

УДК 532:536
DOI 10.17223/19988621/66/7

А.В. Дмитриев, П.Н. Зятиков

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕД В УСЛОВИЯХ СЕПАРАЦИИ

Целью исследования является выявление особенностей и установление закономерностей эволюции локальных параметров и процессов конвективного тепло- и массообмена в нефтегазовых аппаратах (таких, как коэффициент динамической вязкости, диффузии, а также их безразмерных аналогов – чисел Прандтля, Шмидта и Льюиса), ориентированных на использование в качестве рабочего тела многокомпонентных углеводородных газовых сред в диапазоне термобарических условий, характерных для функционирования оборудования подготовки нефти при сепарации – $T \cong 273.1\text{--}363\text{ K}$ и $P \cong 0.1\text{--}3.5\text{ МПа}$.

Ключевые слова: коэффициенты переноса, многокомпонентная система, углеводороды, сепарация, моделирование.

Сепарация газа — процесс разделения твердой, жидкой и газовой фаз потока с последующим извлечением из него твердой и жидкой фаз. Сепарация газа предназначена для предохранения от попадания влаги и твердых частиц в промысловые газосборные сети и технологическое оборудование газовых и газоконденсатных месторождений.

В настоящее время проектирование, разработка и оптимизация работы технологического оборудования не обходится без численного моделирования многомерных и многофакторных процессов в конвективном и диффузионном тепло-массо-переносе, гидрогазодинамике, осложненных фазовыми переходами весьма чувствительными к изменению режима течений и структуры теплоносителей, интенсивности механизмов переноса скаляра (тепла, массы) и импульса, а также особенностям распределений теплофизических свойств в сопряженной термодинамической системе [1]. Это связано с прогрессом в исследовании инженерных задач нефтегазовой отрасли в рамках своих общих и полных постановок, опирающихся на привлечение законов сохранения массы индивидуальных компонентов (фаз) в смесях, энергии и импульса, а также в результате появления быстродействующих ПЭВМ и целого ряда программных продуктов, предназначенных для прогноза физико-химических явлений и механизмов в рабочих системах и технологических процессах. Ввиду этого, к точности прогнозирования тепло- и массообмена в сплошных гомогенных и гетерогенных системах предъявляются все более высокие требования. В частности, к методикам формулировок краевых условий для математических моделей в многокомпонентных газовых смесях. Для успешного численного интегрирования нелинейных дифференциальных уравнений и их замыкающих соотношений требуются корректные сведения о деталях поведения теплофизических свойств термодинамической системы (динамической вязкости, теплопроводности и диффузии), характеризующих интенсивности проте-

кания процессов переноса импульса, теплоты и массы [2]. Следует отметить, что ввиду широкого многообразия рабочих смесей газов в аппаратах экспериментальный подход в решении указанных задач сопряжен со значительными сложностями. И данные теоретического анализа закономерностей и эволюции пространственных распределений локальных и интегральных параметров функционирующих объектов, аппаратов и устройств нефтегазовой отрасли обретают чрезвычайную важность для практики.

Известно, что при определении коэффициентов переноса химически однородных веществ используются два подхода: феноменологический (принцип соответственных состояний) и статистический (молекулярно-кинетическая теория газов). Некоторые результаты сопоставления данных подходов при вычислении коэффициентов динамической вязкости и теплопроводности индивидуальных веществ были отражены в [3]. На их примере можно увидеть, что они выдают близкие между собой значения и находятся в хорошем согласии с экспериментом. Вместе с тем, в [3] продемонстрировано, что картина изменений указанных свойств многокомпонентных газовых смесей, полученных с помощью общепринятых методов Уилки [4] и Мэйсона – Саксены [5], качественно коррелирует с результатами, полученными в среде HYSYS. Необходимо отметить следующее: в отличие от коэффициентов динамической вязкости и теплопроводности вычисление коэффициента диффузии в многокомпонентных смесях требует индивидуального подхода к каждому случаю. Поэтому в последнее время проводится множество исследований, направленных на разработку новых методов определения коэффициента диффузии в газах [6–8]. Так, например, авторами [7, 8] проведены экспериментальные исследования диффузии в бинарных газовых смесях, в широком диапазоне изменений температуры и давления. Также в [6, 7] предлагаются новые методы определения коэффициентов бинарной диффузии в смесях. Отсюда следует вывод, что исследования диффузионного переноса массы в смесях далеки от завершения, в особенности для многокомпонентных систем. В практике известны два метода определения эффективного коэффициента диффузии в многокомпонентных газовых смесях – бинарная постановка задачи [9] и метод Уилки [10]. При бинарной постановке смесь разделяется на два псевдокомпонента по близким значениям молекулярной массы, после чего рассчитывается коэффициент диффузии по известным методам. В случае с методом Уилки коэффициент диффузии вычисляется для каждой отдельной компоненты смеси. Однако в случаях смесей с сильно различающимися по молекулярной массе компонентами использование обоих методов приводит к большим расхождениям с экспериментом. Поэтому оценка скорости диффузии в газах и поиск новых методов её определения является актуальным направлением исследования.

Учитывая вышесказанное, цель представленной работы – нахождение закономерностей изменения параметров процессов переноса (коэффициентов динамической вязкости, диффузии, чисел Прандтля, Шмидта и Льюиса) многокомпонентных углеводородных газовых сред в зависимости от термобарических условий сепарации, характерных для функционирования оборудования подготовки нефти – $T \cong 273.1\text{--}363 \text{ K}$ и $P \cong 0.1\text{--}3.5 \text{ МПа}$.

Последовательность численного моделирования

При решении тепло- и массообменных задач в сплошных средах широко используется метод подобия [11]. Анализ изучаемых процессов методом подобия подразумевает приведение уравнений, описывающих исследуемый процесс и соответствующих краевых (начальных и граничных) условий, к безразмерному виду. При всем этом количество новых безразмерных и постоянных величин, входящих в основные уравнения и краевые условия, могут оказаться меньше числа размерных величин, что значительно упрощает задачу. Так, при решении задач теплообмена искомой величиной является безразмерный коэффициент теплоотдачи – число Нуссельта (Nu), массообмена – безразмерный коэффициент массоотдачи – число Шервуда (Sc).

С достаточной для практики точностью указанные параметры определяются эмпирическими критериальными связями типа [11]

$$Nu = f(Re, Pr); \quad (1)$$

$$Sh = f(Re, Sc). \quad (2)$$

Здесь Re – число Рейнольдса, Pr – число Прандтля и Sc – число Шмидта.

Число Прандтля характеризует влияние свойств жидкости на интенсивность теплообмена, число Шмидта – относительную роль молекулярных процессов переноса количества движения и переноса массы примеси диффузией, число Льюиса – соотношение между интенсивностями переноса массы компонента диффузией и переноса теплоты.

Числа Прандтля, Шмидта и Льюиса ($Le = Pr/Sc$) являются физическими критериями подобия, независимыми от характера движения среды и определяют тройную аналогию процессов переноса в газах, характеризуя интенсивности между переносами теплоты, массы и импульса. В инженерной практике прикладных расчетов тепло- и массообмена в газах зачастую указанные числа принимают как $Pr = Sc = Le = 1$, что позволяет экстраполировать результаты вычислений одного процесса на другие [12]. Однако ни численно, ни экспериментально это не было подтверждено для многокомпонентных газовых смесей, а в литературе утверждается, что данные числа подобия могут изменяться в достаточно широком диапазоне значений [3]. Следовательно, выяснение распределения перечисленных параметров для многокомпонентных газовых сред является немаловажной задачей. Численное исследование зависимостей коэффициентов переноса и чисел подобия многокомпонентных углеводородных сред от температуры и давления с учётом изменения компонентного состава в термобарических условиях процесса сепарации, характерных для аппаратов подготовки нефти, проводилось в несколько этапов:

- моделирование процессов сепарации пластовых нефтей различных месторождений в указанном диапазоне изменений температур и давлений;
- расчет коэффициентов динамической вязкости углеводородных газовых смесей, полученных в результате моделирования сепарации пластовых нефтей;
- выявление зависимости коэффициента диффузии веществ от давления, предложение поправочного коэффициента;
- вычисление коэффициента диффузии в углеводородных средах, а также чисел подобия (Прандтля Pr , Шмидта Sc и Льюиса Le).

Достоверное прогнозирование процесса сепарации является важной частью исследования, поскольку коэффициенты переноса многокомпонентных газовых смесей сильно зависят от состава. Поэтому моделирование сепарации проводилось в программном пакете HYSYS с использованием в качестве термодинамической модели уравнения состояния Peng – Robinson [13, 14]. Ранее авторы [3] проводили сравнительный анализ некоторых имеющихся моделей пакета HYSYS в прогнозе покомпонентного разделения пластовой нефти, в результате чего подтвердили, что уравнение Пенга – Робинсона действительно выдаёт надежные результаты по сравнению с остальными моделями. Также заметим, что в [15] были получены числа подобия (Pr, Sc, Le) для двух вариантов газовых смесей при изменении термобарических условий сепарации и предложено использовать уравнение из кинетической теории газов [16], выражающее коэффициент диффузии вещества через коэффициент кинематической вязкости, соотношение интегралов столкновений для переноса импульса и массы, для определения осредненной скорости диффузии в смесях:

$$D_i = v_i \frac{6 \Omega_v}{5 \Omega_D}, \tag{3}$$

где D_i – коэффициент диффузии вещества, Ω_v , Ω_D – интегралы столкновений для переноса импульса и массы, соотношение которых для газов при умеренных давлениях приблизительно равно 1.1. Однако не было учтено влияние давления на соотношение Ω_v/Ω_D , так как оно является функцией температуры. Поэтому в данной работе предлагается уравнение, учитывающее давление, вида

$$\frac{\Omega_v}{\Omega_D} = 1.0665 - 0.0551P. \tag{4}$$

Здесь P – давление, МПа. В данном случае, число Шмидта не зависит от температуры, что вполне оправдано для чистых веществ и бинарных смесей газов, и с учетом (4)

$$Sc = \frac{5}{6}(1.0665 - 0.0551P)^{-1}. \tag{5}$$

Таким образом, при известных данных о коэффициентах динамической вязкости, плотности, коэффициентах кинематической вязкости (ν_i) и числе Шмидта (Sc) многокомпонентных газовых смесей ($CO_2-C_3H_8$, $CH_4-C_2H_6$, $N_2-C_2H_6$) при определенных термобарических условиях можем найти их коэффициенты диффузии. В целях верификации представленного метода сопоставлены результаты расчетов с экспериментальными данными для чистых веществ (табл. 1) и бинарных смесей (рис. 1).

Таблица 1

Давление P , МПа	$P = 0.82$ МПа	$P = 1.54$ МПа	$P = 2.62$ МПа
Число Шмидта Sc	0.81	0.83	0.89

На рис. 1 и 2 экспериментальная информация была позаимствована из [17, 18], при этом средняя относительная погрешность расчетных величин не превышает 3 %. Это позволяет утверждать, что предлагаемое поправочное уравнение (6) является вполне удовлетворительным в прогнозировании эффективного коэффициента диффузии в смесях.

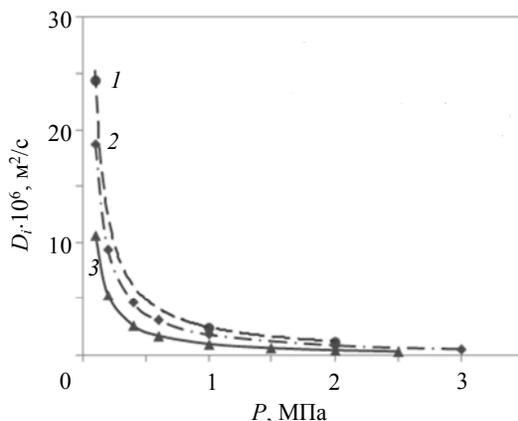


Рис. 1. Экспериментальные и расчетные значения эффективного коэффициента диффузии ($D_i \cdot 10^6$, m^2/c) бинарных смесей в зависимости от давления (P , МПа) при различных температурах: — — — расчетные значения при $T = 350$ К, — · — расчетные значения при $T = 340$ К, — — — расчетные значения при $T = 360$ К, ▲ — экспериментальные значения при $T = 350$ К, ◆ — экспериментальные значения при $T = 340$ К, ● — экспериментальные значения при $T = 360$ К. 1. Коэффициент диффузии при $P = 0.15$ МПа: 1 — $24.8 \cdot 10^6$ m^2/c ; 2 — $18.8 \cdot 10^6$ m^2/c ; 3 — $11.1 \cdot 10^6$ m^2/c

Fig. 1. Experimental and calculated values of the apparent diffusion coefficient ($D_i \cdot 10^6$, m^2/s) of binary mixtures as a function of pressure (P , МПа) at various temperatures: — — — calculated values at $T = 350$ К, — · — calculated values at $T = 340$ К, — — — calculated values at $T = 360$ К, ▲ — experimental values at $T = 350$ К, ◆ — experimental values at $T = 340$ К, ● — experimental values at $T = 360$ К. Diffusion coefficient at $P = 0.15$ МПа = (1) $24.8 \cdot 10^6$, (2) $18.8 \cdot 10^6$, and (3) $11.1 \cdot 10^6$ m^2/s

Результаты и их обсуждение

В качестве исходных данных при численном моделировании процессов сепарации углеводородных сред были выбраны компонентные составы Ямбургского и Медвежьего месторождений. Компонентные составы представлены в табл. 2.

Таблица 2

Месторождение	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	CO ₂	Относительная плотность
Ямбургское	88.65	4.31	1.59	0.81	2.34	0.27	0.91	0.716
Медвежье	97.92	0.15	0.09	-	-	1.1	0.2	0.567

Заметим, что содержание в смесях основного составляющего — метана, колеблется в пределах от 25.5 до 98.0 % (об.). В связи с этим, теплофизические свойства у каждой смеси в зависимости от T и P изменяться могут по-разному (рис. 2). Однако в отличие от свойств, числа подобия (Pr , Sc , Le) распределяются во всех случаях в достаточно узком диапазоне значений. Так, число Прандтля ограничивается нижним пределом 0.72 и верхним — 0.84, число Шмидта варьируется в пределах величин от 0.82 до 0.89, а число Льюиса — от 1.04 до 1.28 (рис. 3).

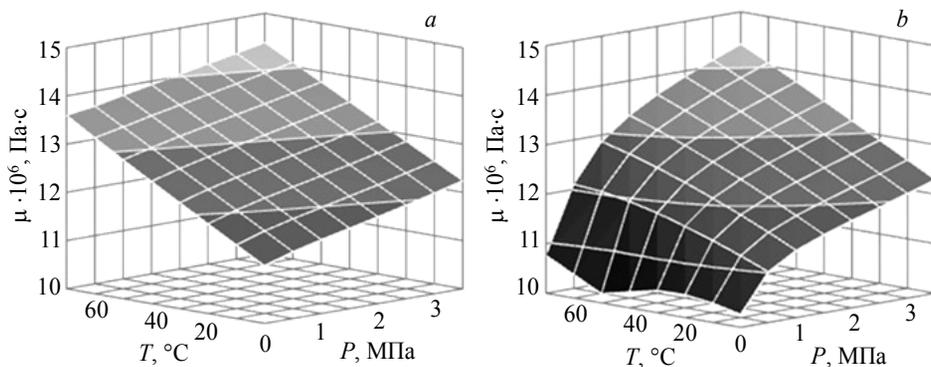


Рис. 2. Изменение коэффициента динамической вязкости ($\mu \cdot 10^6$, Па·с) в газовой смеси в зависимости от T , К и P , МПа сепарации пластовой нефти: а) Ямбургского месторождения; б) Медвежьего месторождения

Fig. 2. Variation of the dynamic viscosity coefficient ($\mu \cdot 10^6$, Pa·c) of a gas mixture as a function of temperature (T , K) and pressure (P , MPa) of crude oil separation: (a) Yamburgskoye Field and (b) Medvezhyye Field

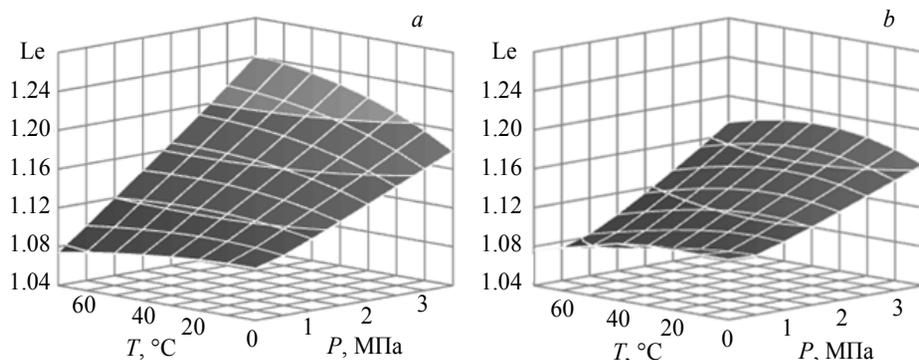


Рис. 3. Изменение числа Льюиса (Le) газовой смеси в зависимости от температуры (T , К) и давления (P , МПа) сепарации пластовой нефти: а – Ямбургского месторождения; б – Медвежьего месторождения

Fig. 3. Variation of the Lewis number (Le) of a gas mixture as a function of temperature (T , K) and pressure (P , MPa) of crude oil separation: (a) Yamburgskoye Field and (b) Medvezhyye Field

Вышеизложенное позволяет утверждать, что в многокомпонентных углеводородных газовых смесях, при дальнейшей сепарации в стандартных условиях (атмосферном давлении и температуре от 273.1 до 363 К) существует некоторое подобие процессов тепло- и массопереноса. Следовательно, функции в выражениях (1) и (2) принимают одинаковый вид, в связи с чем результаты расчета теплообмена могут быть применены для расчета массообмена. Кроме того, при сепарации в условиях давления 3.5 МПа имеем подобие процессов переноса импульса и массы, так как число Шмидта при указанном давлении находится ближе всего к единице ($Sc = 0.98$). В этом случае справедливо будет выразить число Шервуда как функцию одной переменной – числа Рейнольдса:

$$Sh = f(Re). \quad (6)$$

Заключение

Таким образом, проведенное исследование параметров процессов переноса в углеводородных газовых смесях в условиях сепарации в пределах рассматриваемых температур и давлений позволило обозначить границы применимости метода подобия и оценить степень отклонения безразмерных параметров, характеризующих аналогию процессов переноса, от единицы. Данные рекомендации полезны при расчетах тепло- и массообмена в сплошных средах не только в нефтегазовой промышленности, но и в химической, топливно-энергетической и т.д. Об этом свидетельствует использование критериальных связей типа (1) и (2) в самых различных инженерных расчетах: при оценке испарений нефти из резервуаров [19], при моделировании массопереноса в газовой фазе в скруббере Вентури [20], в практике научного приборостроения, а также в практике прикладного моделирования процессов горения [21]. Следует отметить, что до сих пор исследования характера массообмена в углеводородных средах далеки от завершения, в особенности при повышенных давлениях, о чём говорят современные работы [22–24].

Результаты проведенного исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Исследованы зависимости теплофизических свойств (коэффициента диффузии) углеводородных газовых смесей от термобарических условий с учётом изменения компонентного состава.

2. Установлено влияние давления на соотношение интегралов столкновений (соотношение этих интегралов равно 1.1) для переноса массы и переноса импульса и предложено поправочное уравнение для учёта параметра давления.

3. Впервые приведены и обобщены числа Прандтля $Pr \cong 0.72 \div 0.84$, Шмидта $Sc \cong 0.82 \div 0.89$ и Льюиса $Le \cong 1.04 \div 1.28$ для многокомпонентных углеводородных газовых сред в условиях сепарации пластовой нефти, определяющие характер тепло- и массообмена в открытых термодинамических системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I., Alginov R.A., Pavlov S.A.* Prospects of RANS models with multiparameter effects at simulation of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface // Proc. 6th International Forum on Strategic Technology. August 22–24, 2011, Harbin, China. IFOST 2011. V. 2. P. 787–791.
2. *Харламов С.Н., Сильвестров С.И., Зайковский В.В., Николаев Е.В.* О проблемах математического моделирования процессов переноса импульса, тепла и массы в углеводородных вязких средах в условиях сложного движения и тепло-массопереноса в трубопроводах // Вестник Российской Академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. 2017. Вып. 20. С. 67–89.
3. *Николаев Е.В., Харламов С.Н.* Исследование сепарационных процессов углеводородных многокомпонентных систем в режимах функционирования оборудования предварительной подготовки нефти // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 7. С. 84–89.
4. *Wilke C.R.* A Viscosity Equation for Gas Mixtures // J. Chemical Physics. 1950. V. 18. P. 517–519.
5. *Mason E.A., Saxena S.C.* Approximate formula for the thermal conductivity of gas mixtures // The Physics of Fluids. 1958. V. 1. P. 361–369.
6. *Lunev V.V.* New phenomenological model of multicomponent gas diffusion // Fluid Dynamics. 2017. V. 52. P. 454–462.
7. *Незовитина М.А.* Исследование зависимости коэффициентов взаимной диффузии углеводородных газов от давления при различных температурах: дис. ... канд. тех. наук. Смоленск, 2011. 189 с.

8. Zangi P., Rausch M.H., Fröba A.P. Binary diffusion coefficients for gas mixtures of propane with methane and carbon dioxide measured in a Loschmidt cell combined with holographic interferometry // *Int. J. Thermophysics*. 2019. V. 40. 17 p.
9. Турский Г.А. Определение эффективных коэффициентов диффузии в ламинарном многокомпонентном пограничном слое // *Докл. АН СССР*. 1964. Т. 155. № 6. С. 1278–1281.
10. Wilke C.R. Diffusional properties of multicomponent gases // *Chemical Engineering Progress*. 1950. V. 46. P. 95–104.
11. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М.: Энергия, 1967. 409 с.
12. Шарфарец Б.П. Обзор теории явлений переноса и поверхностных явлений применительно к решению некоторых задач научного приборостроения // *Научное приборостроение*. 2015. Т. 25. № 3. С. 45–64.
13. HYSYS Simulation Basis. Aspen Technology, Inc. 2005. 527 p.
14. Peng D.Y., Robinson D.B. A new two-constant equation of state // *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. 1976. V. 15. P. 59–64.
15. Николаев Е.В., Харламов С.Н. Особенности сепарации многокомпонентных углеводородных сред в режимах работы аппаратов подготовки нефти // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. № 3. С. 69–76.
16. Hirschfelder J.O., Curtis C.F., Bird R.B. *Molecular Theory of Gases and Liquids*. New York: John Wiley and Sons, 1954. 1219 p.
17. Варгафтик Н.Б. *Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей*. М.: Наука, 1972. 720 с.
18. Абиев Р.Ш., Бибик Е.Е., Власов Е.А., Ермаков Б.С. Новый справочник химика и технолога. Электродные процессы. Химическая кинетика и диффузия. Коллоидная химия. СПб.: Автономная некоммерческая организация, научно-просветительская организация «Профессионал», 2004. 838 с.
19. Любин Е.А., Коршак А.А. Критериальные уравнения массоотдачи при операциях с нефтями в вертикальных цилиндрических резервуарах // *Нефтегазовое дело*. 2010. № 2.
20. Ali M., Yan Ch., Sun Zh., Gu H., Wang J., Khurram M. Iodine removal efficiency in non-submerged and submerged self-priming venturi scrubber // *Nuclear Engineering and Technology*. 2013. V. 45. No. 45. P. 203–210.
21. Chen J., Yan L., Song W., Xu D. Effect of heat and mass transfer on the combustion stability in catalytic micro-combustors // *Applied Thermal Engineering*. 2018. V. 131. P. 750–765.
22. Carreon-Calderon B., Uribe-Vargas V. Thermomechanical Point of View of the Effect of Pressure and Free Volume on the Molecular Diffusion Coefficients // *J. Chemical and Engineering Data*. 2019. V. 64. P. 1956–1969.
23. Daniel A.B., Mohammad S.A., Miranda M.A., Aichele C.P. Absorption and desorption mass transfer rates as a function of pressure and mixing in a simple hydrocarbon system // *Chemical Engineering Research and Design*. 2019. V. 144. P. 209–215.
24. Рудяк В.Я., Лежнев Е.В., Любимов Д.Н. Имитационное моделирование коэффициентов переноса разреженных газов и наногазовзвесей // *Вестник Томского государственного университета*. 2019. Математика и механика. №. 59. С. 105–117.

Статья поступила 21.10.2019 г.

Dmitriev A.V, Zyatikov P.N. (2020) PATTERNS OF THE VARIATION OF PARAMETERS OF TRANSFER PROCESSES FOR MULTICOMPONENT HYDROCARBON GAS MEDIA UNDER SEPARATION. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 66. pp. 86–95

DOI 10.17223/19988621/66/7

Keywords: transfer coefficients, multicomponent system, hydrocarbons, separation, modeling.

A detailed study of the evolution of local and integral parameters of momentum, heat, and mass transfer processes in hydrocarbon gas mixtures under separation conditions at given

temperature and pressure values in working media is carried out within the framework of the principles of equilibrium thermodynamics using the Aspen HYSYS software package, namely, the Peng-Robinson equation of state for real gas mixtures, the principles of statistical mechanics, the approaches of corresponding states, the Chapman-Enskog and the Golubev methods, and the theory of similarity and dimensional analysis. The limits of similarity method applicability in quantitative estimates and qualitative forecasts of the mechanisms and configurations of convective heat and mass transfer in oil treatment units are established. The paper also discusses results of the analog method application in separation process modeling for momentum, heat and mass transfer processes in the problems of oil and gas industry. The conclusions about the aspects of property changes in complex mixtures and about heat and mass transfer intensity during separation, which violate a triple analogy in non-isothermal homogeneous and heterogeneous media, are recommended to take into account when designing real equipment.

Aleksandr V. DMITRIEV (Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: sanaexpert@mail.ru

Pavel N. ZYATIKOV (Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Oil and Gas Engineering of the School of Natural Resources, Tomsk, Russian Federation). E-mail: zpavel@tpu.ru

REFERENCES

1. Kharlamov S.N., Kim V.Yu., Silvestrov S.I., Alginov R.A., Pavlov S.A. (2011) Prospects of RANS models with multiparameter effects at simulation of complex non-isothermal flows of viscous media in devices with any configuration of surface. *Proceedings of the 6th International Forum on Strategic Technology, Harbin*. 2. pp. 787–791. DOI: 10.1109/IFOST.2011.6021139.
2. Kharlamov S.N., Silvestrov S.I., Zaykovskiy V.V., Nikolaev E.V. (2017) O problemakh matematicheskogo modelirovaniya protsessov perenosa impul'sa, tepla i massy v uglevodorodnykh vyazkikh sredakh v usloviyakh slozhnogo dvizheniya i teplomassoperenosa v truboprovodakh [On the problems of mathematical modeling of momentum, heat and mass transfer processes in viscous hydrocarbon media under conditions of complex motion and heat and mass transfer in pipelines]. *Vestnik Rossiyskoy Akademii estestvennykh nauk. Zapadno-Sibirskoe otdelenie*. 20. pp. 67–89.
3. Nikolaev E.V., Kharlamov S.N. (2016) Issledovanie separatsionnykh protsessov uglevodorodnykh mnogokomponentnykh sistem v rezhimakh funktsionirovaniya oborudovaniya predvaritel'noy podgotovki nefi [Study of separation processes for multicomponent hydrocarbon systems in operating modes of oil preliminary treatment equipment]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 327(7). pp. 84–99.
4. Wilke C.R. (1950) A viscosity equation for gas mixtures. *The Journal of Chemical Physics*. 18. pp. 517–519. DOI: 10.1063/1.1747673.
5. Mason E.A., Saxena S.C. (1958) Approximate formula for the thermal conductivity of gas mixtures. *The Physics of Fluids*. 1. pp. 361–369. DOI: 10.1063/1.1724352.
6. Lunev V.V. (2017) New phenomenological model of multicomponent gas diffusion. *Fluid Dynamics*. 52. pp. 454–462. DOI: 10.1134/S0015462817030139.
7. Nezovitina M.A. (2011) *Issledovanie zavisimosti koeffitsientov vzaimnoy diffuzii uglevodorodnykh gazov ot davleniya pri razlichnykh temperaturakh* [Study of the dependency of mutual diffusion coefficients of hydrocarbon gases on pressure at various temperature values]. Ph.D. thesis. Smolensk.
8. Zangi P., Rausch M.H., Fröba A.P. (2019) Binary diffusion coefficients for gas mixtures of propane with methane and carbon dioxide measured in a Loschmidt cell combined with holographic interferometry. *International Journal of Thermophysics*. 40. pp. 17. DOI: 10.1007/s10765-019-2484-6.

9. Tirskiy G.A. (1964) Opredelenie effektivnykh koeffitsientov diffuzii v laminarnom mnogokomponentnom pogranichnom sloe [Determination of apparent diffusion coefficients in a laminar multicomponent boundary layer]. *Doklady Akademii nauk*. 155(6). pp. 1278–1281.
10. Wilke C.R. (1950) Diffusional properties of multicomponent gases. *Chemical Engineering Progress*. 46. pp. 95–104. DOI: 10.1021/ie50483a022.
11. Petukhov B.S. (1967) *Teploobmen i sprotivlenie pri laminarnom techenii zhidkosti v trubakh* [Heat exchange and resistance in a laminar fluid flow in tubes]. Moscow: Energiya.
12. Sharfarets B.P. (2015) Obzor teorii yavleniy perenosa i poverkhnostnykh yavleniy primenitel'no k resheniyu nekotorykh zadach nauchnogo priborostroeniya [Review of the theory of transport phenomenon and surface phenomena as applied to the solution of some problems in scientific instrument-making industry]. *Nauchnoe priborostroenie*. 25(3). pp. 45–64.
13. HYSYS Simulation Basis (2005) *Aspen Technology, Inc.*
14. Peng D.Y., Robinson D.B. (1976) A new two-constant equation of state. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*. 15. pp. 59–64. DOI: 10.1021/i160057a011.
15. Nikolaev E.V., Kharlamov S.N. (2018) Osobennosti separatsii mnogokomponentnykh uglevodorodnykh sred v rezhimakh raboty apparatov podgotovki nefiti [Features of the separation of multicomponent hydrocarbon media in operating modes of oil preparation apparatus]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 329(3). pp. 69–76.
16. Hirshfelder J.O., Curtis C.F., Bird R.B. (1954) *Molecular Theory of Gases and Liquids*. New York: John Wiley and Sons.
17. Vargaftik N.B. (1972) *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostey* [Handbook of thermal and physical properties of gases]. Moscow: Nauka.
18. Abiev P.Sh., Bibik E.E., Vlasov E.A., Ermakov B.S. (2004) *Novyy spravochnik khimika i tekhnologa. Elektroodnye protsessy. Khimicheskaya kinetika i diffuziya. Kolloidnaya khimiya* [New handbook of chemist and technologist. Electrode processes. Chemical kinetics and diffusion. Colloid chemistry]. Saint Petersburg: Professional.
19. Lyubin E.A., Korshak A.A. (2010) Kriterial'nye uravneniya massootdachi pri operatsiyakh s neftyami v vertikal'nykh tsilindricheskikh rezervuarakh [Dimensionless equations of mass transfer when operating with oils in vertical cylindrical tanks]. *Neftegazovoe delo – Oil and Gas Business*. 2. pp. 1–11.
20. Ali M., Yan Ch., Sun Zh., Gu H., Wang J., Khurram M. (2013) Iodine removal efficiency in non-submerged and submerged self-priming Venturi scrubber. *Nuclear Engineering and Technology*. 45(2). pp. 203–210. DOI: 10.5516/NET.03.2012.047.
21. Chen J., Yan L., Song W., Xu D. (2018) Effect of heat and mass transfer on the combustion stability in catalytic micro-combustors. *Applied Thermal Engineering*. 131. pp. 750–765. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.12.059.
22. Carreon-Calderon B., Uribe-Vargas V. (2019) Thermomechanical point of view of the effect of pressure and free volume on the molecular diffusion coefficients. *Journal of Chemical and Engineering Data*. 64. pp. 1956–1969. DOI: 10.1021/acs.jced.8b00995.
23. Daniel A.B., Mohammad S.A., Miranda M.A., Aichele C.P. (2019) Absorption and desorption mass transfer rates as a function of pressure and mixing in a simple hydrocarbon system. *Chemical Engineering Research and Design*. 144. pp. 209–215. DOI: 10.1016/j.cherd.2019.02.009.
24. Rudyak V.Ya., Lezhnev E.V., Lyubimov D.N. (2019) Imitatsionnoe modelirovanie koeffitsientov perenosa razrezhennykh gazov i nanogazovzvesey [Simulation modeling of transport coefficients for rarefied gases and nanogas suspensions]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 59. pp. 105–117. DOI: 10.17223/19988621/59/11.