 9,18E-07 9,55E-07 Вода 9,79E-06 1,09E-05 1,09E-05 Из расчетов видно, что данные по коэффициентам тепло-массоотдачи, полученные в расчетах по стандартной в k - e модели имеют лучшее совпадение (см. метод 1 и 2). Эффекты диссипации энергии играют существенную роль для органических растворителей. Для воды эти эффекты незначительны. Здесь расхождение составляет около 20 %, что вполне приемлемо 3. Эффективность очистки Для эффективного прогрева призабойной зоны необходимо опускать хвостовик на длину L порядка 20-30 метров ниже интервала перфорации. Ее значение определяется из соотношения [3] , (6) где - средняя скорость растворителя. Мощность ВИН определяется экспериментально из расчета 4 кВт на метр длины ВИН [5]. Для оценки эффективности $\Xi = N/M$ (использования растворителей приводится энергия, затраченная на растворение единицы массы АСПО при пульсации (см. табл 3) Таблица 3 - Эффективность тепловой очистки скважины для различных растворителей Растворитель , Вт/м²К , м/с $\Xi = N/M$, кДж/т Газойль 200,5 4,6E-06 668,04 Керосин 36,58 9,7E-07 118,41 Нефрас 48,7 9,18E-07 24,01 Вода 1209,5 1,09E-05 12,31 Из расчетов эффективности очистки можно сделать вывод, что она слабо зависит от растворимости рабочей жидкости, а главным образом определяется коэффициентами тепло и массоотдачи. Массоотдача определяет скорость растворения, а теплоотдача мощность ВИН. Для воды эти показатели наилучшие и приемлемые длины ВИН. Близким к воде является нефрас, у которого большая скорость растворения за счет его собственной растворимости, однако по энергозатратам вода превосходит нефрас в два раза.