

УДК 66.015.23:661.96:622.276.6

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

ФІЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССООБМЕНА 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 пластины, 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 колыматация призабойной зоны скважины буровыми и цементировочными растворами. В период всего срока эксплуатации скважины происходит колыматация 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 требованиях генерирования водорода с максимально возможной энталпиией, т.е. реакция ГРВ с жидким окислителем

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

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 алюмогидриднатриевый 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 единицы 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_s и температуру генерируемого водорода T_{H_2} , определяющую его энтальпию. Важными показателями процесса теплообмена 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-

затели характеризуются температурой реакционной поверхности ГРВ T_s и соответствующими коэффициентами теплоотдачи $\alpha_{\text{сж}}$ и α_{H_2} .

В условиях протекания реакции гидрореагирующего вещества, представляющего собой протяженный вертикальный цилиндр, коаксиально размещенный в реакционном пространстве, к основным факторам, влияющим на показатели тепломассообмена в системе, следует отнести высоту цилиндра H и отношение начального значения его диаметра к внутреннему диаметру трубы. Данный фактор характеризует степень заполнения реакционного пространства и представлен как коэффициент загрузки поперечного сечения реакционной зоны с гидрореагирующим веществом k_s .

В связи с тем, что в ходе реакции с течением времени диаметр цилиндра ГРВ уменьшается, значение k_s постоянно изменяется, а, следовательно, изменяются и параметры тепломассообмена. Поэтому еще одним фактором, оказывающим заметное влияние на показатели тепломассообмена, является время реакции t или время срабатывания цилиндра.

И последним фактором, влияние которого на теплообменные процессы исследовалось в данной работе – это давление в реакционном объеме p . Ранее в работах [11–13] было показано, что величина давления оказывает заметное влияние на кинетику реакций, в частности, на диаметр пузырьков генерируемого водорода, что может существенно влиять на картину процесса тепломассообмена в целом.

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 тепломассообмена при реакции вертикального цилиндра ГРВ с водой проводились на стенде с открытым бассейном и на установках с сосудами высокого давления. В качестве исследуемых образцов были выбраны вертикальные цилиндры ГРВ (АГНК–50п/э и АГН) высотой 530 ± 16 мм, набранные из отдельных элементов диаметром 46 мм высотой 8...15 мм и имеющих центральное отверстие диаметром 10 мм. Последнее конструктивное решение позволяет осуществлять сборку отдельных элементов в протяженный вертикальный цилиндр заданной высоты.

Для изучения влияния коэффициента загрузки сечения k_s на тепломассообменные процессы, происходящие при гидролизе вертикального цилиндра 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 связи с технологическими ограничениями цилиндр из ГРВ изготавливается только одного диаметра, поэтому принято решение о варьировании диаметров модели эксплуатационной колонны. Для получения требуемых согласно принятому ортогональному центральному композиционному плану (ЦКП) эксперимента значений k_s внутренние диаметры цилиндров имели следующие значения: 80, 70, 65, 60, 55 и 50 мм. Крышка генераторов оборудована системой отбора водорода, обеспечивающей полное погружение в воду цилиндра ГРВ. Для снижения теплоотвода из внутренней полости генераторов в окружающую среду через его стенки, а также с целью возможности визуализации и кинофотографии 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 цилиндра ГРВ вдоль его высоты, газожидкостной смеси вблизи внутренней стенки модели, генерируемого водорода на выходе из модели и воды в бассейне измерялись при помощи хромель-копелевых термопар. Количество термопар, их месторасположение у поверхности цилиндра 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 цилиндрами ГРВ на основе композита АГНК–50 п/э была выявлена зависимость величины их массоотдачи от начального коэффициента загрузки сечения k_s (рис. 1).

На основе результатов экспериментов, проведенных в соответствии с составленным ортогональным ЦКП, получена зависимость полноты массоотдачи цилиндров ГРВ состава АГНК–50п/э от коэффициента загрузки сечения 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 массоотдачи цилиндров ГРВ состава АГНК–50п/э от коэффициента загрузки сечения генератора в аналитическом виде

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

K_p

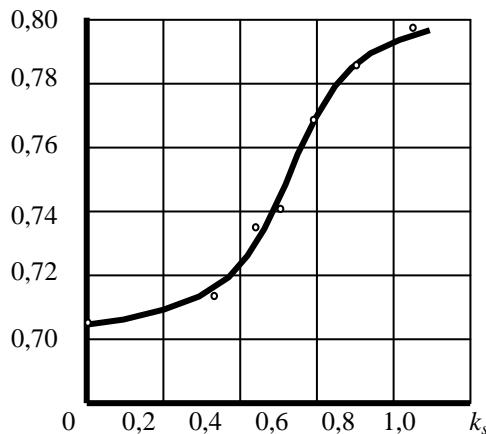


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента полноты массоотдачи ГРВ АГНК–50п/э от коэффициента загрузки сечения

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_a с использованием зависимости

$$v_s = V_{уд} \rho_3 v_a,$$

где $V_{уд}$ – экспериментально определенное удельное газовыделение с единицы массы ГРВ, $\text{м}^3/\text{кг}$; ρ_3 – плотность элементов ГРВ, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для элементов ГРВ из АГНК–50 п/э $V_{уд} = 0,76 \text{ м}^3/\text{кг}$ и $\rho_3 = 1,57 \text{ кг}/\text{м}^3$.

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/з:

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

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_o 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/з – $T_{so} = 328 \pm 7,2$ К и $\alpha_o = 162 \pm 6,5 \text{ кВт}/(\text{м}^2\text{К})$, для АГН – $T_{so} = 305 \pm 5,5$ К и $\alpha_o = 149 \pm 3,8 \text{ кВт}/(\text{м}^2\text{К})$.

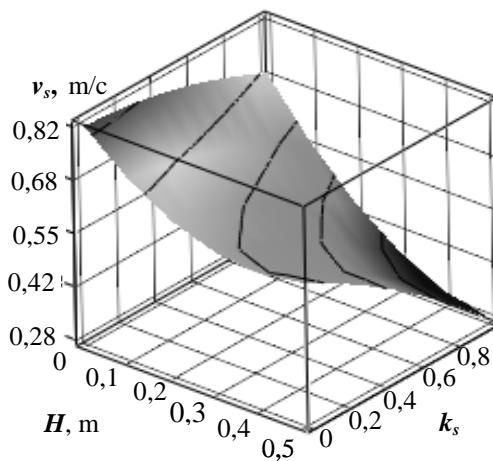


Рисунок 2 – Изменение скорости массоотдачи с поверхности цилиндра ГРВ из АГНК–50п/э вдоль его высоты и в зависимости от коэффициента загрузки сечения модели при $p = 0,1$ МПа

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 – $Q_{ph} = 9,81 \cdot 10^3$ кДж/м³, для образцов АГН – $Q_{ph} = 4,75 \cdot 10^3$ кДж/м³).

В качестве величины T при нахождении значений коэффициента теплоотдачи цилиндра ГРВ в объем газожидкостной смеси α_{ejk} принимались значения температуры газожидкостной смеси T_{ejk} , 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

$$\begin{aligned} \bar{T}_s(k_s, \bar{p}, \bar{\tau}, H) &= 1,768 - 0,124k_s + 4,72 \cdot 10^{-3}\bar{p} - 0,891\bar{\tau} - 1,828H + \\ &+ 0,593k_s^2 - 11,125 \cdot 10^{-6}\bar{p}^2 + 0,701\bar{\tau}^2 + 3,469H^2 + 0,693k_sH - 0,303\bar{\tau}H; \\ \bar{T}_{H_2}(k_s, \bar{p}, \bar{\tau}) &= 1,031 + 1,399k_s + 4,73 \cdot 10^{-3}\bar{p} - 0,821\bar{\tau} - 0,380k_s^2 - \\ &- 7,13 \cdot 10^{-6}\bar{p}^2 + 0,395\bar{\tau}^2 + 0,63 \cdot 10^{-3}k_s\bar{p} - 0,087k_s\bar{\tau} - 0,838 \cdot 10^{-3}\bar{p}\bar{\tau}; \\ \bar{\alpha}_{ejk}(k_s, \bar{p}, \bar{\tau}, H) &= 0,583 - 1,948k_s + 0,888\bar{\tau} + 1,065H + 1,376k_s^2 - \\ &- 1,691 \cdot 10^{-6}\bar{p}^2 - 0,434\bar{\tau}^2 - 2,296H^2 - 0,189 \cdot 10^{-3}k_s\bar{p} - 0,095k_s\bar{\tau} + \\ &+ 0,038k_sH + 0,276 \cdot 10^{-3}\bar{p}\bar{\tau} + 0,707 \cdot 10^{-3}\bar{p}H; \\ \bar{\alpha}_{H_2}(k_s, \bar{p}, \bar{\tau}) &= -0,503 + 4,635k_s + 6,224 \cdot 10^{-3}\bar{p} + 1,355\bar{\tau} - 2,55k_s^2 - \\ &- 11,5 \cdot 10^{-6}\bar{p}^2 - 1,46\bar{\tau}^2 + 0,397 \cdot 10^{-3}k_s\bar{p} + 1,184k_s\bar{\tau} - 1,503 \cdot 10^{-3}\bar{p}\bar{\tau}. \end{aligned}$$

На рис. 3–6 приведены графические зависимости параметров теплоотдачи от выбранных факторов при начальном давлении в реакционном объеме равном 0,1 МПа.

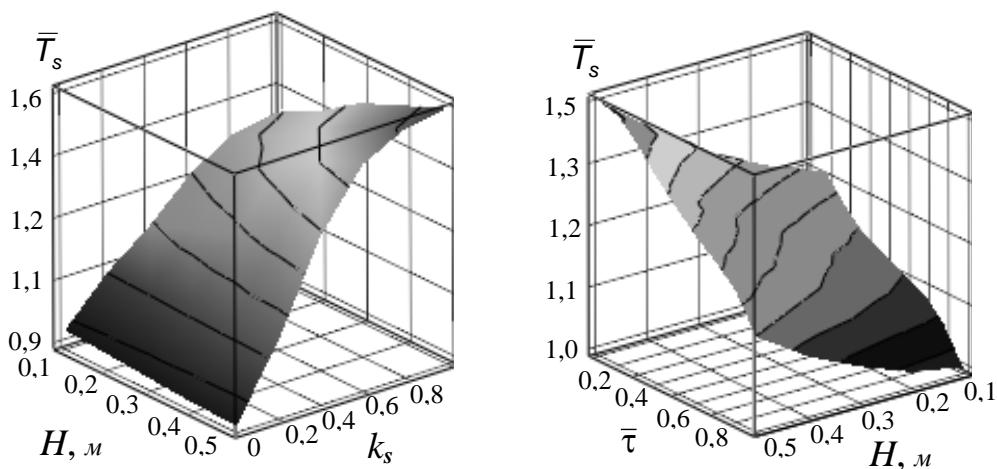


Рисунок 3 – Залежність відносичної температури реакційної поверхні вертикального циліндра ГРВ вдоль його висоти від коефіцієнта загрузки сечения в течію времени реакції

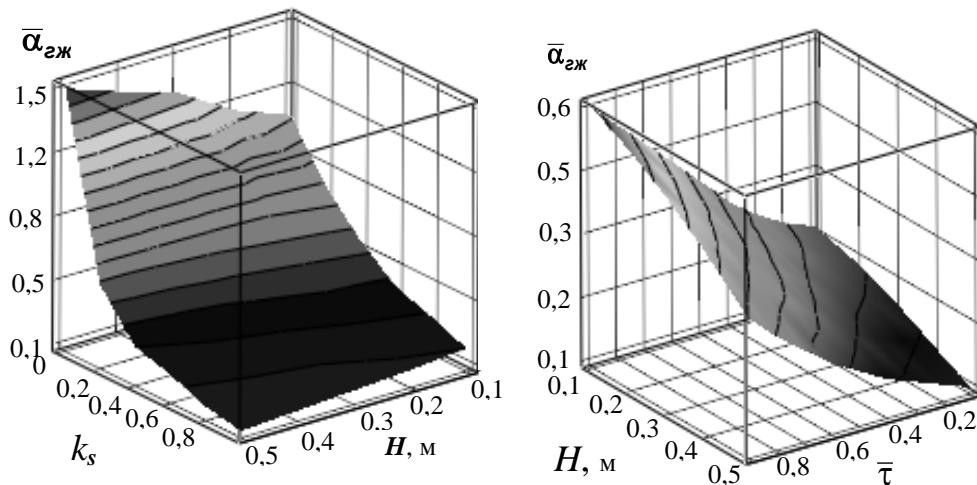


Рисунок 4 – Залежності коефіцієнтів теплоотдачі реакційної поверхні вертикального циліндра ГРВ в газожидкостну смесь вдоль його висоти від коефіцієнта загрузки сечения в течію времени реакції

Аналіз результатів даних досліджень позивав зробити наступні висновки та рекомендації:

– для циліндрів ГРВ, представляючи собою пресовані механіческі смесі алюмінію со щелочними металлами або їх гідридами, подібних АГНК-50п/Э, збільшення коефіцієнта загрузки сечения веде до зростання повноти маскоотдачі K_p по водороду (рис. 1);

– зменшення зазору між стінками реакційного об'єму та поверхнію циліндра ГРВ (збільшення коефіцієнта загрузки сечения k_s) викликає зниження швидкості маскоотдачі v_s циліндра по водороду вследство збільшення екранировання поверхні циліндра пузырьками видаляючимся в ході реакції водорода (рис. 2). По цій же причині спостерігається зменшення швидкості маскоотдачі по висоті циліндра;

– при реакції вертикального циліндра ГРВ в неограниченому об'ємі води ($k_s = 0$) температура його поверхні \bar{T}_s вдоль висоти незначно знижується (рис. 3). Збільшення k_s приводить до зростання температури поверхні циліндра з збільшенням його висоти та падінням коефіцієнта теплоотдачі в газожидкостну смесь. При цьому, чим більше значення k_s , тим більшою є залежність росту \bar{T}_s вдоль циліндра та відповідне падіння $\bar{\alpha}_{\text{гж}}$;

– з зменшенням свободного пространства навколо циліндра (збільшенням k_s) спостерігається зростання температури генеруемого водороду \bar{T}_{H_2} та інтегрального значення коефіцієнта теплоотдачі $\bar{\alpha}_{H_2}$ (рис. 5);

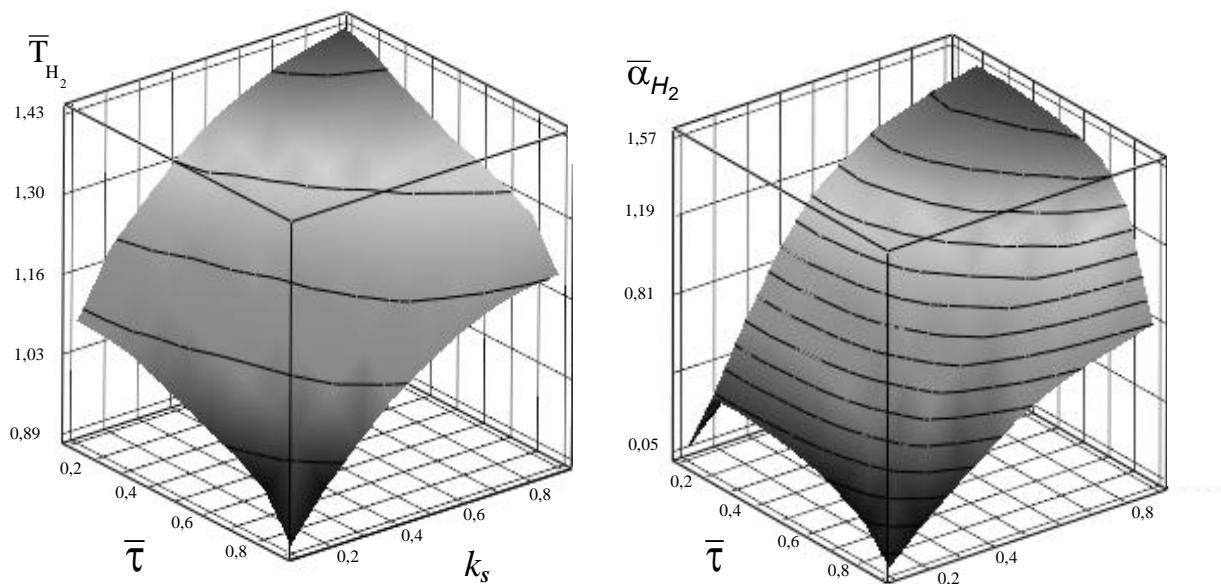


Рисунок 5 – Залежності відносительних величин температури генеруючого водороду і коефіцієнта теплоотдачі поверхні вертикального циліндра ГРВ до водороду від коефіцієнта загрузки поперечного сечения реакціонного об'єму в течію часу при $p = 0,1$ МПа

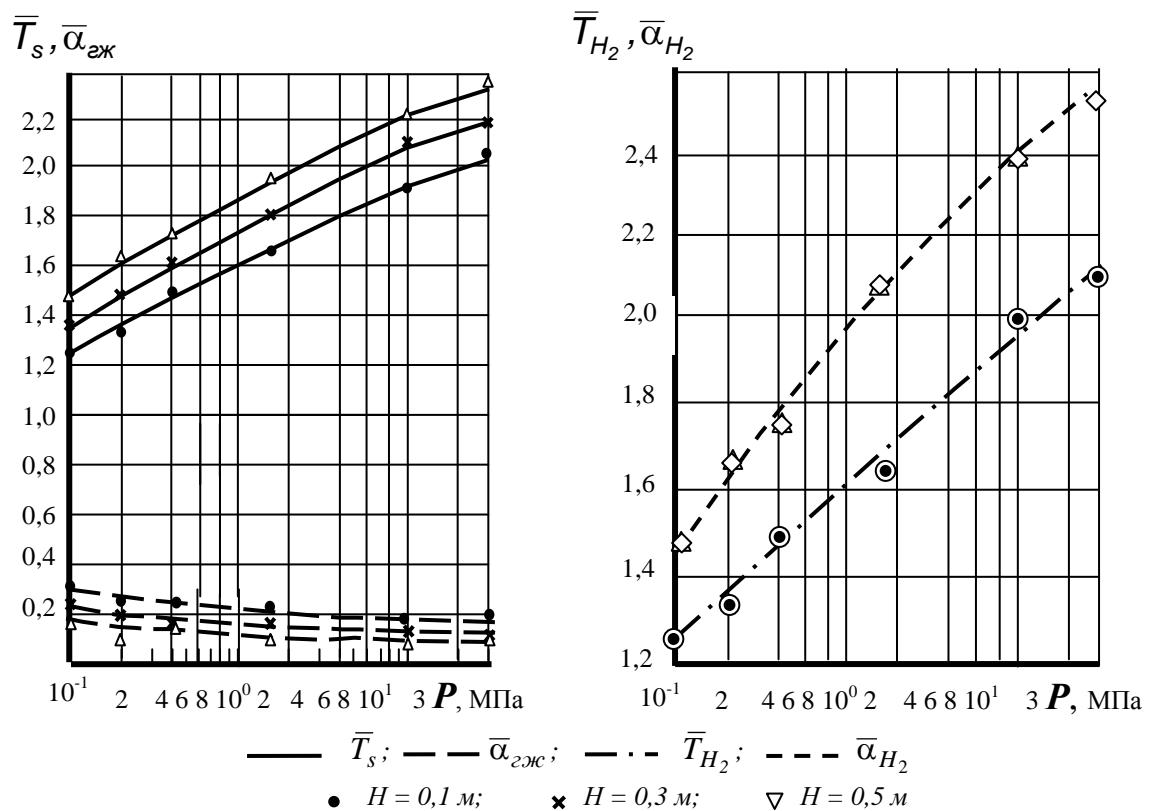


Рисунок 6 – Залежності температури поверхні циліндра ГРВ, температури генеруючого водороду і коефіцієнтів теплоотдачи поверхні циліндра ГРВ в газожидкостну смесь і в водород від тиску для $k_s = 0,588$ і $\bar{\tau} = 0,2$

– 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. 6), 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 массоотдачеи 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 глущения 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 международ. конф., Натаания (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. Рыбич, 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 привібійну зону свердловини гідрореагуючими складами. Автoref. 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 гидрореагирующих веществ / О.Ю. Калекин, В.Б. Пода, В.И. Кривцова // Теплообмен-88: тез. докладов международ. 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.

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 ПРИВІБІЙНОЇ ЗОНИ ПЛАСТА НАФТОВОЇ АБО ГАЗОВОЇ СВЕРДЛОВИНИ**

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

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

**TEPLOMASSOOBMEN'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.