

# ПРОЦЕССЫ, АППАРАТЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

661.715.2

## КОРРЕЛЯЦИЯ МОЛЯРНОГО ОБЪЕМА ЖИДКИХ НОРМАЛЬНЫХ ПАРАФИНОВ И ИХ СМЕСЕЙ

*Т.С. Хасанишин, А.П. Щемелев, В.С. Самуйлов, О.Г. Поддубский*

Выполнен анализ величин молярного объема жидких парафинов от н-пентана до н-тетрагексаконтана и их смесей при атмосферном давлении и на линии насыщения в диапазоне температур 143–573 К. Получено уравнение, передающее зависимость молярного объема от числа атомов углерода в молекуле парафина или среднего числа атомов углерода в молекулах смесей парафинов. Установлено хорошее согласование имеющихся экспериментальных данных с результатами расчета молярного объема с использованием полученного уравнения. Показана возможность прогнозирования объемных свойств экспериментально неисследованных жидких парафинов и их смесей.

### Введение

Интерес к исследованию термодинамических свойств нормальных парафинов (н-алканов), имеющих общую формулу  $C_nH_{2n+2}$ , не угасает на протяжении длительного времени. Это объясняется как широким практическим использованием этих веществ, так и особенностями их молекулярного строения, позволяющими достаточно просто проследить влияние молекулярной структуры на свойства вещества. Многолетние исследования жидких парафинов и их смесей позволили накопить достаточно большой объем экспериментальных данных о термодинамических свойствах этих жидкостей, в особенности об их объемных свойствах (плотность, удельный и молярный объемы). В связи с этим неоднократно предпринимались попытки установления точных количественных корреляций между объемными свойствами, длиной углеродной цепочки парафинов и составом смесей.

В [1, 2] были предложены простые аддитивные методы оценки величины молярного объема жидкости при нормальной температуре кипения в зависимости от числа различных, атомов содержащихся в молекуле. Эти методы используются до настоящего времени и позволяют оценивать молярный объем разнообразных жидкостей при единственной температуре с точностью в пределах от 3 % до 4 % за исключением сильно ассоциированных жидкостей. В то же время погрешность объемных данных для многих жидкостей на 1–3 порядка меньше, чем погрешность вышеупомянутых методик. Кроме того, методы [1, 2] не позволяют определять молярный объем даже чистых жидкостей при температурах, отличных от температуры нормального кипения. Монотонное изменение свойств в зависимости от числа атомов углерода в молекуле чистых нормальных парафинов и среднего числа атомов углерода в молекулах их смесей позволило предложить Бренстеду и Кефеду [3] принцип конгруэнтности, справедливый для смесей н-алканов. Согласно этому принципу любые смеси, состоящие из представителей ряда парафинов с числом атомов углерода в молекуле более пяти, являются конгруэнтными чистому гомологу с числом

атомов углерода, равным среднему числу атомов углерода в молекулах парафинов, составляющих смесь.

Объединив подходы, предложенные в [1–3], Ван Хук [4] получил несколько подобных зависимостей молярного объема нормальных алканов и их смесей от температуры и числа атомов углерода в молекуле алкана или среднего числа атомов углерода в молекулах, составляющих смесь, отличающихся разными значениями коэффициентов. Из полученных зависимостей автором [4] было рекомендовано следующее уравнение:

$$\ln(V_m / N) = 2,67101 + 0,53911 / N + (4,1143 \times 10^{-4} + 3,266 \times 10^{-3} / N)T + (1,3522 \times 10^{-9} + 2,0807 \times 10^{-8} / N)T^3 / 3, \quad (1)$$

где  $V_m$  – молярный объем н-алкана или смеси н-алканов, см<sup>3</sup>/моль;

$T$  – температура, К;

$N$  – число атомов углерода в молекуле чистого алкана или среднее число атомов углерода компонентов смеси, определяемое как

$$N = \sum x_i N_i,$$

здесь  $N_i$  и  $x_i$  – соответственно число атомов углерода и мольная доля чистого  $i$ -го компонента.

Рекомендованная зависимость описывает волюметрические свойства н-алканов от бутана (C<sub>4</sub>) до эйкозана (C<sub>20</sub>) и их смесей в жидком состоянии при температурах 153 К – 393 К и атмосферном давлении в пределах погрешности использованных в [4] исходных экспериментальных данных. Среднее квадратичное отклонение исходных данных от сглаженных уравнением составило  $1,3 \times 10^{-3}$  см<sup>3</sup>/моль.

Позднее подобную корреляцию выполнили и авторы [5]. В работе [5] была получена зависимость плотности жидких нормальных алканов и их смесей при атмосферном давлении  $\rho_0$  от температуры и числа атомов углерода в молекуле алкана или среднего числа атомов углерода в молекулах компонентов смеси:

$$\rho_0 = (1 - 4,8203 \times 10^{-4} T - 2,72932 \times 10^{-12} T^{3,5}) - (0,55240422 + 7,775 \times 10^{-5} T^{1,5}) N^{-0,87} \quad (2)$$

Полученная зависимость передает плотность н-алканов и их смесей с точностью на уровне точности экспериментального определения этих свойств. Для получения корреляционного уравнения в [5] использовались исходные экспериментальные данные по плотности нормальных жидких алканов от пентана (C<sub>5</sub>) до тетрагексаконтана (C<sub>64</sub>) и их смесей в общем диапазоне температур 173–673 К. Среднее отклонение исходных данных от сглаженных уравнением значений составило 0,26 %.

Несмотря на то, что корреляции, полученные в [4, 5], довольно точно передают результаты экспериментальных исследований жидких н-алканов и их смесей, они не позволяют вычислять плотность указанных систем на линии насыщения при температурах выше температуры нормального кипения, что существенно ограничивает область использования вышеупомянутых уравнений. В частности, присутствие в смеси н-пентана не позволяет выполнять расчеты для нее по уравнениям (1) и (2) при температурах выше температуры кипения пентана (309 К). В то же время сведения о плотности н-алканов и их смесей на кривой насыщения достаточно востребованы в практических расчетах. Кроме того, уравнение, полученное в [4], хотя и описывает экспериментальные данные с высокой точностью, однако имеет диапазон применения значительно уже интервала температур, экспериментально исследованных к настоящему времени. Корреляция [5] была получена с использованием данных практически во всем экспериментально изученном диапазоне температур, однако точность уравнения (2) заметно ниже, чем уравнения (1). При этом оба уравнения не используют линейную зависимость молярного объема жидких нормальных

алканов от числа атомов углерода в молекуле, отмеченную в [1, 2]. В то же время такая линейная зависимость обладает возможностью надежной экстраполяции молярного объема для неисследованных *n*-алканов с очень большим числом атомов углерода. В настоящей статье предпринята попытка обобщить имеющиеся на данный момент экспериментальные данные о объемных свойствах нормальных алканов и их смесей как при атмосферном давлении, так и на линии насыщения, используя принцип аддитивности, выявленный в работах [1, 2], и принцип конгруэнтности Бренстеда и Кефеда [3].

В качестве исходных данных для корреляции молярного объема жидких *n*-алканов и их бинарных смесей использованы результаты, представленные в обзорах экспериментальных исследований, а также результаты измерений плотности жидких *n*-алканов и их смесей, не вошедшие в эти обзоры.

Наиболее обширное обобщение данных по плотности нормальных алканов было сделано в работе [6]. В этой работе выполнен обзор, анализ и обработка результатов измерений плотности жидких нормальных алканов от пентана до гексадекана в общем интервале температур 143–563 К. Все данные представлены в форме уравнений, передающих температурные зависимости плотности. Уравнения получены обработкой данных как при атмосферном давлении, так и на линии насыщения. Автор [6] отметил, что при температурах ниже температуры нормального кипения различия в значениях плотности при атмосферном давлении и давлении насыщения незначительны (меньше экспериментальных погрешностей этих величин).

Позднее опубликована статья [7], в которой на основе наиболее точных экспериментальных данных получены температурные зависимости плотности жидких *n*-алканов в диапазоне температур от тройной точки до критической. Однако в [7] обобщены результаты измерений только для *n*-алканов от пентана до тридекана.

Авторами [8] выполнены собственные измерения плотности нормальных гексана, октана, гексадекана, докозана и гексатриконтана в общем интервале температур 258–480 К, а также обобщены данные других авторов для нормальных алканов от гексана до додекана и от тетрадекана до эйкозана, а также для гексакозана в общем диапазоне температур 253–493 К. Собственные результаты измерений и данные других авторов в [8] были обобщены полиномиальными зависимостями плотности от температуры.

Кроме того, для получения зависимости молярного объема были привлечены результаты измерений [9–44], не вошедшие в вышеупомянутые обзоры. На рисунке 1 представлена зависимость молярного объема нормальных алканов при атмосферном давлении и на линии насыщения от числа атомов углерода и температуры, построенная на основе вышечисленных данных.

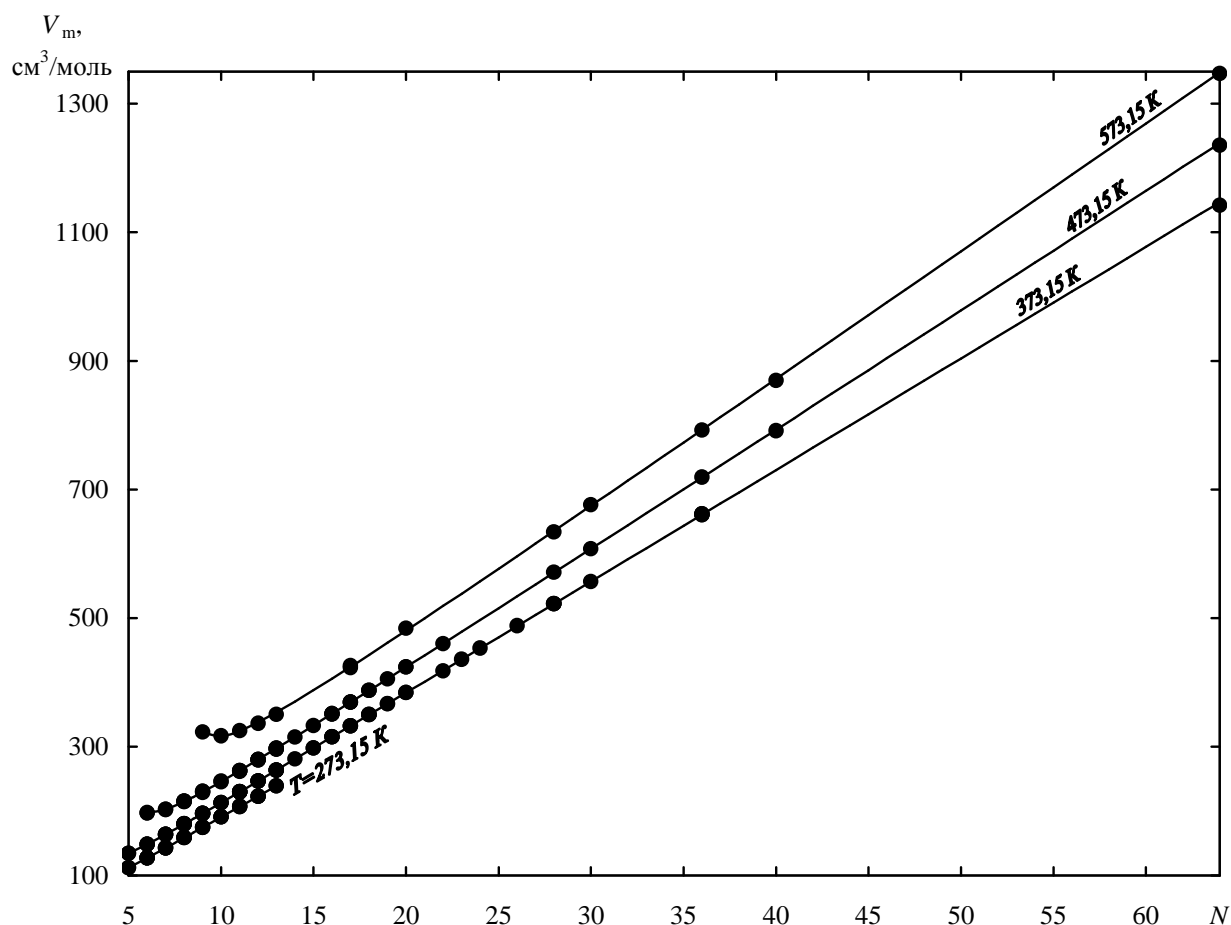
Обработка исходных данных. Как видно из рисунка 1, зависимость между числом атомов углерода в молекуле *n*-алкана *N* и молярным объемом при атмосферном давлении и на линии насыщения носит практически линейный характер. Исключение составляет область сравнительно небольших чисел *N* и высоких температур, особенно при температурах выше температуры нормального кипения. В этой области наблюдается существенное положительное отклонение молярного объема от линейной зависимости, что не может объясняться увеличением давления выше атмосферного на линии насыщения при температурах, превышающих температуру нормального кипения. Такая же зависимость наблюдается между молярным объемом смесей *n*-алканов и средним числом атомов углерода в молекулах смеси.

Такой характер зависимости позволил предложить для описания молярного объема нормальных алканов и их смесей в жидком состоянии при атмосферном давлении следующее уравнение:

$$V_m = A + BN + \frac{C}{(D + N)^k}, \quad (3)$$

где *A*, *B*, *C*, *D* и *k* – коэффициенты и показатель степени, определяемые на основе экспе-

риментальных данных.



**Рисунок 1 – Зависимость молярного объема нормальных алканов при атмосферном давлении и на линии насыщения от числа атомов углерода и температуры**

Предварительная обработка исходных данных показала наличие зависимости коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  и  $D$  от температуры. В результате обработки всего массива исходных данных методом наименьших квадратов было получено значение показателя степени  $k = 2/3$  и следующие температурные зависимости коэффициентов:

$$\begin{aligned} A &= 17,673 + 1,395 \times 10^{-21} T^8 + 1,16659 \times 10^{-3} T^{1,6}, \\ B &= 14,024 + 1,1978 \times 10^{-3} T^{1,34}, \\ C &= -2,77 + 2,6357 \times 10^{-7} T^{3,1}, \\ D &= -7,2195 - 3,60466 \times 10^{-4} T^{1,8} + 1,602715 \times 10^{-2} T^{1,2}. \end{aligned}$$

С использованием данных зависимостей уравнение (3) описывает значения молярного объема  $n$ -алканов и их смесей (в  $\text{см}^3/\text{моль}$ ) с точностью на уровне точности экспериментального определения волюметрических свойств при атмосферном давлении и на линии насыщения в диапазоне температур  $T = 143\text{--}573$  К и чисел атомов углерода  $N = 5\text{--}64$ . Учитывая, что с увеличением числа  $N$  зависимость (3) стремится к линейной, можно предположить, что вычисленные с ее помощью величины молярного объема для жидкой фазы нормальных алканов и их смесей при значениях  $N > 64$  также будут иметь удовлетворительную точность.

### Результаты исследований и их обсуждение

Выполненное сравнение показывало, что отклонение исходных экспериментальных данных от значений, вычисленных с использованием уравнения (3), находятся практически в пределах погрешности этих данных. Среднеквадратичное отклонение для всего массива исходных данных составляет 0,11 %. Данная величина сопоставима с обычной точностью экспериментальных исследований плотности жидкости. На рисунке 2 представлены результаты сравнения для чистых *n*-алканов при различных температурах. На рисунке не отражены отклонения данных [23]: при температуре 473,15 К для *n*-гептана, составляющее 2,7 %, а также при температуре 573,15 К для *n*-нонана (59 %), *n*-ундекана (19 %) и тридекана (3,7 %).

Из рисунка 2 видно, что данные других авторов при тех же температурах и для тех же веществ существенно ниже и лежат в пределах 0,6 %. Большие отклонения в области высоких температур не коррелируют с числом *N* и обусловлены возрастанием экспериментальной погрешности исходных данных с ростом температуры. Среднеквадратичное отклонение литературных данных по плотности бинарных смесей от величин, вычисленных с использованием уравнения (3), заметно меньше, чем для всего массива исходных данных и составляет 0,07 %. Это объясняется тем, что экспериментальные исследования плотности смесей выполнены в гораздо более узком интервале температур (в основном при температурах 293–373 К), чем для чистых алканов и, соответственно, их результаты обладают большей точностью. На рисунке 3 представлены отклонения значений молярного объема смесей *n*-алканов, полученных по результатам измерений разных авторов от вычисленных по уравнению (3).

Отклонения, представленные на рисунке 3 не носят систематического характера, и не коррелируют с числом атомов углерода. Одинаково случайный характер распределения отклонений на рисунках 2 и 3 показывает, что зависимость (3) адекватно описывает исходные данные как для чистых алканов, так и для их смесей. Практически линейная зависимость (3) молярного объема для *n*-алканов и их смесей ниже температуры нормального кипения позволяет предположить возможность прогнозирования объемных свойств экспериментально неисследованных жидких нормальных алканов и их смесей с числом  $N \geq 5$  в диапазоне температур 143–573 К.

Уравнение (3), в отличие от (1) и (2), позволяет вычислять молярный объем чистых жидких *n*-алканов и их смесей не только при атмосферном давлении в области температур ниже температуры нормального кипения, но и при более высоких температурах на линии насыщения.

Точность описания экспериментальных данных всеми тремя уравнениями в области возможного сопоставления примерно одинакова. В частности, было выполнено сравнение массива данных, использовавшегося в качестве исходных для получения уравнения (3) со значениями молярного объема, вычисленными с применением уравнений (1) и (2).

Для оценки точности уравнения (1) из всего массива исходных данных были отобраны данные для жидких алканов и их смесей с числом  $N = 5–20$  в диапазоне от температуры плавления до температуры нормального кипения в общем интервале температур 153–393 К. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных этих данных от величин, вычисленных с использованием уравнения (1), составило 0,08 %. Среднеквадратичное отклонение тех же данных от значений, полученных с применением уравнения (3), равно 0,06 %.

Сравнение исходных данных со значениями, вычисленными по уравнению (2), выполнено для жидких алканов и их бинарных смесей с числом  $N = 5–64$  в диапазоне от температуры плавления до температуры нормального кипения в общем интервале температур 143–573 К. В результате среднеквадратичное отклонение экспериментальных данных от значений, рассчитанных с применением уравнения (2), составило 0,1 %. Среднеквадратичное отклонение тех же данных от величин, полученных с использованием уравнения (3), равно 0,08 %.

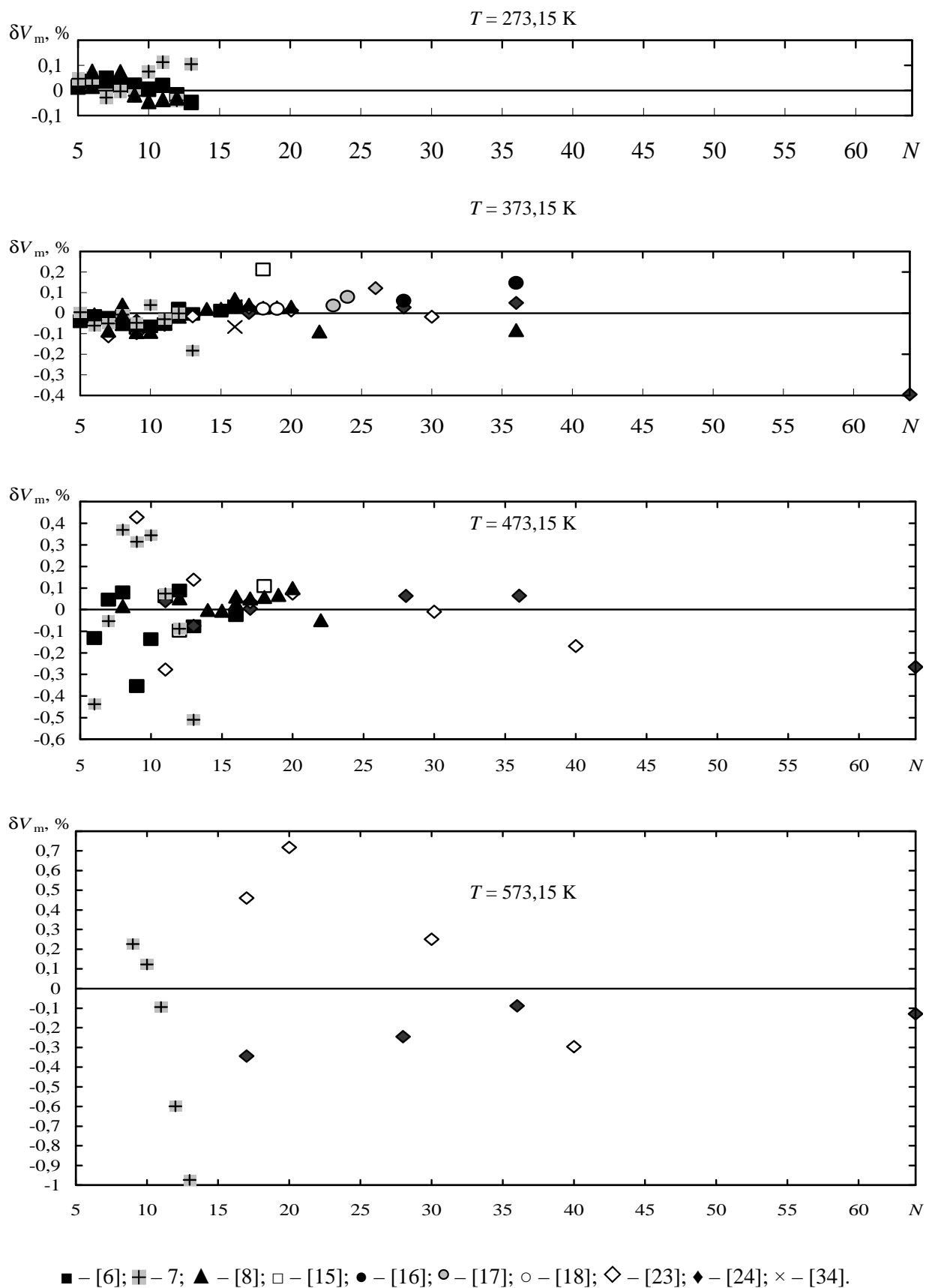
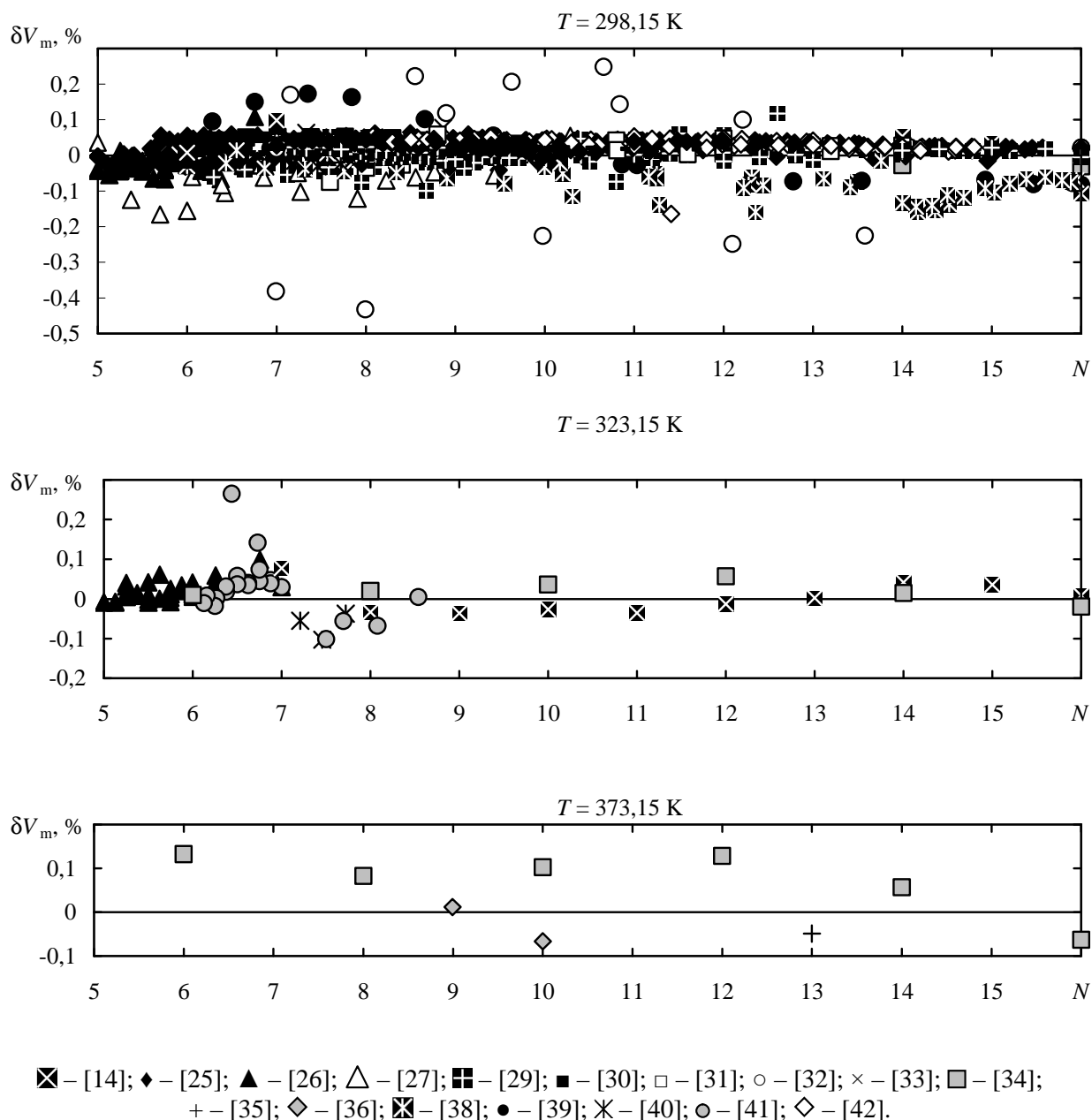


Рисунок 2 – Отклонение исходных данных для чистых n-алканов от вычисленных по уравнению (3)



**Рисунок 3 – Отклонение исходных данных для бинарных смесей n-алканов от вычисленных по уравнению (3)**

### Закключение

В результате обобщения имеющихся экспериментальных данных получено уравнение, передающее практически линейную зависимость молярного объема жидких нормальных алканов и их смесей при атмосферном давлении и на линии насыщения от числа атомов углерода в молекуле алкана или среднего числа атомов углерода в молекулах, составляющих смесь. Показано хорошее описание уравнением экспериментальных данных практически в пределах погрешности экспериментов, а также высокая точность расчета молярного объема жидких n-алканов и их смесей в сравнении с подобными корреляциями других авторов. Полученное уравнение пригодно для практических расчетов и прогнозирования волюметрических свойств жидких n-алканов и их бинарных смесей с числом  $N \geq 5$  при атмосферном давлении и на линии насыщения в интервале температур 143–573 К.

### Литература

1 Le Bas, G. The Molecular Volumes of Liquid Chemical Compounds / G. Le Bas. – NewYork: Long-

- mans, Green, 1915. – 685 p.
- 2 Partington, J. An Advanced Treatise on Physical Chemistry: in 2 Vol. / J. Partington. – first ed. – London: Longmans, Green & Co, 1949. – Vol. 2: Properties of Liquids. – 448 p.
- 3 Bransted, J.N. The thermodynamic properties of paraffin mixtures I / J. N. Bransted, J. Koefoed // *Det. Kgl. Dansk. Videnskab. Mat.-Fys. Medd.* – 1946. – Vol.22, № 17. – P. 1–32.
- 4 Van Hook, A. Correlation of the molar volumes of n-alkanes and their mixtures / A. Van Hook // *Fluid Phase Equilibria.* – 1985. – Vol. 22. – P. 55–75.
- 5 Ramos-Estrada, M. Experimental measurements and prediction of liquid densities for n-alkane mixtures / M. Ramos-Estrada, G.A. Iglesias-Silva, K.R. Hall // *J. Chem. Thermodynamics.* – 2006. – Vol. 38. – P. 337–347.
- 6 Cibulka, I. Saturated liquid densities of 1-alkanols from C<sub>1</sub> to C<sub>10</sub>, and n-alkanes from C<sub>5</sub> to C<sub>16</sub>: a critical evaluation of experimental data / I. Cibulka // *Fluid Phase Equilibria.* – 1993. – Vol. 89. – P. 1–18.
- 7 Термические свойства n-алканов C<sub>5</sub>–C<sub>13</sub> в диапазоне температур от тройной точки до критической / А.А. Герасимов [и др.] // *Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России.* – 2011. – № 1. – С. 43–57.
- 8 Orwoll, R.A. Equation-of-State Parameters for Normal Alkanes. Correlation with Chain Length / R.A. Orwoll, P.J. Flory // *J. Am. Chem. Soc.* – 1967. – Vol. 89. – P. 6814–6822.
- 9 Dzida, M. Thermodynamic and acoustic properties of binary mixtures of alcohols and alkanes. II. Density and heat capacity of (ethanol + n-heptane) under elevated pressures / M. Dzida, W. Marczak // *J. Chem. Thermodynamics.* – 2005. – Vol. 37. – P. 826–836.
- 10 Viscosity and liquid density of asymmetric hydrocarbon mixtures/ A. J. Queimada [et. al.] // *Int. J. of Thermophysics.* – 2003. – Vol. 24, No. 5. – P. 1221–1239.
- 11 Asfour, A.-F.A. Density–composition data for eight binary systems containing toluene or ethylbenzene and C<sub>8</sub>–C<sub>16</sub> n-alkanes at 293.15, 298.15, 308.15, and 313.15 K / A.-F.A. Asfour, M.H. Siddique // *J. Chem. Eng. Data.* – 1990. – Vol. 35. – P. 192–198.
- 12 Asfour, A.-F.A. Density–composition data for eight binary systems containing toluene or ethylbenzene and C<sub>8</sub>–C<sub>16</sub> n-alkanes at 293.15, 298.15, 308.15, and 313.15 K / A.-F.A. Asfour, M.H. Siddique // *J. Chem. Eng. Data.* – 1990. – Vol. 35. – P. 192–198.
- 13 Banipal, T.S. Heat capacities and densities of liquid n-octane, n-nonane, n-decane, and n-hexadecane at temperatures from 318.15 K to 373.15 K and pressures up to 10 MPa / T.S. Banipal, S.K. Garg, J.C. Ahluwalia // *J. Chem. Thermodynamics.* – 1991. – Vol. 23. – P. 923–931.
- 14 Temperature Dependence of the Speed of Sound, Densities, and Isentropic Compressibilities of Hexane + Hexadecane in the Range of (293.15 to 373.15) K / M.F. Bolotnikov [et. al.] // *J. Chem. Eng. Data.* – 2005. – Vol. 50. – P. 1095–1098.
- 15 The Viscosity and Density of n-Dodecane and n-Octadecane at Pressures up to 200MPa and Temperatures up to 473K / D.R. Caudwell [et. al.] // *Int. J. Thermophysics.* – 2004. – Vol. 25, N 5. – P. 1339–1352.
- 16 Dutour, S. High-pressure speed of sound, density and compressibility of heavy normal paraffins: C<sub>28</sub>H<sub>58</sub> and C<sub>36</sub>H<sub>74</sub> / S. Dutour, B. Lagourette, J.L. Daridon // *J. Chem. Thermodynamics.* – 2002. – Vol. 34. – P. 475–484.
- 17 Dutour, S. High-pressure speed of sound and compressibility in heavy normal hydrocarbons: n-C<sub>23</sub>H<sub>48</sub> and n-C<sub>24</sub>H<sub>50</sub> / S. Dutour, B. Lagourette, J.L. Daridon // *J. Chem. Thermodynamics.* – 2001. – Vol. 33. – P. 765–774.
- 18 Dutour, S. Pressure and Temperature Dependence of the Speed of Sound and Related Properties in Normal Octadecane and Nonadecane / S. Dutour, J.L. Daridon, B. Lagourette // *Int. J. Thermophysics.* – 2000. – Vol. 21, N 1. – P. 173–184.
- 19 Thermophysical Characterization of Liquids Using Precise Density and Isobaric Heat Capacity Measurements As a Function of Pressure / J. L. Valencia [et. al.] // *J. Chem. Eng. Data.* – 2009. – Vol. 54. – P. 904–915.
- 20 Automated measuring device of (p, r, T) data Application to the 1-hexanol + n-hexane system / J. Troncoso [et. al.] // *J. Fluid Phase Equilibria.* – 2003. – Vol. 208. – P. 141–154.
- 21 Troncoso, J. p,r,Tx Data for the Dimethyl Carbonate + Decane System / J. Troncoso [et. al.] // *J. Chem. Eng. Data.* – 2004. – Vol. 49. – P. 923–927.
- 22 Mazee, W.M. Some properties of hydrocarbons having more than twenty carbon atoms / W.M. Mazee // *Rec. trav. chim.* – 1948. – Vol. 67. – P. 197–213.
- 23 Doolittle, A.K. Specific Volumes of n-Alkanes / A.K. Doolittle // *J. Chem. Eng. Data.* – 1964. – Vol. 9, N 2. – P. 275–279.
- 24 Doolittle, A.K. Preparation and Physical Properties of a Series of n-Alkanes / A.K. Doolittle, R.H. Peterson // *J. Am. Chem. Soc.* – 1951. – Vol. 73. – P. 2145–2151.
- 25 Densities, viscosities, and refractive indices of some n-alkanes binary liquid systems at 298.15 K // A. Aucejo [et al.] // *J. Chem. Eng. Data.* – 1995. – Vol. 40. – P. 141–147.
- 26 Pečar, D. Isothermal compressibilities and isobaric expansibilities of pentane, hexane, heptane and their binary and ternary mixtures from density measurements // D. Pečar, V. Doleček // *Fluid Phase Equilibria.* – 2003. – Vol. 211. – P. 109–127.
- 27 Meeussen, E. Association of the carboxylic acids and viscosity / E. Meeussen, C. Debeuf, P. Huyskens // *Bull. Soc. Chim. Belges.* – 1967. – Vol. 76. – P. 145–156.
- 28 Cooper, E.F. Densities and kinematic viscosities of some C<sub>6</sub>–C<sub>16</sub> n-alkane binary liquid systems at 293.15 K / E.F. Cooper, A.-F.A. Asfour // *J. Chem. Eng. Data.* – 1991. – Vol. 36. – P. 285–288.



- 29 Chevalier, J.E.L. Viscosity and density of some aliphatic, cyclic, and aromatic hydrocarbons binary liquid mixtures / J.E.L. Chevalier, P.J. Petrino, Y.H. Gaston-Bonhomme // J. Chem. Eng. Data. – 1990. – Vol. 35. – P. 206–212.
- 30 Goates, J.R. Excess volumes of *n*-hexane + *n*-heptane, + *n*-octane, + *n*-nonane, + *n*-decane at 283.15, 298/15 and 313.15 K / J.R. Goates, J.B. Ott, R.B. Grigg // J. Chem. Thermodynamics. – 1981. – Vol. 13. – P. 907–913.
- 31 Takagi, T. Ultrasonic speeds and thermodynamic for binary solutions of *n*-alkane under high pressures / T. Takagi, H. Teranishi // Fluid Phase Equilib. – 1985. – Vol. 20. – P. 315–320.
- 32 Bidlack, D.L. Mutual diffusion in nonideal, nonassociating liquid systems / D.L. Bidlack, D.K. Anderson // J. Phys. Chem. – 1964. – Vol. 68, N 12. – P. 3790–3794.
- 33 Schmidt, R.L. Thermodynamics of liquid surfaces: adsorption at the binary hydrocarbon liquid-vapor interface / R.L. Schmidt, H.L. Clever // J. Colloid Interface Sci. – 1968. – Vol. 26. – P. 19–25.
- 34 Dymond, J.H. *p*, *r*, *T* behaviour for *n*-hexane + *n*-hexadecane in the range 298 to 373 K and 0.1 to 500 MPa / J.H. Dymond, K.J. Young, J.D. Isdale // J. Chem. Thermodynamics. – 1979. – Vol. 11. – P. 887–895.
- 35 Dymond, J.H. Densities of *n*-alkanes and their mixtures at elevated pressures / J.H. Dymond, R. Malhotra // Int. J. Thermophys. – 1987. – Vol. 8, № 5. – P. 541–555.
- 36 Dymond, J. H. (*p*, *r*, *T*) of some pure *n*-alkanes and binary mixtures of *n*-alkanes in the range 298 to 373 K and 0.1 to 500 MPa / J.H. Dymond, Robertson J., J.D. Isdale // J. Chem. Thermodynamics. – 1982. – Vol. 14. – P. 51–59.
- 37 Knapstad, B. Viscosity of three binary hydrocarbon mixtures / B. Knapstad, P.A. Skjøisvik, H.A. Øye // J. Chem. Eng. Data. – 1991. – Vol. 36. – P. 84–88.
- 38 Heric, E.L. Viscosity of some ternary liquid nonelectrolyte mixtures / E.L. Heric, J.G. Brewer // J. Chem. Eng. Data. – 1969. – Vol. 14, № 1. – P. 55–63.
- 39 Tripathi, N. Densities, viscosities, and refractive indices of mixtures of hexane with cyclohexane, decane, hexadecane, and squalane at 298.15 K / N. Tripathi // Int. J. Thermophys. – 2005. – Vol. 26, №3. – P. 693–703.
- 40 Abdulagatov, I.M. (*p*, *r*, *T*, *x*) and viscosity measurements of {*x*<sub>1</sub>*n*-heptane + (1-*x*<sub>1</sub>)*n*-octane} mixtures at high temperatures and high pressures / I.M. Abdulagatov, N.D. Azizov // J. Chem. Thermodynamics. – 2006. – Vol. 38. – P. 1402–1415.
- 41 Viscosity and Thermal Conductivity of Binary *n*-Heptane + *n*-Alkane Mixtures / M.J. Assael [et. al.] // Int. J. Thermophys. – 1992. Vol. 13, N 2. – P. 237–249.
- 42 Wu, J. Composition dependence of densities and excess molar volumes of mixing of C<sub>8</sub>–C<sub>15</sub> *n*-alkane binary liquid systems at 308.15 and 313.15 K / J. Wu, A.-F.A. Asfour // Fluid Phase Equilib. – 1991. – Vol. 61. – P. 275–284.
- 43 Grigg, R.B. Excess volumes and excess enthalpies for (*n*-dodecane + *n*-octane) and excess volumes for (*n*-dodecane + cyclohexane) at 298.15 K / R.B. Grigg, J.R. Goates, J.B. Ott // J. Chem. Thermodynamics. – 1982. – Vol. 14. – P. 101–102.
- 44 Wakefield, D.L. Viscosities of nonelectrolyte liquid mixtures. III. Selected binary and quaternary mixtures / D.L. Wakefield // Int. J. Thermophys. – 1988. – vol. 9, №3. – P. 365–381.

*Поступила в редакцию 17.07.2016*