

УДК 66.015.23:661.96:622.276.6

Кравченко О.В., Велигоцкий Д.А., Пода В.Б.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАСООБМЕНА ПРИ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ВОДОРОДНОЙ ОБРАБОТКЕ ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЫ ПЛАСТА НЕФТЯНОЙ ИЛИ ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЫ

Производительность нефтяных, газовых и газоконденсатных скважин определяется качественным состоянием призабойной зоны продуктивного пласта (ПЗП), которое характеризуется главным образом его проницаемостью, то есть способностью фильтровать к забою скважины добываемые углеводороды. Практически все пласты, представленные такими породами как пески, песчаники, карбонаты, доломиты, глины, обладая достаточно высокой пористостью, имеют невысокую естественную проницаемость, при которой через породу возможна фильтрация, как правило, только газа, и то, при большом пластовом давлении. Естественная проницаемость продуктивного пласта, значительно ухудшается еще на стадии первичного вскрытия скважины (бурения и обсаживания), на которой происходит механическая коагуляция призабойной зоны скважины буровыми и цементирующими растворами. В период всего срока эксплуатации скважины происходит коагуляция ПЗП продуктами разрушения пласта и асфальтосмолопарафиновыми отложениями (АСПО), что приводит к дальнейшему снижению проницаемости продуктивного пласта.

Все выше перечисленные факторы влияют на качество фильтрационных свойств ПЗП, нарушают гидродинамическую связь продуктивного пласта со скважиной и часто приводят к полному отсутствию дебита.

Существует большое количество технологий очистки ПЗП. Как правило, они основаны на различных видах физического и химического воздействия на пласт. Это тепловые, кислотные, щелочные обработки или их комбинации. Отдельно, как наиболее эффективный метод, позиционируется гидродинамический разрыв пласта. Однако и у последнего имеются свои ограничения в применении, особенно на нефтяных месторождениях с высоким содержанием парафина и высокой угрозой последующего увеличения обводненности пласта. Поэтому, одним из перспективных направлений интенсификации добычи нефти на таких месторождениях является сочетание теплового и химического воздействия [1–2].

Интересным направлением в развитии технологий интенсификации является применение газообразного водорода как вещества, обладающего наибольшей проникающей способностью в природе. Показано, что водород, особенно атомарный, участвует не только в процессах гидроконверсии тяжелых фракций и разложения парафина, но и существенно увеличивает газовую проницаемость кернов породы пласта [3–6]. Однако доставка водорода с поверхности к призабойной зоне пласта проблематична в связи с его малой плотностью и взрывоопасностью. Поэтому предлагаются методы, в которых в ПЗП реализуется экзотермическая реакция сильной кислоты и металла, например магния, которая сопровождается выделением водорода. Реализация такого процесса также затруднена, т.к. скорость реакции зависит от концентрации кислоты, на величину которой в нефтегазовом комплексе установлены ограничения в связи с ее большой коррозионной активностью.

Одним из выходов в сложившейся ситуации является использование «горячего» водорода, генерируемого в результате химической реакции гидрореагирующих веществ (ГРВ) с водой. Термин «горячий водород» введен авторами работы [6] в связи с тем, что процессы гидролиза ГРВ проходят с выделением теплоты, и выделяющийся при этом атомарный и молекулярный водород имеет повышенную температуру. Однако применение такого технологического подхода в реальных скважинах затруднено из-за отсутствия данных по тепломассобмену и кинетике процессов генерирования водорода в зависимости от химического состава ГРВ, давления в системе, особенностей конструкции реакционного объема и других параметров.

В настоящее время существует несколько конструктивов скважин, но основной фонд по-прежнему состоит из вертикально ориентированных. Продуктивный пласт (или несколько пропластков) протяженностью от метра до нескольких десятков располагается на глубинах от 200 до 6000 м. Эксплуатационная колонна скважины в ПЗП представляет собой перфорированную металлическую или пластиковую вертикально ориентированную трубу диаметром 100–150 мм, расположенную на глубине продуктивного горизонта. Поэтому, для физического моделирования термобарохимических процессов в эксплуатационной колонне в данных исследованиях использована цилиндрическая труба, заполненная водой. При этом твердое гидрореагирующее вещество в виде протяженного цилиндра, располагается в ней коаксиально.

Одним из основных критериев выбора химического состава твердого ГРВ основывался на требовании генерирования водорода с максимально возможной энтальпией, т.е. реакция ГРВ с жидким окислителем

должна обладать максимально высоким тепловым эффектом. Кроме того, наиболее эффективная обработка призабойной зоны достигается при высоком массовом потоке генерируемого водорода, что возможно только при больших скоростях газообразования на поверхности ГРВ. В экспериментальных исследованиях проведение реакций в обычной технической воде объясняется наличием в скважине жидкости глушения или пластовой воды. Результатом реакции ГРВ с водой является повышение щелочности среды (до $pH = 13$). Это позволяет наряду с «водородной» проводить также и горячую щелочную обработку ПЗП.

В таблице 1 представлены показатели газо- и тепловыделения в процессе гидролиза некоторых исследованных и наиболее перспективных в практическом применении ГРВ при нормальных условиях.

Анализ данных, а также результаты предварительных экспериментальных исследований по изучению характеристик процесса газообразования при реакции ГРВ с водой, представленные в табл. 1, показывают, что наиболее предпочтительными следует считать алюмогидриднариевый композит (АГНК-50), состоящий из 50 % алюминия Al и 50 % гидрида натрия NaH, и алюмогидрид натрия $NaAlH_4$ (АГН). Указанные типы ГРВ вступают в реакцию в широком диапазоне температур, как с водой, так и водяным паром.

ГРВ на основе лития имеют низкую скорость газогенерации. При этом наблюдается пассивация реакционной поверхности твердых гидрореагирующих веществ, вплоть до полного прекращения реакции уже при относительно невысоких давлениях – более 0,3...0,5 МПа. Это делает проблематичным их применение в реальных технологических процессах обработки ПЗП.

На сегодняшний день, авторам данной статьи не известны математические и компьютерные модели процесса тепломассообмена в химических системах «жидкость–твердое тело» с активным газообразованием (химическим кипением). Связано это как со сложностью учета в модели большого количества влияющих на процесс факторов, так и отсутствием экспериментальных данных, в том числе по определению его лимитирующих стадий. Незначительное количество исследований в этой области проводилось на небольших образцах ГРВ, максимальный габаритный размер которых не превышал 25 мм. К тому же, в большинстве этих работ изучались процессы с пузырьковым режимом газообразования [7–10]. Практическое использование результатов этих исследований для описания тепломассообменных процессов при гидролизе крупногабаритных образцов ГРВ, тем более в виде протяженных в вертикальном направлении цилиндров, невозможно.

Таблица 1 – Основные показатели реакции некоторых ГРВ с водой при н.у.

Гидрореагирующие вещества	Количество водорода, выделяющегося с 1 кг ГРВ (теор. / экспер.), кг	Тепловой эффект реакции на 1 кг ГРВ (расчетный), кДж	Скорость реакции (выделения водорода с ед. поверхности ГРВ), кг / (м ² ·с)
Al активированный	0,094 / 0,075	15942,3	0,0008
Li	0,145 / 0,137	28655,4	0,0015
LiH	0,253 / 0,151	36447,8	0,0074
CaH ₂	0,096 / –	5392,7	0,035
50 % Al + 50 % LiH	0,182 / 0,118	26220,7	0,0017
LiAlH ₄	0,212 / –	16500,7	–
50 % Al + 50 % NaH	0,093 / 0,068	42564,5	0,069
NaAlH ₄	0,143 / 0,136	7583,9	0,038

К основным характеристикам тепломассообмена, необходимым для оценки эффективности термохимической обработки призабойной зоны пласта водородом, получаемым в ходе реакции ГРВ с водой, следует отнести массоотдачу по водороду, скорость массоотдачи с единицы поверхности v , и температуру генерируемого водорода T_{H_2} , определяющего его энтальпию. Важными показателями процесса тепломассообмена также являются удельный тепловой поток с единицы поверхности реагирующего ГРВ, а также условия теплоотдачи от этой поверхности к газожидкостной смеси и генерируемому водороду. Эти пока-

зателі характеризуються температурою реакційної поверхності ГРВ T_s і відповідними коефіцієнтами теплоотдачі $\alpha_{\text{еж}}$ і α_{H_2} .

В умовах протікання реакції гідрореагуючого речовини, представляючого собою протяжений вертикальний циліндр, коаксіально розміщений в реакційному просторі, к основним факторам, впливаючим на показателі тепломасообміну в системі, слідуеть віднести висоту циліндра H і відношення початкового значення його діаметра к внутрішньому діаметру труби. Даний фактор характеризує ступінь заповнення реакційного простору і представлений як коефіцієнт завантаження поперечного сечення реакційної зони с гідрореагуючим речовиною k_s .

В зв'язі с тим, що в ході реакції с теченням часу діаметр циліндра ГРВ зменшується, значення k_s постійно змінюється, а, відповідально, змінюються і параметри тепломасообміну. Поєтому еше одним фактором, оказуючим помітне впливання на показателі тепломасообміну, являється час реакції τ или час спрацювання циліндра.

И последним фактором, впливання которого на теплообмінні процеси дослідувались в даній роботі – ето тавлення в реакційному об'ємі p . Раніше в роботах [11–13] було показано, що величина тавлення оказує помітне впливання на кінетику реакцій, в-частності, на діаметр бульбашок генеруємого водороду, що може суттєво впливати на картину процесу тепломасообміну в цілому.

С целью повышения эффективности проведения экспериментальных исследований и точности их обработки применялись методы математического оптимального планирования многофакторного эксперимента.

Исследование влияния перечисленных факторов на основные показатели тепломасообміну при реакції вертикального циліндра ГРВ с водою проводились на стенде с открытым бассейном и на установках с сосудами высокого тавлення. В качестве исследуемых образцов были выбраны вертикальные циліндры ГРВ (АГНК–50п/э и АГН) высотой 530 ± 16 мм, набранные из отдельных элементов діаметром 46 мм высотой 8...15 мм и имеющих центральное отверстие діаметром 10 мм. Последнее конструктивное решение позволяет осуществлять сборку отдельных элементов в протяженный вертикальный циліндр заданной высоты.

Для изучения влияния коэффициента завантаження сечення k_s на тепломасообмінні процеси, происходящие при гидролизе вертикального циліндра ГРВ, последний размещали в цилиндрические генераторы (имитаторы ПЗП скважины) с открытым в воду нижним сечением и верхней крышкой (имитация установленного пакера и закрытого устья скважины). В зв'язі с технологическими ограничениями циліндр из ГРВ изготавливался только одного діаметра, поэтому принято решение о варьировании діаметров модели эксплуатационной колонны. Для получения требуемых согласно принятому ортогональному центральному композиционному плану (ЦКП) экспериментальных значений k_s внутренние діаметры циліндров имели следующие значения: 80, 70, 65, 60, 55 и 50 мм. Крышка генераторов оборудована системой отбора водороду, обеспечивающей полное погружение в воду циліндра ГРВ. Для снижения теплоотвода из внутренней полости генераторов в окружающую среду через его стенки, а также с целью возможности визуализации и кинофоторегистрации при исследованиях в открытом бассейне, генераторы изготавливались из оргстекла. Кроме того, во всех опытах по термометрированию внутренняя поверхность генераторов дополнительно теплоизолировалась листовой резиной.

Температуры поверхности циліндра ГРВ вдоль его высоты, газожидкостной смеси вблизи внутренней стенки модели, генеруємого водороду на выходе из модели и воды в бассейне измерялись при помощи хромель-копелевых термопар. Количество термопар, их месторасположение у поверхности циліндра ГРВ и вблизи внутренних стенок моделей выбирались в соответствии с разработанными планами экспериментов согласно количеству и значениям уровней варьирования фактора H .

В ходе проведенных экспериментов с вертикальными циліндрами ГРВ на основе композита АГНК–50 п/э была выявлена зависимость величины их теплоотдачи от начального коэффициента завантаження сечення k_s (рис. 1).

На основе результатов экспериментов, проведенных в соответствии с составленным ортогональным ЦКП, получена зависимость полноты теплоотдачи циліндров ГРВ состава АГНК–50п/э от коэффициента завантаження сечення генератора в аналитическом виде

$$K_p(k_s) = 0,728 - 0,128k_s + 0,619k_s^2 - 0,405k_s^3.$$

На основе результатов экспериментов, проведенных в соответствии с составленным ортогональным ЦКП, получена зависимость полноты теплоотдачи циліндров ГРВ состава АГНК–50п/э от коэффициента завантаження сечення генератора в аналитическом виде

$$K_p(k_s) = 0,728 - 0,128k_s + 0,619k_s^2 - 0,405k_s^3.$$

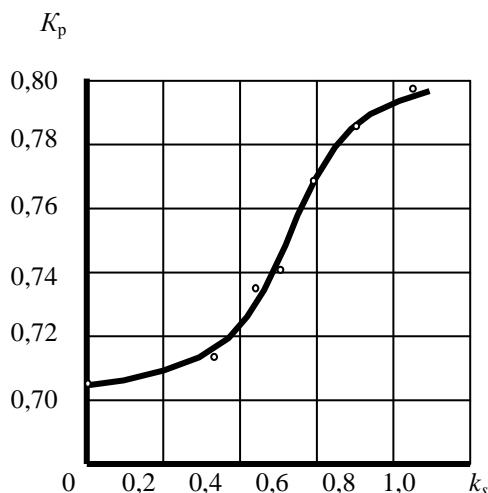


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента полноты массоотдачи ГРВ АГНК–50п/э от коэффициента загрузки сечения

В пределах погрешностей эксперимента, равных от 5 до 8 % и разброса конструкционных характеристик элементов АГНК–50п/э и АГН до 15 % заметного влияния давления на показатель K_p обнаружено не было.

Объемная скорость массоотдачи с поверхностью ГРВ v_s в проведенных экспериментах определялась косвенным путем, на основании результатов измерения средней линейной скорости уменьшения геометрических размеров элементов v_l с использованием зависимости

$$v_s = V_{уд} \rho_3 v_l,$$

где $V_{уд}$ – экспериментально определенное удельное газовыделение с единицы массы ГРВ, м³/кг; ρ_3 – плотность элементов ГРВ, кг/м³.

Для элементов ГРВ из АГНК–50 п/э $V_{уд} = 0,76$ м³/кг и $\rho_3 = 1,57$ кг/м³.

Также как и для K_p , величина поверхностной скорости массоотдачи v_s цилиндра ГРВ из АГНК–50 п/э в пределах погрешностей экспериментов и разброса конструкционных характеристик элементов ГРВ не было обнаружено заметной зависимости от давления.

В результате экспериментальных исследований получена регрессионная зависимость скорости массоотдачи v_s от величины коэффициента загрузки сечения k_s вдоль высоты цилиндра H из АГНК–50п/э:

$$v_s(H, k_s) = 0,816 - 1,065H - 0,022k_s + 1,375H^2 - 0,102k_s^2 - 0,437Hk_s.$$

На рис. 2. приведен общий вид поверхности отклика.

В дальнейших исследованиях процессов тепломассобмена химически реагирующих с жидкостями вертикальных протяженных цилиндров ГРВ с газообразованием в области внешней диффузии, значения температур и коэффициентов теплоотдачи было принято представлять в относительном безразмерном виде в виде симплексов \bar{T} и $\bar{\alpha}$. В качестве масштабных величин данных параметров принимались, соответственно, температура поверхности T_{so} небольших образцов ГРВ, реагирующих при нормальном атмосферном давлении в неограниченном объеме воды, имеющей температуру 293 К, и коэффициент теплоотдачи α_0 от поверхности образцов в объем воды. Такой выбор масштабных величин параметров теплообмена обусловлен относительной простотой их определения для любого твердого тела рассматриваемого класса веществ и их однозначной зависимостью от количества теплоты реакции, скоростей тепловыделения и массообмена, определяющихся только химическими свойствами твердого реагента.

Для образцов из выбранных нами ГРВ значения этих масштабных величин составляли: для АГНК–50п/э – $T_{so} = 328 \pm 7,2$ К и $\alpha_0 = 162 \pm 6,5$ кВт/(м²К), для АГН – $T_{so} = 305 \pm 5,5$ К и $\alpha_0 = 149 \pm 3,8$ кВт/(м²К).

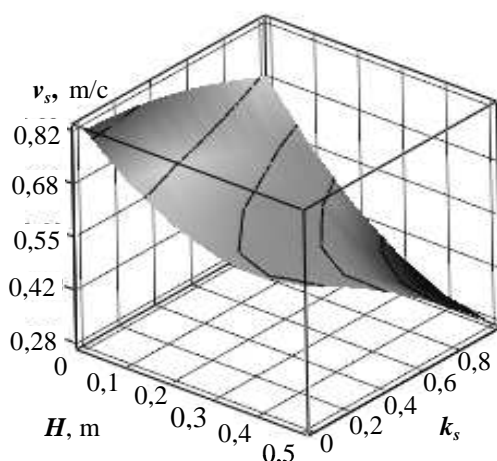


Рисунок 2 – Изменение скорости массоотдачи с поверхности цилиндра ГРВ из АГНК–50п/э вдоль его высоты и в зависимости от коэффициента загрузки сечения модели при $p = 0,1$ МПа

Аналогично изложенным выше соображениям, фактор текущего времени реакции цилиндра $\bar{\tau}$ также оценивался как доля от полного времени срабатывания цилиндров ГРВ различного химического состава (продолжительность реакции).

Значения коэффициентов теплоотдачи от реагирующей поверхности цилиндра ГРВ к генерируемому водороду и в объем газожидкостной смеси определялась согласно зависимости

$$\alpha = \frac{K_p Q_p v_s}{T_s - T},$$

где Q_p – удельное количество тепла, выделяющееся в результате реакции и отнесенное к единице объема генерируемого газа (для образцов АГНК–50п/э – $Q_{\text{рн}} = 9,81 \cdot 10^3$ кДж/м³, для образцов АГН – $Q_{\text{рн}} = 4,75 \cdot 10^3$ кДж/м³).

В качестве величины T при нахождении значений коэффициента теплоотдачи цилиндра ГРВ в объем газожидкостной смеси $\alpha_{\text{эж}}$ принимались значения температуры газожидкостной смеси $T_{\text{эж}}$, измеряемые непосредственно у стенки модели на уровне замера соответствующих значений T_s . При определении значений α_{H_2} температура поверхности цилиндра ГРВ T_s принималась осредненной по высоте, а значения T в вышеприведенной формуле соответствовали значениям температуры водорода T_{H_2} в выходном патрубке модели.

На основании данных экспериментов, проведенных согласно многофакторным ортогональным ЦКП, были получены регрессионные зависимости между температурами реакционной поверхности вертикального цилиндра ГРВ и генерируемого им водорода на выходе из модели, а также коэффициентов теплоотдачи от поверхности цилиндров к газожидкостной смеси и генерируемому водороду

$$\begin{aligned} \bar{T}_s(k_s, \bar{p}, \bar{\tau}, H) &= 1,768 - 0,124k_s + 4,72 \cdot 10^{-3} \bar{p} - 0,891\bar{\tau} - 1,828H + \\ &+ 0,593k_s^2 - 11,125 \cdot 10^{-6} \bar{p}^2 + 0,701\bar{\tau}^2 + 3,469H^2 + 0,693k_s H - 0,303\bar{\tau} H; \\ \bar{T}_{\text{H}_2}(k_s, \bar{p}, \bar{\tau}) &= 1,031 + 1,399k_s + 4,73 \cdot 10^{-3} \bar{p} - 0,821\bar{\tau} - 0,380k_s^2 - \\ &- 7,13 \cdot 10^{-6} \bar{p}^2 + 0,395\bar{\tau}^2 + 0,63 \cdot 10^{-3} k_s \bar{p} - 0,087k_s \bar{\tau} - 0,838 \cdot 10^{-3} \bar{p} \bar{\tau}; \\ \bar{\alpha}_{\text{эж}}(k_s, \bar{p}, \bar{\tau}, H) &= 0,583 - 1,948k_s + 0,888\bar{\tau} + 1,065H + 1,376k_s^2 - \\ &- 1,691 \cdot 10^{-6} \bar{p}^2 - 0,434\bar{\tau}^2 - 2,296H^2 - 0,189 \cdot 10^{-3} k_s \bar{p} - 0,095k_s \bar{\tau} + \\ &+ 0,038k_s H + 0,276 \cdot 10^{-3} \bar{p} \bar{\tau} + 0,707 \cdot 10^{-3} \bar{p} H; \\ \bar{\alpha}_{\text{H}_2}(k_s, \bar{p}, \bar{\tau}) &= -0,503 + 4,635k_s + 6,224 \cdot 10^{-3} \bar{p} + 1,355\bar{\tau} - 2,55k_s^2 - \\ &- 11,5 \cdot 10^{-6} \bar{p}^2 - 1,46\bar{\tau}^2 + 0,397 \cdot 10^{-3} k_s \bar{p} + 1,184k_s \bar{\tau} - 1,503 \cdot 10^{-3} \bar{p} \bar{\tau}. \end{aligned}$$

На рис. 3–6 приведены графические зависимости параметров теплоотдачи от выбранных факторов при начальном давлении в реакционном объеме равном 0.1 МПа.

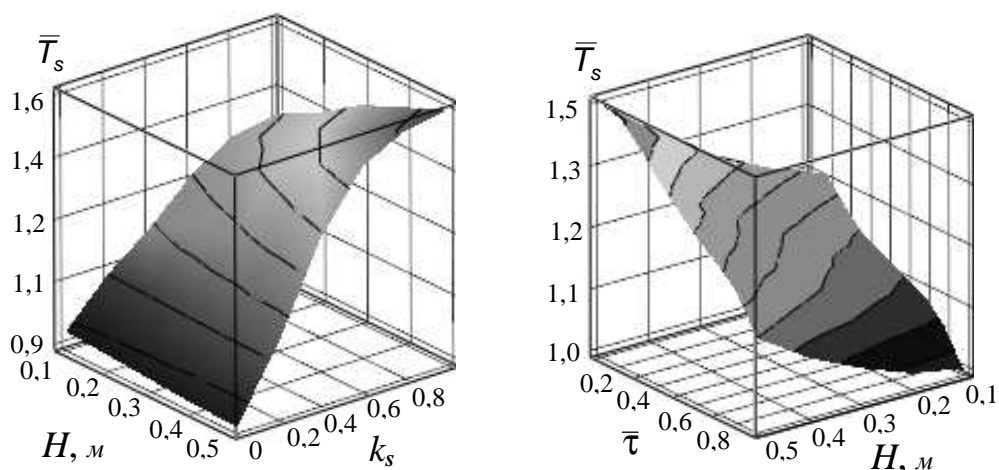


Рисунок 3 – Зависимость относительной температуры реакционной поверхности вертикального цилиндра ГРВ вдоль его высоты от коэффициента загрузки сечения в течение времени реакции

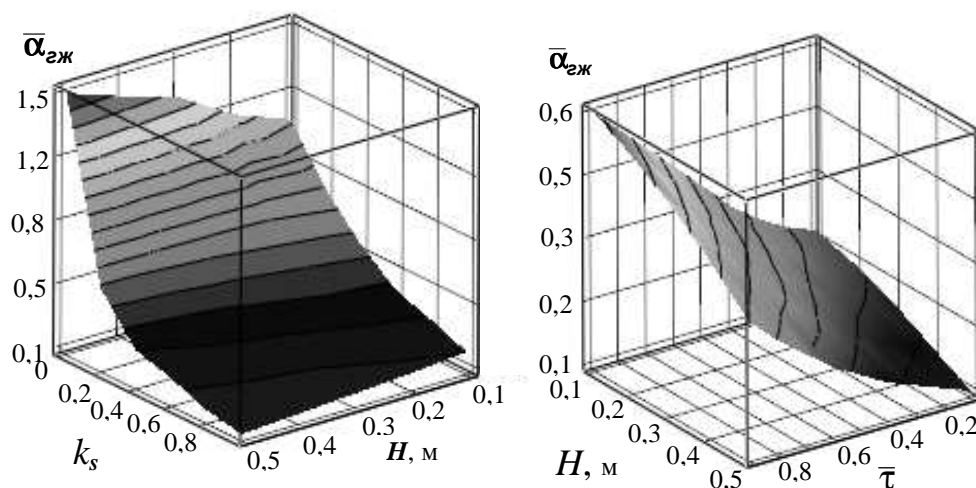


Рисунок 4 – Зависимости коэффициентов теплоотдачи реакционной поверхности вертикального цилиндра ГРВ в газожидкостную смесь вдоль его высоты от коэффициента загрузки сечения в течение времени реакции

Анализ результатов данных исследований позволил сделать следующие выводы и рекомендации:

- для цилиндров ГРВ, представляющих собой прессованные механические смеси алюминия со щелочными металлами или их гидридами, подобных АГНК-50п/э, увеличение коэффициента загрузки сечения ведет к росту полноты массоотдачи K_p по водороду (рис. 1);
- уменьшение зазора между стенками реакционного объема и поверхностью цилиндра ГРВ (увеличение коэффициента загрузки сечения k_s) вызывает снижение скорости массоотдачи v_s цилиндра по водороду вследствие увеличения экранирования поверхности цилиндра пузырьками выделяющегося в ходе реакции водорода (рис. 2). По этой же причине наблюдается уменьшение скорости массоотдачи по высоте цилиндра;
- при реакции вертикального цилиндра ГРВ в неограниченном объеме воды ($k_s = 0$) температура его поверхности \bar{T}_s вдоль высоты несколько снижается (рис. 3). Увеличение k_s приводит к росту температуры поверхности цилиндра с увеличением его высоты и падению коэффициента теплоотдачи в газожидкостную смесь. При этом, чем больше значение k_s , тем более заметен рост \bar{T}_s вдоль цилиндра и соответствующее падение $\bar{\alpha}_{гж}$;
- с уменьшением свободного пространства вокруг цилиндра (увеличением k_s) наблюдается рост температуры генерируемого водорода \bar{T}_{H_2} и интегрального значения коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_{H_2}$ (рис. 5);

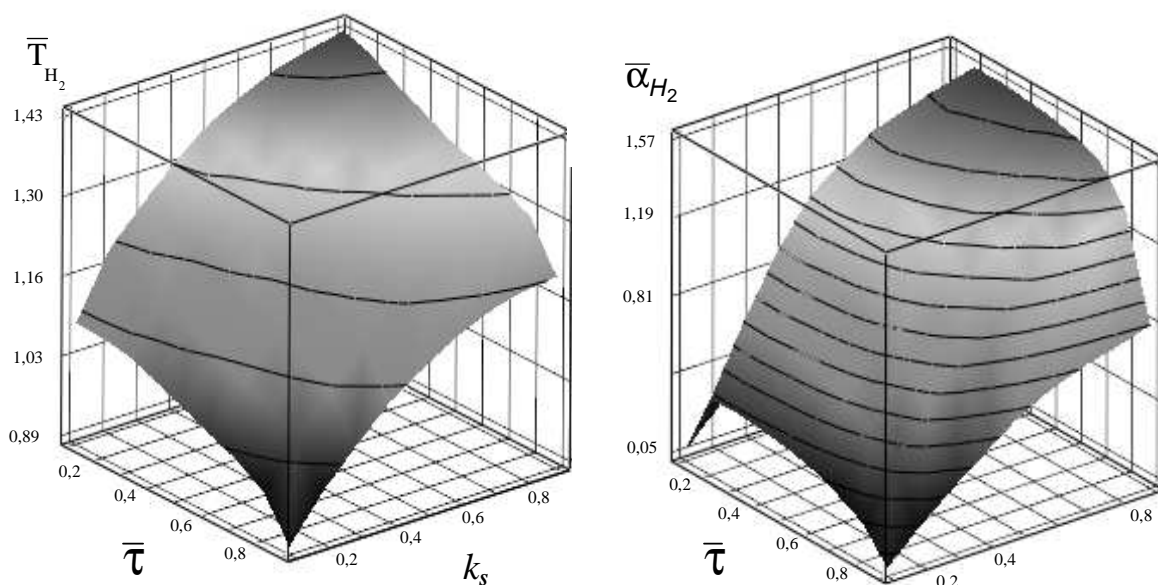


Рисунок 5 – Зависимости относительных величин температуры генерируемого водорода и коэффициента теплоотдачи поверхности вертикального цилиндра ГРВ к водороду от коэффициента загрузки поперечного сечения реакционного объема в течение времени реакции при $p = 0,1$ МПа

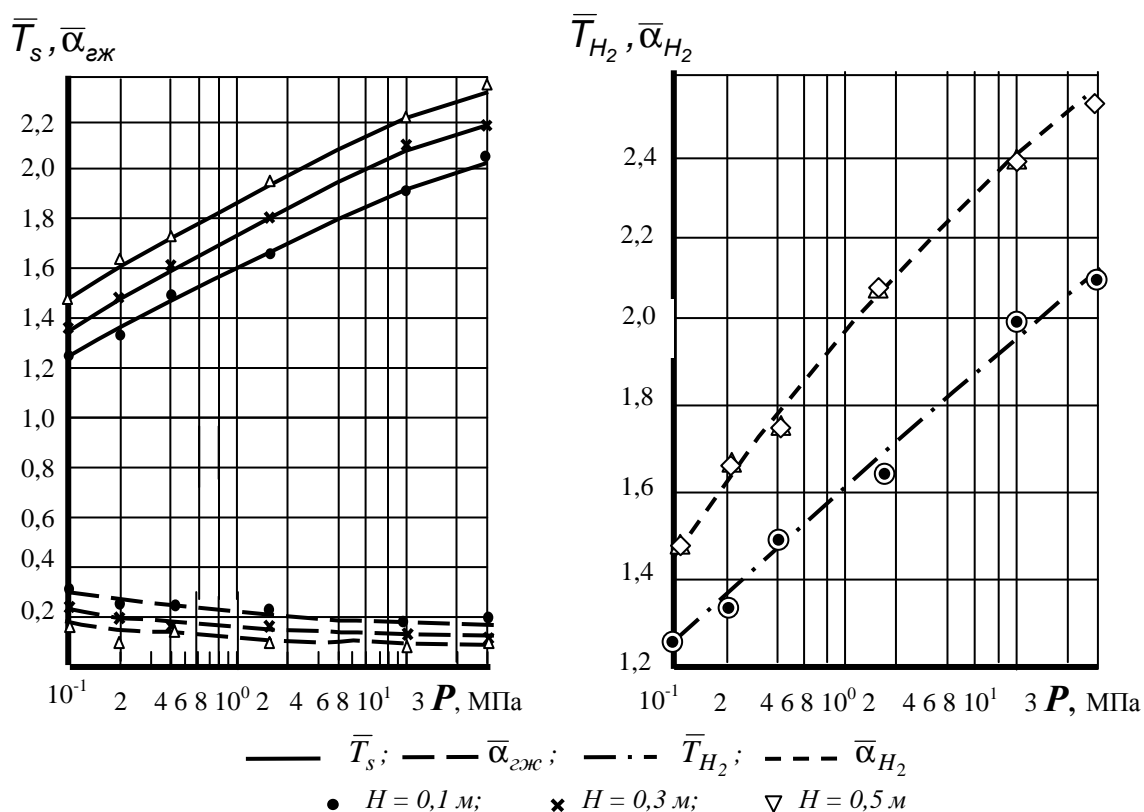


Рисунок 6 – Зависимости температуры поверхности цилиндра ГРВ, температуры генерируемого водорода и коэффициентов теплоотдачи поверхности цилиндра ГРВ в газожидкостную смесь и в водород от давления для $k_s = 0.588$ и $\bar{\tau} = 0,2$

– однако при достаточно высоких значениях k_s ухудшаются условия внешней диффузии воды к реакционной поверхности цилиндра ГРВ. В результате этого заметным становится влияние снижения скорости реакции, или скорости массоотдачи v_s , приводящее к уменьшению количества выделяющегося тепла с поверхности и снижению роста величины $\bar{\alpha}_{H_2}$, а значит и \bar{T}_{H_2} ;

– увеличение давления в реакционном объеме (рис. б), вызывает достаточно заметный рост температуры поверхности цилиндра и генерируемого водорода. При этом наблюдается также существенное увеличение коэффициента теплоотдачи от поверхности цилиндра к генерируемому водороду и незначительное снижение коэффициента теплоотдачи в газожидкостную смесь.

Результаты проведенных исследований позволяют дать некоторые рекомендации по применению протяженных цилиндрических зарядов ГРВ для обработки призабойной зоны газо-нефтеносных скважин. С целью получения «горячего» водорода с максимально возможной энтальпией, необходимо:

– использовать гидрореагирующие вещества, обладающие при реакции с водой или другими жидкими окислителями большим тепловым эффектом, высокой массоотдачей и скоростью массоотдачи по водороду;

– заряды ГРВ размещать в скважине на уровне обрабатываемой призабойной зоны или несколько ниже;

– диаметр цилиндрических зарядов по отношению к диаметру скважин выбирать достаточно большим, чтобы обеспечить коэффициент загрузки сечения скважины на уровне $k_s = 0,6 \dots 0,9$;

– обеспечить высокие давления (100–300 МПа) реакции гидролиза. Для выбранных типов ГРВ обработку рекомендовано проводить в заглушенной (заполненной до устья жидкостью глушения или водой) скважине, используя при этом гидростатическое давление столба жидкости.

Литература

1. Кравченко О.В. Новые технологии интенсификации добычи и переработки углеводородных энергоносителей / О.В. Кравченко // Современные достижения в науке и образовании: сб. трудов международного конф., Натания (Израиль), 9–17 сент. 2007. – С. 55–60.

2. Кравченко О.В. Обобщенная модель системы формирования процессов и технологий повышения эффективности добычи, переработки и использования углеводородных энергоносителей / О.В. Кравченко // Вестник НТУ ХПИ. – 2008. – № 1. – С. 63–77.

3. Щербина К.Г. Гидрореагирующие составы для внутрипластовой термохимической обработки нефтегазоконденсатных скважин / К.Г. Щербина // Вестник Харьковского университета. – 1998. – № 402. – С. 85–88.

4. Щербина К.Г. О возможности внутрипластового крекинг-пиролиза легких нефтей и конденсата / К.Г. Щербина, И.И. Рыбчич, Б.Б. Синюк и др. // International scientific and technical Conference. Mineral resources and Man, 17 – 19, IX, Varna – 2002. – Vol. 2. – С. 204–206.

5. Щербина К.Г. Хіміко-фізичні основи високотемпературного впливу на привибійну зону свердловини гідрореагуючими складами. Автореф. доктор. дис. Київ. – 1999. – 34 с.

6. Кравченко О.В. Обработка нефтеносных пород «горячим» водородом / О.В. Кравченко, К.Г. Щербина, В.Б. Пода, Д.В. Кузьмин // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2004. – № 4. – С. 14–19.

7. Аксельруд Г.А. Массообмен при химическом взаимодействии твердого тела с жидкостью, осложненный выделением газообразной фазы / Г. А. Аксельруд, А. И. Дубынин // Инж.-физ. журн. – 1972. – Т. 22, № 4. – С. 752–754.

8. Новиков С.П. Теплообмен при химическом взаимодействии твердого тела с жидкостью / С.П. Новиков, Озеров Е.С. // Теплофизика высок. температур. – 1983. – т. 21, № 2. – С. 326–329.

9. Аксельруд Г.А. Исследование химического кипения в области пузырькового режима / Г.А. Аксельруд, Я.М. Гумницкий, С. Маллик // Инж.-физ. журн. – 1987. – Т. 52, № 2. – С. 205–209.

10. Кириллов В.А. Тепломассоперенос при химическом кипении жидкостей / В.А. Кириллов, В.А. Кузьмин // Инж.-физ. журн. – 1987. – Т. 52, № 6. – С. 910–916.

11. Толубинский В.И. Теплообмен при кипении / Толубинский В.И.. – Киев: Наукова думка. 1980. – 315 с.

12. Калекин О.Ю. Исследование процесса газообразования в генераторах водорода на основе гидро-реагирующих веществ / О.Ю. Калекин, В.Б. Пода, В.И. Кривцова // Теплообмен-88: тез. докладов между-народ. конф. Минск: НИТМО, 1988. – С. 52–53.

13. Кривцова В.И. Влияние давления на процесс получения водорода при взаимодействии гидрореагирующих составов с водой / В.И. Кривцова // Проблемы машиностроения, 1992. – Вып. 37. – С. 109–113.

Bibliography (transliterated)

1. Kravchenko O.V. Novye tehnologii intensivatsii dobychi i pererabotki uglevodorodnykh jener-gonositelej / O.V. Kravchenko Sovremennye dostizhenija v nauke i obrazovanii: sb. trudov mezhduna-rod. konf., Nataniya (Izrail'), 9–17 sent. 2007. – p. 55–60.

2. Kravchenko O.V. Obobshhennaja model' sistemy formirovanija processov i tehnologij povyshenija jeffektivnosti dobychi, pererabotki i ispol'zovanija uglevodorodnykh jenergonositelej O.V. Kravchenko Vestnik NTU HPI. – 2008. – # 1. – p. 63–77.

3. Shherbina K.G. Hidroreagirujushhie sostavy dlja vnutriplastovoj termohimicheskoy obrabotki nef-tegazokondensatnykh skvazhin K.G. Shherbina Vestnik Har'kovskogo universiteta. – 1998. – # 402. – p. 85–88.

4. Shherbina K.G. O vozmozhnosti vnutriplastovogo kreking-piroliza legkih neftej i kondensata K.G. Shherbina, I.I. Rybchich, B.B. Sinjuk i dr. International scientific and technical Conference. Mineral resources and Man, 17 – 19, IX, Varna – 2002. – Vol. 2. – p. 204–206.

5. Shherbina K.G. Himiko-fizichni osnovi visokotemperaturnogo vplivu na privibijnu zonu sverdlovi-ni gidroreagujuchimi skladami. Avtoref. doktor. dis. Kiiv. – 1999. – 34 p.

6. Kravchenko O.V. Obrabotka neftenosnykh porod «gorjachim» vodorodom O.V. Kravchenko, K.G. Shherbina, V.B. Poda, D.V. Kuz'min Integrirovannye tehnologii i jenergosberezhenie. – 2004. – # 4. – p. 14–19.

7. Aksel'rud G.A. Massoobmen pri himicheskom vzaimodejstvii tverdogo tela s zhidkost'ju, oslozh-nennyj vydeleniem gazoobraznoj fazy G. A. Aksel'rud, A. I. Dubynin Inzh.-fiz. zhurn. – 1972. – T. 22, # 4. – p. 752–754.

8. Novikov S.P. Teploobmen pri himicheskom vzaimodejstvii tverdogo tela s zhidkost'ju S.P. Novikov, Ozerov E.S. Teplofizika vysok. temperatur. – 1983. – t. 21, # 2. – p. 326–329.

9. Aksel'rud G.A. Issledovanie himicheskogo kipenija v oblasti puzyr'kovogo rezhima G.A. Aksel'-rud, Ja.M. Gumnickij, S. Mallik Inzh.-fiz. zhurn. – 1987. – T. 52, # 2. –p. 205–209.

10. Kirillov V.A. Tepломассообмен при химическом кипении жидкостей V.A. Kirillov, V.A. Kuz'min Inzh.-fiz. zhurn. – 1987. – T. 52, # 6. – p. 910–916.

11. Tolubinskij V.I. Teploobmen pri kipenii Tolubinskij V.I.. – Kiev: Naukova dumka. 1980. – 315 p.

12. Kalekin O.Ju. Issledovanie processa gazoobrazovanija v generatorah vodoroda na osnove gidro-reagirujushhih veshhestv O.Ju. Kalekin, V.B. Poda, V.I. Krivcova Теплообмен-88: тез. докладов между-народ. конф. Минск: НИТМО, 1988. – p. 52–53.

13. Krivcova V.I. Vlijanie davlenija na process poluchenija vodoroda pri vzaimodejstvii gidrorea-girujushhih sostavov s vodoj V.I. Krivcova Problemy mashinostroenija, 1992. – Вып. 37. – p. 109–113.

УДК 66.015.23:661.96:622.276.6

Кравченко О.В., Велігоцький Д.О., Пода В.Б.

**ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОМАСООБМІНУ ПРИ ТЕРМОХІМІЧНІЙ ВОДНЕВІЙ
ОБРОБЦІ ПРИВИБІЙНОЇ ЗОНИ ПЛАСТА НАФТОВОЇ АБО ГАЗОВОЇ СВЕРДЛОВИНИ**

На основі узагальнення результатів теоретичних і експериментальних досліджень розроблено методи розрахунку теплових і масообмінних процесів при гідролізі твердих гідрореагуючих речовин у вигляді високого циліндра, який коаксіально занурюється в циліндричний реактор, отримані залежності показників теплообміну від кінетичних характеристик газоутворення, коефіцієнта завантаження пелетину генератора водню при тиску в реакційній зоні до 30 МПа.

Kravchenko O.V., Veligotskiy D.A., Poda V.B.

**ТЕПЛОМАСООБМЕН'S PHYSICAL MODELLING AT TO THERMOCHEMICAL HYDROGEN
PROCESSING OF A ZONE OF THE LAYER OF THE OIL OR GAS WELL BY PRIZABOYNA**

On basis of the results generalization of theoretical and experimental researches was made the method of calculation of heat and mass transfer processes in the hydrolysis of solid hydro-reactive substances in the form of high cylinder, which is immersed in a coaxial cylindrical reactor, dependence of heat and mass transfer from the kinetic characteristics of gas formation, the loading factor of the cross section of the hydrogen generator under the pressure up to 30 MPa in the reaction zone were obtained.