

СЕКЦИЯ 17. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТИРОВКИ  
И ХРАНЕНИЯ НЕФТИ И ГАЗА. ПОДСЕКЦИЯ 1. МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ТРАНСПОРТА И ХРАНЕНИЯ  
УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ ЧИСЛА ЛЬЮИСА ДЛЯ  
УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВЫХ СРЕД В ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ РЕЖИМАХ РАБОТЫ  
АППАРАТОВ ПОДГОТОВКИ НЕФТИ**

**Е.В. Николаев**

Научный руководитель профессор С.Н. Харламов

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

*Введение.* В любых технологических процессах, в том числе в процессе сепарации, необходимо знание параметров процессов переноса – теплофизических свойств среды. Получение этих свойств с помощью эксперимента затруднительно ввиду огромного разнообразия смесей. Поэтому задача вычисления теплофизических свойств газов и их смесей с достаточной для практики точностью является актуальной.

Существует два основных подхода (феноменологический и статистический) к вычислению таких свойств газовых сред, как вязкость, теплопроводность и диффузия. Феноменологический подход (принцип соответственных состояний) рассматривает вещество как сплошную среду и использует для его исследования макропараметры, такие, как температура, объем, давление. При статистическом подходе (кинетическая теория газов) вещество рассматривается как совокупность очень большого количества микрочастиц, о состоянии вещества судят по характеру их движения. Оба подхода могут быть использованы для описания одних и тех же физических явлений, они стоят рядом и дополняют друг друга.

Анализ библиографических данных [1–3] показывает, что при математическом моделировании процессов переноса в углеводородных средах большое внимание следует уделять определению безразмерных комплексов [числа Прандтля ( $Pr$ ), Шмидта ( $Sc$ ) и Льюиса ( $Le$ )], так как нередко с их помощью можно получить сведения об особенностях интенсивности процессов переноса, осложненных фазовыми превращениями, нелинейными изменениями теплофизических свойств и структурной нестабильностью компонентного состава. В частности, число Льюиса, характеризующее соотношение между интенсивностями переноса массы компонента диффузией и переноса теплоты теплопроводностью, появляется в задачах, в которых одновременно рассматриваются перенос массы и тепла. В силу дороговизны проведения экспериментальных работ по определению числа Льюиса в углеводородных средах для моделирования процессов переноса тепла и массы, представление данных об особенностях изменений данного числа является актуальным и практически значимым.

Учитывая вышесказанное, в настоящей работе поставлена цель – построение зависимостей числа Льюиса от термобарических условий ( $T \cong 0 \div 70^\circ\text{C}$ ,  $P \cong 0,1 \div 3,5$  МПа) для многокомпонентных углеводородных газовых сред в условиях сепарации.

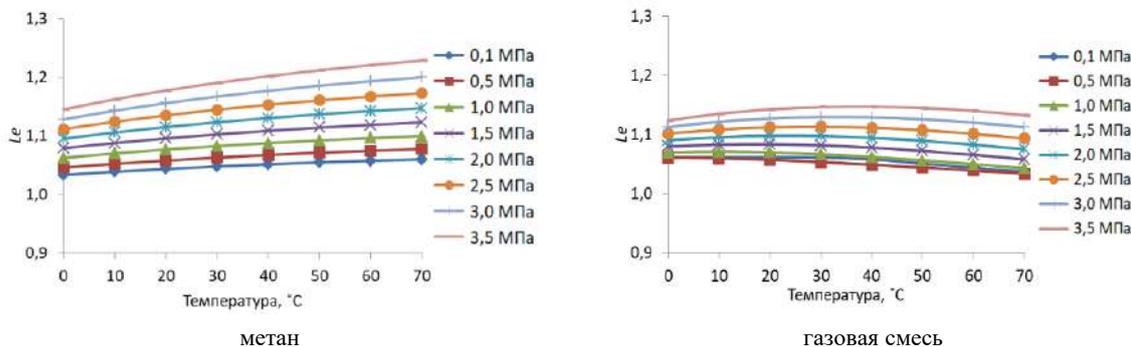
*Этапы моделирования процесса сепарации углеводородных сред и теплофизических свойств газовой фазы.* В программном комплексе Aspen Hysys производилось численное моделирование двухфазного сепаратора. В качестве термодинамической модели выбрали уравнение состояния Пенга-Робинсона [4], в связи с тем, что оно даёт наиболее надежные и точные результаты [5–7] в широком диапазоне термобарических условий. Согласно цели работы произведено численное моделирование процесса сепарации для 5 различных компонентных составов пластовой нефти в указанных термобарических условиях, фиксируя изменения компонентных составов газовых фаз для всех 5 случаев в зависимости от температуры и давления.

Для 5 различных компонентных составов пластовой нефти определили теплофизические свойства (теплоемкость, теплопроводность, вязкость и др.) выходящего потока газовой фазы, также зафиксировали изменения в зависимости от термобарических условий. Подходы к вычислению теплофизических свойств и сопоставление с экспериментальной информацией мы проводили в предыдущих работах [7, 8]. Согласно молекулярно-кинетической теории газов, явление самодиффузии вещества связано с его вязкостью и плотностью следующим соотношением:

$$D_{ii} = \frac{6}{5} \mu_i \frac{RT}{M_i P} \frac{\Omega_v}{\Omega_D} = \frac{6}{5} \frac{\mu_i}{\rho_i} \frac{\Omega_v}{\Omega_D} \quad (1)$$

Здесь  $D_{ii}$  – коэффициент самодиффузии, м<sup>2</sup>/с;  $\rho_i$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_i$  – коэффициент динамической вязкости, Па·с;  $M_i$  – молекулярная масса;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $\Omega_v$ ,  $\Omega_D$  – интегралы столкновений для переноса импульса и массы, соответственно. Соотношение интегралов столкновений  $\Omega_v/\Omega_D$  является слабой функцией характеристической температуры  $T_i^* = kT/\varepsilon_i$  (здесь  $k$  – постоянная Больцмана, эрг/К;  $\varepsilon_i/k$  – параметр потенциальной функции межмолекулярного взаимодействия, К) и приблизительно равно 1,1 в области умеренных давлений. Пользуясь уравнением (1), мы предлагаем найти коэффициенты самодиффузии для многокомпонентной углеводородной газовой смеси, которые будут характеризовать среднюю скорость диффузии смеси в целом. В целях верификации, мы сопоставили экспериментальные данные с результатами наших расчетов с применением уравнения (2) для бинарных систем  $\text{CH}_4\text{--C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{CO}_2\text{--C}_3\text{H}_8$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6\text{--N}_2$ ,  $\text{CH}_4\text{--CO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6\text{--C}_3\text{H}_8$ . Средняя относительная погрешность не превышает 7% за исключением случаев при повышенных давлениях (более 1 МПа). С возрастанием давления наблюдается увеличение расхождения расчетных величин от эксперимента (местами относительная погрешность составляла 30%). Это связано с тем, что соотношение интегралов столкновений в уравнении (1) значительно отклоняется от величины 1,1. В связи с этим, аппроксимируя экспериментальные данные, внесли коррективы в определении соотношения интегралов столкновений в уравнении (1), после чего, средняя относительная погрешность снизилась до 3%.

*Результаты и их обсуждение.* Ниже представлены графические данные изменений числа Льюиса углеводородной газовой смеси и метана, вычисленных по известным соотношениям теплофизических свойств, в зависимости от температуры при различных давлениях (см. рис.).



**Рис.1** Зависимость изменения числа Льюиса  $Le$  для метана и газовой смеси от температуры при различных давлениях

Из рисунка видим, что кривые числа Льюиса для многокомпонентной смеси при давлениях 0,1, 0,5 и 1,0 МПа сгруппировались и практически совпадают, а в случае с метаном распределение более равномерное, при этом больше всего число Льюиса близко к единице при атмосферном давлении. Стоит отметить, что во всех случаях многокомпонентных углеводородных смесей число Льюиса распределяется в пределах значений от 1,00 до 1,23. В какой-то мере это оправдывает теорию Шваба и Зельдовича [9].

*Заключение.* Предложен метод оценки средней скорости диффузии в многокомпонентных углеводородных газовых смесях с использованием соотношения для вычисления коэффициента самодиффузии вещества через его плотность и вязкость из молекулярно-кинетической теории. Установлено влияние давления на соотношение интегралов столкновений для переноса массы и переноса импульса и предложено выражение для учёта параметра давления. Приведены результаты оценки коэффициентов переноса (динамической вязкости, теплопроводности и диффузии) и числа Льюиса для многокомпонентных углеводородных сред в термобарических условиях процесса сепарации, характерных для функционирования аппаратов подготовки нефти в сопоставлении с коэффициентами переноса чистого метана.

#### Литература

1. Брусиловский А.И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. – М.: «Грааль». – 2002. – 572 с.
2. Александров И.А. Массопередача при ректификации и абсорбции многокомпонентных смесей. – М.: Химия, 1975. – 320 с.
3. Hirshfelder J.O., Curtiss C.F., Bird R.B. Molecular Theory of Gases and Liquids. New York: John Wiley and Sons, 1954. – 1219 p.
4. Peng D.Y., Robinson D.B. A new two-constant equation of state // Ind. Eng. Chem. Fundam, 1976. – V. 15. – P. 59–64.
5. Kylling O.W. Optimizing separator pressure in a multistage crude oil production plan: M. Sc. Diss. Trondheim, 2009. – 76 p.
6. Фаловский В.И., Хорошев А.С., Шахов В.Г. Современный подход к моделированию фазовых превращений углеводородных систем с помощью уравнения состояния Пенга-Робинсона // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011. – Т. 13. – № 3. – С. 120–125.
7. Nikolayev E.V., Kharlamov S.N. Separation Features in Hydrocarbon Media at Thermobaric Regimes of Petroleum Preparation Devices Functioning // Key Engineering Materials, 2017. – V. 743. – P. 373–377.
8. 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. 84–99.
9. Вильямс Ф.А. Теория горения. – М. Наука, 1971. – 616 с.

### АНАЛИЗ ПРОМЫСЛОВОЙ ПОДГОТОВКИ ГАЗА К ТРАНСПОРТУ ПО ТЕХНОЛОГИИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕПАРАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ АГРЕГАТОВ

В.О. Патракеев, И.Е. Гаврилов

Научный руководитель профессор С.Н. Харламов

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия*

На территории Российской Федерации сосредоточены более 30% мировых запасов газа. Газодобывающая отрасль в России ежегодно развивается. К 2025 году запланировано увеличение объемов добываемого газа в 2 раза, наибольший вклад в добычу природного газа вносят районы Крайнего Севера и районы, приравненные к ним [1]. Важной задачей в условиях Крайнего Севера после добычи природного газа является его подготовка. На большей части газоконденсатных промыслах, подготовка газа осуществляется на установке комплексной подготовки газа путем низкотемпературной сепарации [2]. Процесс подготовки газа, с