

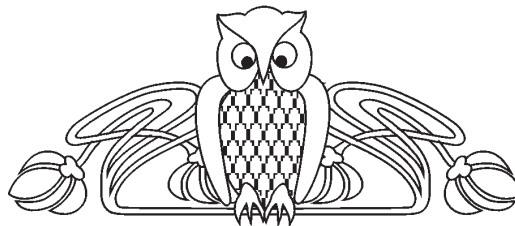


УДК 544.344.2.032.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ РАСТВОРИМОСТИ ГЕЛИЯ В ПРОПАН-2-ОЛЕ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 360, 420 И 480 К

П. А. Николайчук, М. Линнеманн, Э. Баумхёггер, Я. Врабец

Падерборнский университет, Германия
E-mail: nra@mail.uni-paderborn.de



Произведено экспериментальное изучение растворимости гелия в пропан-2-оле при высоких давлениях и температурах. Получены следующие значения констант Генри для раствора гелия в пропан-2-оле: $168,7 \pm 6,3$ МПа при 480 К, $341,2 \pm 13,6$ МПа при 420 К и $602,0 \pm 43,5$ МПа при 360 К.

Ключевые слова: химическая термодинамика, бинарные системы, равновесие жидкость – пар, константа Генри, гелий, пропан-2-ол, высокие температуры.

The Experimental Study of Solubility of Helium in Propan-2-ol at Temperatures 360, 420 and 480 K

P. A. Nikolaychuk, M. Linnemann,
E. Baumhögger, J. Vrabec

The experimental study of solubility of helium in propan-2-ol at high pressures and temperatures was performed. The following values of Henry's law constants for the solution of helium in propan-2-ol were obtained: $168,7 \pm 6,3$ MPa at 480 K, $341,2 \pm 13,6$ MPa at 420 K and $602,0 \pm 43,5$ MPa at 360 K.

Key words: chemical thermodynamics, binary systems, vapour – liquid equilibrium, Henry's law constant, helium, propan-2-ol, high temperatures.

DOI: 10.18500/1816-9775-2017-17-2-155-162

Введение

Исследование парожидкостных фазовых равновесий и построение фазовых диаграмм является не только фундаментальной проблемой, но также и задачей, важной для химической технологии и химической промышленности [1]. Знание фазовых равновесий необходимо для понимания и разработки процессов разделения фаз, таких как дистилляция или газофазная экстракция, которые широко используются в геохимии, металлургии, получении чистых веществ, фармацевтике и в других областях [2]. Однако к настоящему времени процессы сбора и систематизации термофизических данных подобного рода даже для простых бинарных систем далеки от завершения.

Благородные газы находят широкое применение в медицине, химии окружающей среды и производстве осветителей. Несмотря на то что растворимость и фазовые равновесия благородных газов в воде и некоторых органических

растворителях изучены весьма подробно [3], существует множество бинарных систем, для которых в литературе до сих пор приведены лишь отрывочные данные. Одной из таких систем является бинарная система «гелий – пропан-2-ол», для которой константа Генри измерена лишь при комнатной температуре [4, 5]. Целью настоящей работы является экспериментальное определение констант Генри для гелия в пропан-2-оле при повышенных температурах.

1. Экспериментальная часть

1.1. Описание экспериментальной установки для изучения парожидкостных фазовых равновесий

Схема экспериментальной установки для измерения растворимости газов в жидкостях [6] показана на рис. 1, а её внешний вид – на рис. 2. Её основной частью является цилиндрическая ячейка **A**, сконструированная из нержавеющей стали *V4a* и способная выдерживать температуры до 600 К и давления до 70 МПа. Внутренний объём ячейки составляет 14,85 мл. Внутрь ячейки помещена магнитная мешалка. Для визуального наблюдения за процессом разделения фаз, ячейка снабжена сапфировыми водомерными стёклами **B** на обоих торцах цилиндра. У одного из торцов устанавливается лампа накаливания, а у другого – эндоскоп **K**, изображение с которого через адаптер SCART-SVHS выводится на экран телевизора. Части ячейки скреплены при помощи восьми клиновых анкеров с семью пружинами наружного кольца, помещёнными на каждый из них. Ячейка встроена в медный цилиндр **D** с электрическим подогревом **C**, таким образом, возможен эффективный автоматический контроль температуры. Для предотвращения потери тепла в связи с излучением поверх медного цилиндра **D** помещается алюминиевый цилиндр **E** с собственным электрическим подогревом. Вся установка помещается в вакуумируемую камеру **F** для уменьшения потери тепла в связи с конвекцией и для предотвращения коррозии её частей.

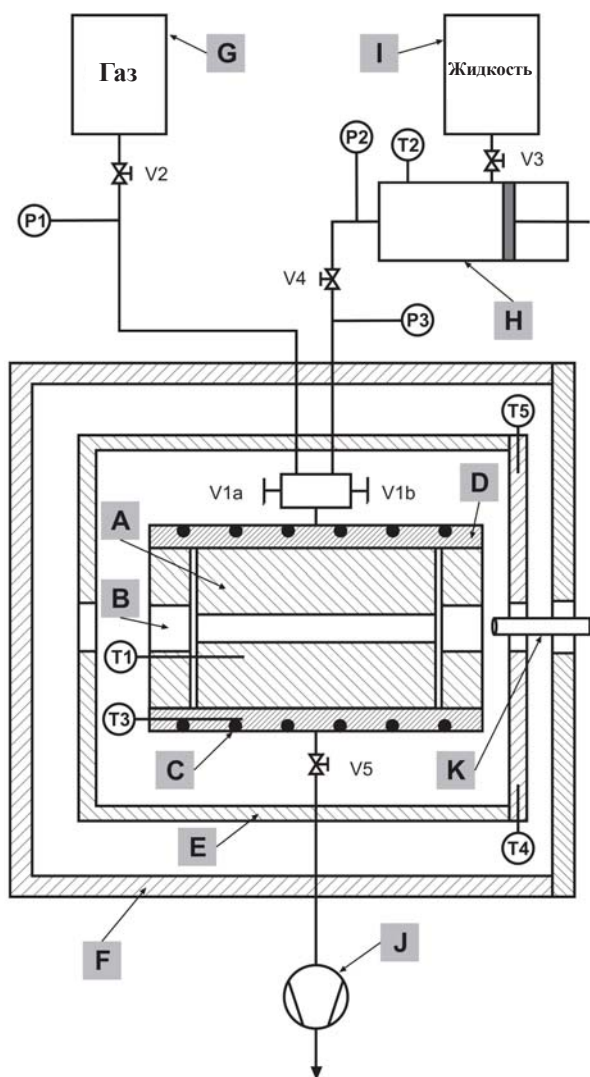


Рис. 1. Схема установки для измерения растворимости газов в жидкостях при высоких температурах: А – ячейка для измерений, В – водомерное стекло, С – электрический нагреватель, D – медный цилиндр, E – алюминиевый цилиндр, F – вакуумируемая камера, G – ёмкость с газом, H – ёмкость для подачи жидкости в ячейку, снабжённая шпиндельным прессом высокого давления, I – резервуар с жидкостью, J – вакуумный насос, K – эндоскоп, V1, V2, V3, V4, V5 – клапаны, T1, T2, T3, T4, T5 – термометры сопротивления, P1, P2, P3 – датчики для измерения давления

Для загрузки ячейки используется вмонтированный в её верхнюю часть трёхходовой клапан V1. Ёмкость с газом G присоединена к его левому входу V1a, служащему для загрузки газообразного компонента. Жидкий компонент вводится в ячейку через снабжённую шпиндельным прессом ёмкость высокого давления H, объёмом 48 мл, присоединённую к правому входу клапана (V1b). Шпиндельный пресс содержит шкалу, откалиброванную в числе оборотов вала

от начального положения, проход прессом всего объёма ёмкости достигается за 160,75 оборотов вала. Ёмкость для подачи жидкости в ячейку H соединена с резервуаром для хранения жидкости I посредством вентиля V3. Вентили V2 и V4 носят вспомогательный характер, в то время как вентиль V5 служит для очищения ячейки, а также для соединения с вакуумным насосом J. Датчики давления P1 и P2 используются для измерения давления газообразного и жидкого компонентов во вспомогательных трубках во время загрузки ячейки. Давление в ячейке определяется датчиком P3, измерение возможно даже при закрытом клапане V4. Погрешность всех используемых датчиков давления (модель Super TJE, Honeywell test & measurement) не превышает 0,1% от их соответствующей шкалы измерения, которая составляет 20, 100 и 70 МПа для P1, P2 и P3 соответственно. Для измерения температуры используются пять калиброванных платиновых термометров сопротивления с базовым сопротивлением 100 Ом (Pt100). Таким образом, температуры флюидов в ячейке и в ёмкости для подачи жидкости измеряются с помощью термометров T1 и T2 соответственно. Температура внутри алюминиевого цилиндра определяется термометром T4. Термометры T3 и T5 используются исключительно для контроля температуры ячейки и алюминиевого цилиндра соответственно. Для калибровки термометров использовались более чувствительные термометры с базовым сопротивлением 25 Ом. Погрешность в измерении температур составляет $\pm 0,04$ К. Специальное программное обеспечение позволяет выводить показания всех датчиков давления и термометров на персональный компьютер и в режиме реального времени отслеживать их изменение в текстовом и графическом форматах.

1.2. Исходные вещества

Для измерений были использованы гелий (номер CAS 7440-59-7), поставляемый фирмой Air Liquide в баллоне под давлением 300 бар, чистотой 99,9996% и пропан-2-ол (номер CAS 67-63-0), поставляемый фирмой Honeywell, чистотой > 99,9%.

1.3. Проведение измерений

Перед загрузкой компонентов смеси в ячейку вся установка, включая все вспомогательные трубки, очищается с помощью вакуумного насоса и термостатируется при температуре 30 °С. Затем в ячейку A из баллона G вводится гелий путём открытия клапана V1a, и фиксируются его исходные температура (T_{He}) и давление (p_{He}) после

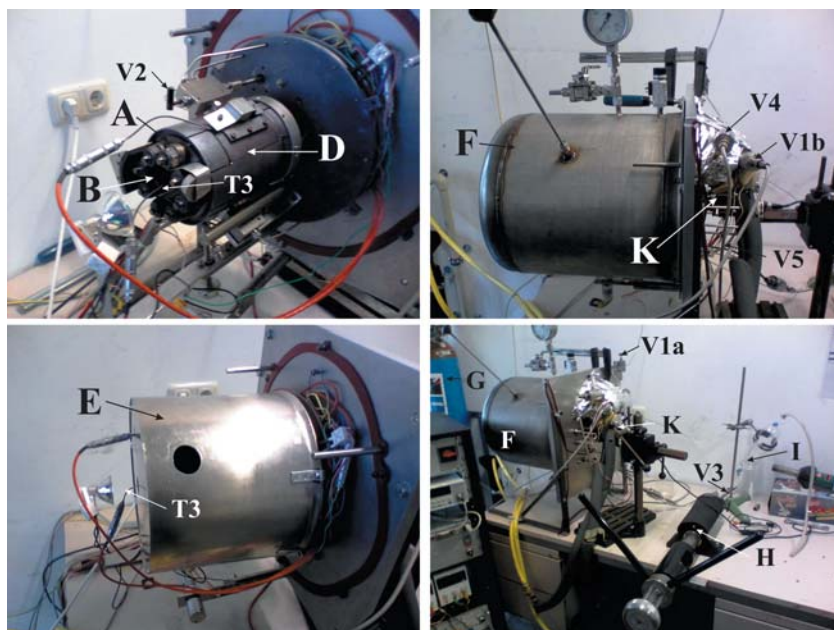
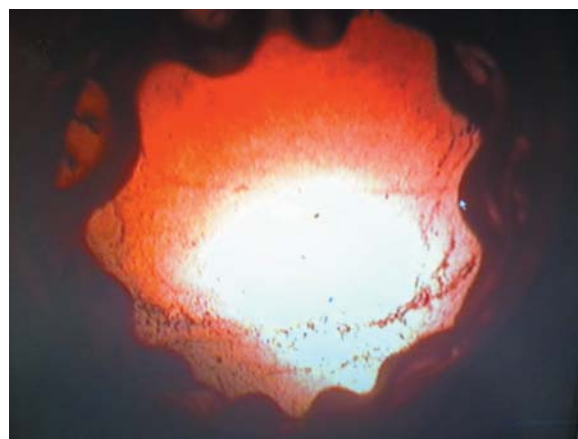


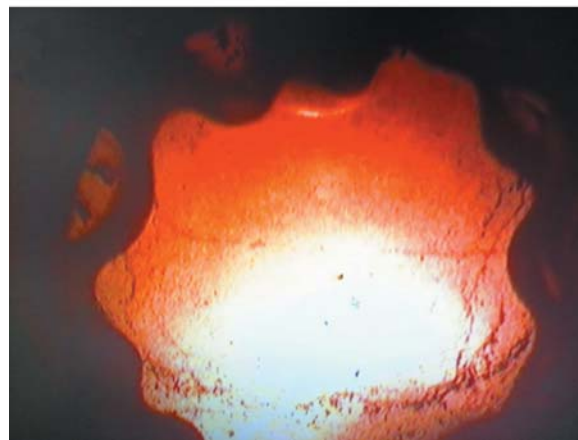
Рис. 2. Внешний вид установки для измерения растворимости газов в жидкостях при высоких температурах. Обозначения см. на рис. 1

того, как они примут постоянные значения. Затем пропан-2-ол, помещённый в резервуар для жидкости **I**, подвергается вакуумированию в течение 10 мин для удаления возможных растворённых в нём газов, после чего путём открытия клапана **V3** загружается в ёмкость для подачи жидкости в ячейку **H**. В ней при помощи шпиндельного пресса устанавливается давление порядка 25 бар, и после стабилизации давления и температуры фиксируются исходные значения $T_{2-проп.}^0$ и $p_{2-проп.}^0$, а также исходное число оборотов вала шпиндельного пресса z^0 . Ячейка **A** вместе с медным и алюминиевым цилиндрами (**D**, **E**) нагревается до температуры, превышающей температуру, при которой планируется измерение ($T_{изм.}$), на 20 К, после чего приводится в действие магнитная мешалка, и путём открытия клапана **V1b** и при помощи шпиндельного пресса в ячейку вводится пропан-2-ол. Процесс смешения визуально контролируется с помощью эндоскопа **K**, и он завершается при исчезновении всех пузырьков газа. В этот момент весь газ растворён в жидкости, и система находится в гомогенном состоянии (рис. 3, *a*).

Следующим этапом является медленное охлаждение ячейки до желаемой температуры с целью выделения газа из раствора. Однако обычно образование насыщенного раствора точно при желаемой температуре не достигается с первого раза, поэтому необходимо произвести несколько итераций по следующей схеме. Во время



a



b

Рис. 3. Вид из измерительной ячейки: *a* – система находится в состоянии гомогенного равновесия; *b* – момент начала образования насыщенного пара



охлаждения давление смеси измеряется датчиком **РЗ**, и программой строится график зависимости давления от времени. В некоторый момент времени при определённой температуре образуются маленькие пузырьки газа, и наклон зависимости давления от времени относительно оси абсцисс резко и существенно изменяется. В этот момент смесь достигает равновесия жидкости со своим насыщенным паром (см. рис. 3, *b*). Если температура, при которой произошло насыщение, близка к желаемой температуре $T_{\text{изм.}}$, то измеренное в этот момент давление смеси является равновесным давлением насыщенного раствора $p_{\text{изм.}}$.

Если же температура значительно превышает желаемую, это свидетельствует о недостаточном количестве пропан-2-ола в смеси. В этом случае в ячейку с помощью шпиндельного пресса вводится дополнительно некоторое количество пропан-2-ола, после чего вновь производится нагревание до установления гомогенного равновесия и охлаждение. Процедура повторяется до тех пор, пока выделение газа из насыщенного раствора не будет происходить вблизи желаемой температуры. Типичная кривая термического анализа, соответствующая этой процедуре, приведена на рис. 4.

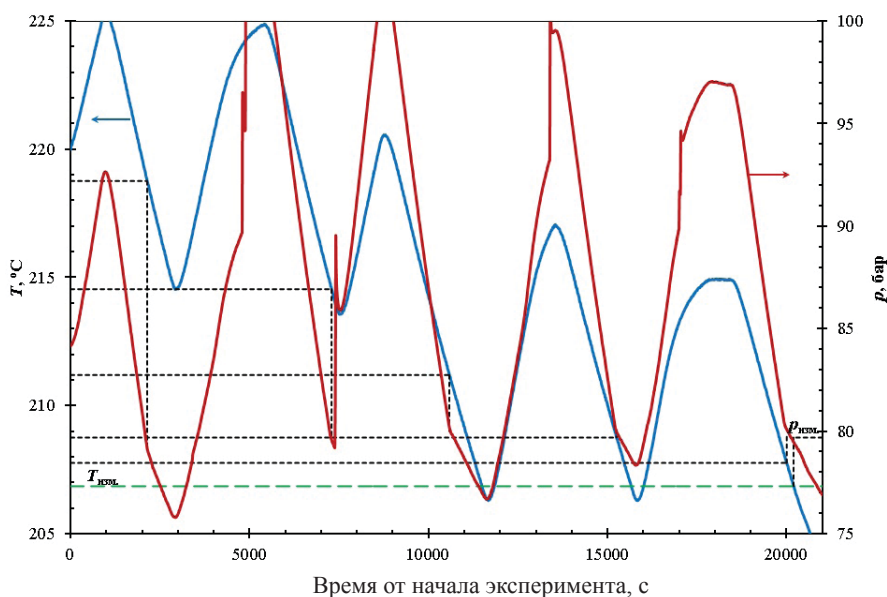


Рис. 4. Зависимости давления и температуры системы от времени проведения эксперимента и метод определения давления насыщенных паров гелия и пропан-2-ола над раствором при заданной температуре

После окончания измерения в ёмкости для загрузки жидкости в ячейку при помощи шпиндельного пресса вновь устанавливается давление порядка 25 бар, и после стабилизации давления и температуры фиксируются конечные значения $T_{2\text{-проп}}$ и $p_{2\text{-проп}}$, а также конечное число оборотов вала шпиндельного пресса z .

1.4. Обработка результатов эксперимента

По значениям температуры (T_{He}) и давления (p_{He}) гелия в ячейке до добавления пропан-2-ола с использованием уравнения состояния, описанного в работах [7, 8], параметры которого для гелия подобраны автором работы [9], вычисляется плотность гелия ρ_{He} . Поскольку объём ячейки известен ($V' = 1,485 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$), вычисляется масса гелия в ячейке ($m_{\text{He}} = \rho_{\text{He}} \cdot V'$), которая не меняется в ходе эксперимента.

По исходным значениям температуры и давления пропан-2-ола в ёмкости для подачи жидкости в ячейку **Н** ($T_{2\text{-проп}}^0$ и $p_{2\text{-проп}}^0$) с использованием уравнения состояния PC-SAFT [10], параметры которого для пропан-2-ола приведены в работе [11], вычисляется плотность пропан-2-ола в ёмкости **Н** до начала эксперимента $\rho_{2\text{-проп}}^0$. Объём, занимаемый пропан-2-олом в ёмкости, вычисляется исходя из общего объёма ёмкости ($V'' = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$) и числа оборотов вала шпиндельного пресса z^0 : $V_{2\text{-проп}}^0 = V'' \cdot \frac{160,75 - z^0}{160,75}$. Затем вычисляется масса пропан-2-ола в ёмкости **Н** до начала эксперимента ($m_{2\text{-проп}}^0 = \rho_{2\text{-проп}}^0 \cdot V_{2\text{-проп}}^0$). Аналогично по конечным значениям $T_{2\text{-проп}}$ и $p_{2\text{-проп}}$ вычисляется плотность пропан-2-ола в ёмкости **Н** по окончании эксперимента $\rho_{2\text{-проп}}$.



а затем его объём ($V_{2-проп.} = V''' \cdot \frac{160,75 - z}{160,75}$) и масса ($m_{2-проп.} = \rho_{2-проп.} \cdot V_{2-проп.}$). Разность масс пропан-2-ола в ёмкости **Н** в начале и в конце эксперимента определяет массу пропан-2-ола, введённую в измерительную ячейку **А**: $m'_{2-проп.} = m_{2-проп.}^0 - m_{2-проп.}$. По известным значениям масс гелия и пропан-2-ола в ячейке **А** вычисляется мольная доля гелия в равновесной

смеси: $x_{He} = \frac{m_{He} \cdot M_{2-проп.}}{m'_{2-проп.} \cdot M_{He} + m_{He} \cdot M_{2-проп.}}$, где $M_{He} = 4,002602$ г/моль и $M_{2-проп.} = 60,09502$ г/моль – молярные массы гелия и пропан-2-ола соответственно.

В соответствии с законом Дальтона [12, 13] давление насыщенного пара складывается из парциальных давлений гелия и пропан-2-ола, $p_{изм.} = p'_{He} + p'_{2-проп.}$. Для предельно разбавленных растворов гелия в пропан-2-оле парциальное дав-

ление пропан-2-ола определяется законом Рауля [14] ($p'_{2-проп.} = p_{2-проп.}^* \cdot x_{2-проп.} = p_{2-проп.}^* - p_{2-проп.}^* \cdot x_{He}$), а парциальное давление гелия – законом Генри [15] ($p'_{He} = H_{He / 2-проп.} \cdot x_{He}$). Таким образом, зависимость экспериментально определённого давления насыщенного пара $p_{изм.}$ от мольной доли гелия в смеси x_{He} является прямой с угловым коэффициентом, равным разности $H_{He / 2-проп.} - p_{2-проп.}^*$ (рис. 5). Для каждой из температур, при которых проводилось измерение $T_{изм.}$, строится график в координатах $p_{изм.} - x_{He}$ и по методу наименьших квадратов [16] находится угловой коэффициент прямой. Значение давления насыщенного пара пропан-2-ола над чистым пропан-2-олом $p_{2-проп.}^*$ вычисляется по уравнению состояния [11], затем путём суммирования с определённым угловым коэффициентом прямой вычисляется константа Генри для гелия в пропан-2-оле.

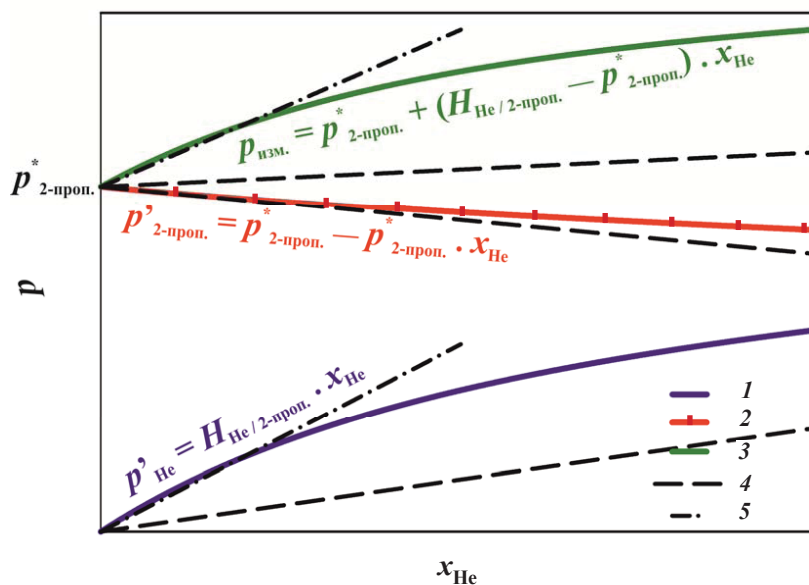


Рис. 5. Схематический вид зависимости парциальных давлений гелия и пропан-2-ола, а также общего давления насыщенного пара от мольной доли гелия в области предельно разбавленных растворов: 1 – парциальное давление гелия, 2 – парциальное давление пропан-2-ола, 3 – общее давление насыщенного пара, 4 – линия закона Рауля, 5 – линия закона Генри

2. Результаты и их обсуждение

В табл. 1 приведены данные экспериментов и вычислений. Давления насыщенного пара пропан-2-ола при температурах 360, 420 и 480 К, вычисленные по уравнению состояния [11], собраны в табл. 2. По этим данным построены графики зависимостей давления насыщенного пара над раствором гелия в пропан-2-оле

от состава раствора при температурах 360, 420 и 480 К, которые показаны на рис. 6. Как видно из рис. 6, зависимости хорошо аппроксимируются линейной функцией. По угловым коэффициентам прямых, вычисленных с помощью метода наименьших квадратов, проведена оценка констант Генри, полученные значения приведены в табл. 3.



Таблица 1

Результаты измерений и вычислений

$T_{\text{изм.}}$, °C	206,85			146,85			86,85		
T_{He} , °C	29,999	29,997	29,999	29,999	29,997	29,999	29,999	29,997	29,999
P_{He} , бар	3,340	6,539	3,340	3,340	6,539	3,340	3,340	6,539	9,830
ρ_{He} , кг/м ³	0,5296	1,0353	0,5296	0,5296	1,0353	0,5296	0,5296	1,0353	1,5540
m_{He} , 10 ⁶ , кг	7,8643	15,3742	7,8643	7,8643	15,3742	7,8643	7,8643	15,3742	23,0769
$T_{2\text{-прот.}}$, °C	20,780	19,797	21,126	20,780	19,797	21,126	20,780	19,797	21,126
$P_{2\text{-прот.}}$, бар	16,840	20,660	16,840	16,840	20,660	16,840	16,840	20,660	25,052
$\rho_{2\text{-прот.}}^0$, кг/м ³	788,1096	789,3123	788,3293	788,1096	789,3123	788,3293	788,1096	789,3123	788,3293
z^0	78,1	70,6	72,2	78,1	70,6	72,2	78,1	70,6	72,2
$V_{2\text{-прот.}}^0$, ·10 ⁶ , м ³	24,6793	26,9188	26,4411	24,6793	26,9188	26,4411	24,6793	26,9188	26,4411
$m_{2\text{-прот.}}^0$, ·10 ³ , кг	19,4500	21,2474	20,8443	19,4500	21,2474	20,8443	19,4500	21,2474	20,8443
$T_{2\text{-прот.}}$, °C	21,205	21,262	22,088	22,330	21,343	21,754	22,955	21,198	22,077
$P_{2\text{-прот.}}$, бар	30,120	34,860	31,190	31,190	20,750	22,856	27,390	29,590	26,026
$\rho_{2\text{-прот.}}$, кг/м ³	788,5936	788,8563	787,2615	787,5852	787,8307	787,5770	786,7267	788,5648	787,4800
z	116,4	108,6	111,1	125,0	117,0	120,2	129,5	122,6	125,8
$V_{2\text{-прот.}}$, ·10 ⁶ , м ³	13,2429	15,5720	14,8255	10,6750	13,0638	12,1082	9,3313	11,3916	10,4361
$m_{2\text{-прот.}}$, ·10 ³ , кг	10,4433	12,2841	11,6715	8,4074	10,2920	9,5362	7,3412	8,9830	8,2182
$m_{2\text{-прот.}}^1$, ·10 ³ , кг	9,0067	8,9633	9,1728	11,0426	10,9554	11,3081	12,1088	12,2644	12,6261
x_{He} , 10 ³	12,9388	25,1041	36,3947	10,5786	20,6335	29,7264	9,6561	18,4719	26,7063
$P_{\text{изм.}}$, бар	44,220	63,338	79,460	37,816	73,690	106,430	43,500	104,220	159,690



Таблица 2

Давления насыщенного пара пропан-2-ола над чистым пропан-2-олом при температурах 360, 420 и 480 К, вычисленные по уравнению состояния PC-SAFT [11]

T, K	$p_{2-проп.}^*$, бар
360,00	1,219
420,00	7,943
480,00	29,452

Сравнение результатов, полученных в настоящей работе, с литературными данными показано на рис. 7.

Известно [17], что зависимость растворимости газов в жидкостях от температуры имеет сложный характер и при некоторой температуре проходит через максимум. Данные, приведённые

Таблица 3

Значения констант Генри для раствора гелия в пропан-2-оле при температурах 298,15 [4, 5], 360, 420 и 480 К

T, K	$H_{He/2-проп.}$, МПа
298,15	993,9893 [4]
298,15	964,7502 [5]
360,00	$602,0 \pm 43,5$
420,00	$341,2 \pm 13,6$
480,00	$168,7 \pm 6,3$

на рис. 7, позволяют утверждать, что температура, при которой этот максимум достигается для раствора гелия в пропан-2-оле, лежит ниже 298,15 К.

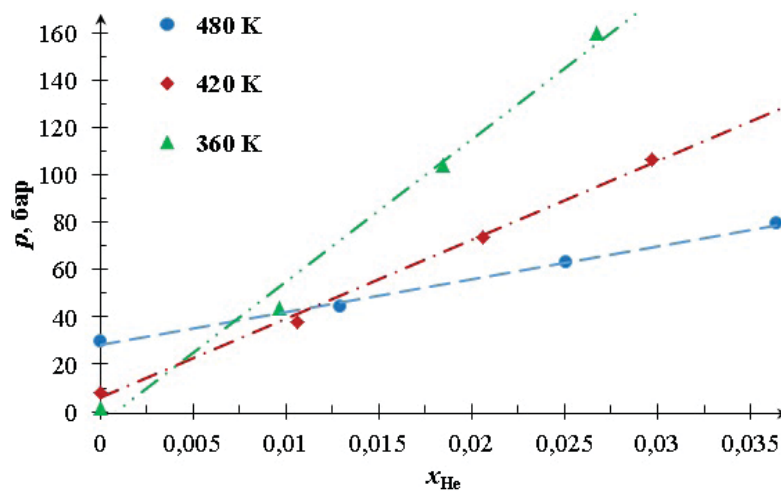


Рис. 6. Зависимость давления насыщенного пара над раствором гелия в пропан-2-оле при температурах 360, 420 и 480 К

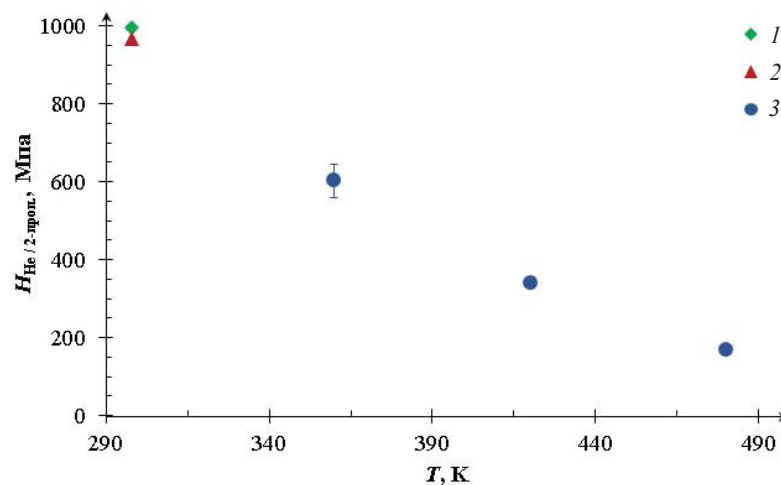


Рис. 7. Константы Генри для раствора гелия в пропан-2-оле при различных температурах: 1 – по данным [4], 2 – по данным [5], 3 – по данным настоящей работы



Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (госзадание № 10.723.2016/ДААД) и Deutscher Akademischer Austauschdienst (стипендия по программе «Michail Lomonosov III, Linie A» № 91547204).

Список литературы

1. Prausnitz J. M., Tavares F. W. Thermodynamics of fluid-phase equilibria for standard chemical engineering operations // *AIChE J.* 2004. Vol. 50, № 4. P. 739–761.
2. Skogestad S. Chemical and Energy Process Engineering. Boca-Raton : CRC Press, 2008. 440 p.
3. Nobandegani F. F., Gavahian M., Roeintan A. Modeling The Vapor-Liquid Equilibrium Of Mixtures Involving Noble Gases, Alkanes, and Refrigerants and Some Ionic Liquids Using Perturbed Hard-Sphere Equation of State // *J. of Appl. Solut. Chem. and Modeling.* 2013. Vol. 2, № 2. P. 85–95.
4. Sada E., Kito S., Ito Y. Solubility of Nitrous Oxide in the Mixtures of Alcohols and Water : Comparison with Pierotti's Gas Solubility Theory // *Industr. Engineer. Chem. Fundamentals.* 1975. Vol. 14, № 3. P. 232–237.
5. Yamamoto H., Ichikawa K., Tokunaga J. Solubility of helium in methanol + water, ethanol + water, 1-propanol + water, and 2-propanol + water solutions at 25 °C // *J. of Chem. and Engineer. Data.* 1994. Vol. 39, № 1. P. 155–157.
6. Windmann T., Linnemann M., Vrabec J. Fluid Phase Behavior of Nitrogen + Acetone and Oxygen + Acetone by Molecular Simulation, Experiment and the Peng–Robinson Equation of State // *J. of Chem. and Engineer. Data.* 2014. Vol. 59, № 1. P. 28–38.
7. Lemmon E. W., McLinden M. O., Wagner W. Thermodynamic Properties of Propane. III. A Reference Equation of State for Temperatures from the Melting Line to 650 K and Pressures up to 1000 MPa // *J. of Chem. and Engineer. Data.* 2009. Vol. 54, № 12. P. 3141–3180.
8. Span R., Wagner W. A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa // *J. of Phys. and Chem. Ref. Data.* 1996. Vol. 25, № 6. P. 1509–1596.
9. Ortiz Vega D. O. A New Wide Range Equation of State for Helium-4. Doctoral dissertation. College Station : Texas A & M University, 2013. 155 p. URL: <http://hdl.handle.net/1969.1/151301>.
10. Gross J., Sadowski G. Perturbed-Chain SAFT: An Equation of State Based on a Perturbation Theory for Chain Molecules // *Industr. and Engineer. Chem. Res.* 2001. Vol. 40, № 4. P. 1244–1260.
11. Al-Saifi N. M., Hamad E. Z., Englezos P. Prediction of vapor–liquid equilibrium in water–alcohol–hydrocarbon systems with the dipolar perturbed-chain SAFT equation of state // *Fluid Phase Equilibria.* 2008. Vol. 271, № 1–2. P. 82–93.
12. Dalton J. Essay II. On the force of steam or vapour from water and various other liquids, both in vacuum and in air // *Memoirs of the Lit. and Philosoph. Soc. of Manchester.* 1802. Vol. 5. P. 550–574.
13. Dalton J. Essay IV. On the expansion of elastic fluids by heat // *Memoirs of the Lit. and Philos. Soc. of Manchester.* 1802. Vol. 5. P. 595–602.
14. Raoult F.-M. Loi générale des tensions de vapeur des dissolvants // *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences.* 1887. Vol. 104. P. 1430–1433.
15. Henry W. Experiments on the quantity of gases absorbed by water, at different temperatures, and under different pressures // *Philos. Transactions of the Royal Soc. of London.* 1803. Vol. 93. P. 29–42, 274–276.
16. Adrain R. Research concerning the probabilities of the errors which happen in making observations // *The Analyst; or Mathematical Museum.* 1808. Vol. 1, № 4. P. 93–109.
17. Deiters U. K., Kraska T. High-Pressure Fluid Phase Equilibria: Phenomenology and Computation // *Supercritical Fluid Science and Technology.* Vol. 2. 1st ed. / ed. E. Kiran. Amsterdam : Elsevier BV, 2012. 370 p.

Образец для цитирования:

Николайчук П. А., Линнеманн М., Баумхёггер Э., Врбец Я. Экспериментальное изучение растворимости гелия в пропан-2-оле при температурах 360, 420 и 480 К // *Изв. Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Химия. Биология. Экология.* 2017. Т. 17, вып. 2. С. 155–162. DOI: 10.18500/1816-9775-2017-17-2-155-162.

Cite this article as:

Nikolaychuk P. A., Linnemann M., Baumhögger E., Vrabec J. The Experimental Study of Solubility of Helium in Propan-2-ol at Temperatures 360, 420 and 480 K. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Chemistry. Biology. Ecology*, 2017, vol. 17, iss. 2, pp. 155–162 (in Russian). DOI: 10.18500/1816-9775-2017-17-2-155-162.