

Метод расчета гидравлического уклона при движении двухфазной смеси в наклонных трубопроводах

© А.С. Кондратьев¹, Тьонг Линь Нья²

¹ Московский государственный политехнический университет,
Москва, 107023, Россия

² Ханойский университет науки и технологий, Ханой, Вьетнам

Представлено исследование движения двухфазных смесей в наклонных трубопроводах с применением двух методов расчетов в промежуточной области угла наклона трубопроводов. В качестве исходных зависимостей были использованы методы расчета движения двухфазных смесей в горизонтальных и вертикальных трубопроводах. При движении «сверху — вниз» в наклонном трубопроводе наиболее значимое изменение происходит с распределением объемной доли твердой фазы: поток из осесимметричного в вертикальной трубе трансформируется в поток с существенно неравномерным распределением твердой фазы в вертикальной плоскости в наклонной трубе. При движении «снизу — вверх» трансформация профиля объемной доли твердой фазы происходит в обратном порядке. Проведенное сопоставление экспериментальных и расчетных данных показало достаточно хорошее соответствие между ними. Предложенный метод расчета является полуэмпирическим и может быть рекомендован для вычислений гидравлического уклона в наклонных трубопроводах.

Ключевые слова: *двухфазная смесь, гидравлический уклон, наклонный трубопровод, метод сшивки, горизонтальный трубопровод, вертикальный трубопровод*

Введение. В настоящей статье под двухфазным потоком понимается движение в трубопроводах в ньютоновской жидкости измельченных твердых материалов. При анализе движения двухфазных смесей в вертикальных трубопроводах используется естественное представление об осесимметричности течения относительно геометрической оси трубы [1]. Предполагается, что в горизонтальных трубопроводах распределение объемной доли частиц твердой фазы в вертикальной диаметральной плоскости сечения трубы зависит от поперечной координаты, отсчитываемой от нижней образующей трубы [2–4]. Известные методы расчета движения двухфазной смеси в наклонных трубопроводах [5–10] основываются на эмпирических зависимостях, используемых при вычислении гидравлического уклона в горизонтальных и вертикальных трубах путем их «сшивки» при произвольном угле наклона трубопровода. В доступной технической литературе не обнаружено результатов экспериментальных исследований по распределению объемной доли частиц твердой фазы в поперечном сечении наклонных трубопроводов, иллюстрирующих

постепенную взаимную трансформацию профилей объемной доли частиц твердой фазы. При этом расчет движения двухфазной смеси в наклонных трубопроводах ограничивается задачей определения гидравлического уклона (удельных потерь напора) в зависимости от средней скорости движения потока двухфазной смеси.

Анализ предшествующих результатов. Различные эмпирические методы расчета движения двухфазных потоков в наклонных трубах предложены в технической литературе [5–10]. Так, в работе [6] для расчета величины удельных потерь напора двухфазного потока в наклонном трубопроводе I_α предложена совокупность эмпирических соотношений, основанная на полуэмпирических выражениях, в которых использовались корреляционные зависимости, полученные из сопоставления расчетных и экспериментальных данных по двухфазным потокам:

$$I_\alpha = I_{\alpha\tau} \pm \{ [1 + (\rho_p/\rho)\psi]/(1+\psi) \} \sin \alpha, \quad (1)$$

где α — угол наклона трубопровода к горизонту; $I_{\alpha\tau}$ — удельные потери напора на трение в наклонном трубопроводе; ρ_p и ρ — плотность материала твердых частиц и несущей жидкости соответственно; $\psi = G_p/(\rho_p Q)$ — относительная объемная расходная концентрация твердых частиц; G_p — массовый расход твердого материала; Q — объемный расход жидкой фазы.

Удельные потери напора на трение $I_{\alpha\tau}$ в наклонном трубопроводе определяются эмпирическим выражением:

$$I_{\alpha\tau} = I_{\nu\tau} + (I_{h\tau} - I_{\nu\tau}) \cos \alpha, \quad (2)$$

где $I_{\nu\tau}$ — удельные потери напора на трение в горизонтальной трубе, сочлененной с наклонной трубой; $I_{h\tau}$ — удельные потери напора на трение в вертикальной трубе [6].

Удельные потери напора в вертикальной трубе I_ν определяются выражением [6]

$$I_\nu = I_{\nu\tau} \pm (\rho_p / \rho). \quad (3)$$

Для расчета величины I_ν рекомендовалась зависимость [6]

$$I_\nu = \left\{ \left[1 + (\rho_p / \rho)\psi(1 - \psi)^2 \right] / \left[(1 + \psi)(1 - \psi)^2 \right] \right\} I_w \pm \left[1 + (\rho_p / \rho)\psi \right] / (1 + \psi), \quad (4)$$

где I_w — удельные потери напора на трение при перекачке в вертикальном трубопроводе чистой воды.

В выражениях (1), (3) и (4) знак «+» относится в восходящему потоку двухфазной смеси, знак «-» — к нисходящему потоку.

Для всех введенных функций I_{ht} , I_{vt} , I_w и ψ предложены эмпирические зависимости. В работе [6] отсутствовали какие-либо данные при сравнении результатов расчета по предложенным зависимостям с экспериментальными результатами по наклонным трубопроводам, поэтому определить степень достоверности рекомендаций затруднительно. Все расчетные выражения основываются на эмпирических зависимостях, связывающих интегральные характеристики двухфазного потока: удельные потери напора в зависимости от скорости движения двухфазного потока при переменной величине объемной доли твердых частиц.

В работе [8] применяется практически такой же методический подход, что и в работе [6]: авторы предлагают совокупность собственных эмпирических соотношений для определения потерь напора в наклонном трубопроводе, используя собственные эмпирические зависимости для потерь напора в горизонтальном и вертикальном трубопроводах.

В методическом плане в наиболее завершеном виде расчет величины гидравлического уклона в наклонном трубопроводе с использованием экспериментальных данных по движению двухфазного потока в горизонтальном и вертикальном трубопроводах представлен в работе [9]. В работах [9, 10] приведены опытные данные по потерям напора I_α , полученные для песчаных частиц плотностью $\rho_p = 2680 \text{ кг/м}^3$ с размером твердых частиц $d_{50} = 0,20 \text{ мм}$ в трубе с внутренним диаметром $D = 75 \text{ мм}$ в диапазоне $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ и трех значениях объемной доли частиц твердой фазы φ : 0,05; 0,10; 0,15. Ниже приведены две интерполяционные зависимости (5) и (6), предложенные в работе [9]:

• при движении двухфазной смеси в наклонном трубопроводе со скоростью U «снизу — вверх» итоговая зависимость I_α в принятых обозначениях имеет вид

$$I_\alpha = 0,0612 \left[\frac{U}{\sqrt{gD}} \right] + 0,1164 \sin \alpha - 0,2667\varphi - 0,0951; \quad (5)$$

• при движении двухфазной смеси в наклонном трубопроводе со скоростью U «сверху — вниз» итоговая зависимость I_α в принятых обозначениях имеет вид

$$I_\alpha = 0,0576 \left[\frac{U}{\sqrt{gD}} \right] + 0,0665 \sin \alpha + 0,148\varphi - 0,1295. \quad (6)$$

При $\alpha = 0$ и наименьшем опытном значении числа Фруда $Fr = U/(gD)^{1/2} = 2,7$ и $\varphi = 0,1$ можно получить следующие данные, согласно формулам (5) и (6) соответственно:

$$I_{\alpha} = 0,04347;$$

$$I_{\alpha} = 0,04082.$$

Эти значения различаются примерно на 9 %, однако по физическому смыслу при $\alpha = 0$ они должны совпадать. Необходимо отметить, что, как следует из определения числа Фруда, при известном внутреннем диаметре трубы скорость движения двухфазного потока определяется выражением

$$U = (gD)^{1/2} Fr = (9,81 \cdot 0,075)^{1/2} Fr = 0,85776 Fr \text{ м/с},$$

т. е. скорость потока пропорциональна числу Фруда. Все экспериментальные данные в работе [9] представлены в виде зависимости $I_{\alpha} = I_{\alpha}(Fr)$.

Цель настоящей работы — построение метода расчета потерь гидравлического уклона двухфазных потоков в наклонных трубопроводах с помощью метода сшивки результатов численных расчетов, полученных с использованием опубликованных методов расчета движения двухфазной смеси в горизонтальных и вертикальных трубах.

Подобная ситуация складывается и в других областях техники, например, в работе [11] отмечается, что «...математические методы обработки экспериментальных данных ... можно ... с успехом применять для обработки результатов численных расчетов на компьютерах с целью получения приближенных формул в любой области естествознания».

Методика расчета гидравлического уклона в наклонных трубопроводах. В работе [1] изложен метод расчета движения двухфазных смесей в вертикальном трубопроводе при движении в направлениях «снизу — вверх» и «сверху — вниз». Аналогичный метод расчета применительно к горизонтальным трубопроводам изложен в работах [3, 4].

На основе проведенного анализа можно представить потери напора в наклонном трубопроводе в виде следующих выражений:

$$I_{\alpha} = I_{\alpha\tau} \pm \varphi (\rho_p / \rho - 1) \sin \alpha; \quad (7)$$

$$I_{\alpha\tau} = I_{\nu\tau} + (I_{h\tau} - I_{\nu\tau}) \cos \alpha, \quad (8)$$

где $I_{\nu\tau}$ — удельные потери напора на трение в вертикальном трубопроводе, рассчитываемые по методу, изложенному в работе [1]; $I_{h\tau}$ — удельные потери напора на трение в горизонтальном

трубопроводе [3, 4]. В выражении (7) знак «+» относится к движению двухфазного потока «снизу — вверх», знак «-» — к движению двухфазного потока «сверху — вниз». Величина φ обозначает среднее объемное содержание твердой фазы в двухфазном потоке.

Сравнение расчетных значений потерь напора с экспериментальными данными. На рис. 1 показаны графики удельных потерь напора I_α в наклонном трубопроводе, полученные экспериментальным путем [9], при движении двухфазной смеси «снизу — вверх» в зависимости от числа Фруда при постоянном угле наклона $\alpha = 25^\circ$ для трех значений объемной доли твердой фазы φ : 0,05; 0,1; 0,15 — и соответствующие расчетные зависимости, определенные по формулам (7), (8) [1, 3, 4].

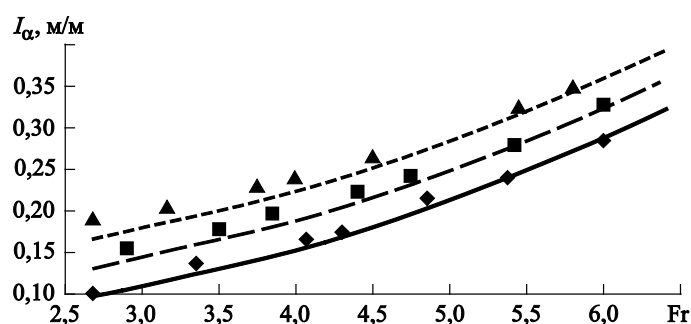


Рис. 1. Зависимость удельных потерь напора I_α от числа Фруда при угле наклона $\alpha = 25^\circ$ в случае движения двухфазной смеси «снизу — вверх»:

экспериментальные данные: \blacklozenge — $\varphi = 0,05$, \blacksquare — $\varphi = 0,1$, \blacktriangle — $\varphi = 0,15$;
 расчетные данные: — — $\varphi = 5\%$, - - - — $\varphi = 10\%$, - · - · - — $\varphi = 15\%$

Сравнение значений I_α , полученных экспериментально и предложенным расчетным методом, позволяет сделать вывод о том, что между экспериментальными и расчетными значениями I_α имеется достаточно удовлетворительное совпадение. Расхождение не превышает 10 %, т. е. оно находится на уровне соответствия экспериментальным данным для вертикальных [1] и горизонтальных [3, 4] трубопроводов. Некоторое возрастание расхождения между экспериментальными и расчетными значениями I_α при уменьшении числа Фруда возможно связано с тем, что скорость движения двухфазной смеси приближается к критической скорости.

На рис. 2 показана зависимость удельных потерь напора I_α в наклонном трубопроводе при движении двухфазной смеси «сверху — вниз» от числа Фруда при постоянном угле наклона $\alpha = 25^\circ$ для трех значений объемной доли твердой фазы φ : 0,05; 0,1; 0,15.

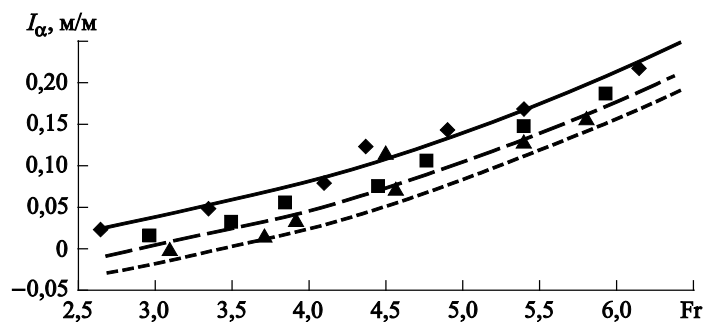


Рис. 2. Зависимость удельных потерь напора I_α от числа Фруда при угле наклона $\alpha = 25^\circ$ в случае движения двухфазной смеси «сверху — вниз»:
 экспериментальные данные: \blacklozenge — $\varphi = 0,05$, \blacksquare — $\varphi = 0,1$, \blacktriangle — $\varphi = 0,15$;
 расчетные данные: — — $\varphi = 5\%$, - - - — $\varphi = 10\%$, - . - . — $\varphi = 15\%$

В этом случае значения, полученные в ходе эксперимента, согласуются с расчетными значениями удельных потерь напора I_α достаточно удовлетворительно.

На рис. 3 показана зависимость удельных потерь напора в наклонном трубопроводе при движении двухфазной смеси «снизу — вверх» при объемной доле твердой фазы $\varphi = 0,1$ и переменном угле наклона трубопровода ($0 \leq \alpha \leq 90^\circ$).

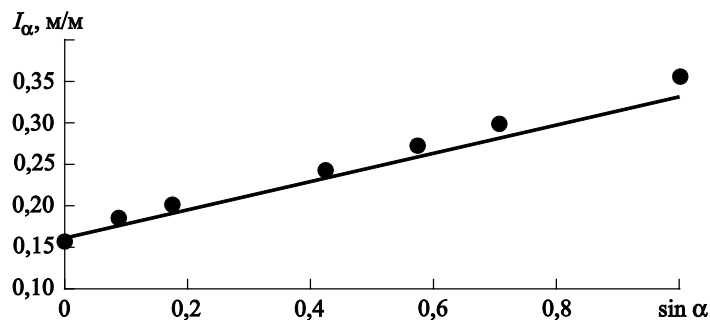


Рис. 3. Зависимость удельных потерь напора при движении двухфазной смеси «снизу — вверх» при переменном угле наклона α и объемной доле твердой фазы $\varphi = 0,1$:
 \bullet — экспериментальные данные; — — расчетные данные

На рис. 4 показана зависимость удельных потерь напора в наклонном трубопроводе при движении двухфазной смеси «сверху — вниз» при объемной доле твердой фазы $\varphi = 0,1$ и изменении угла наклона α в диапазоне $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$.

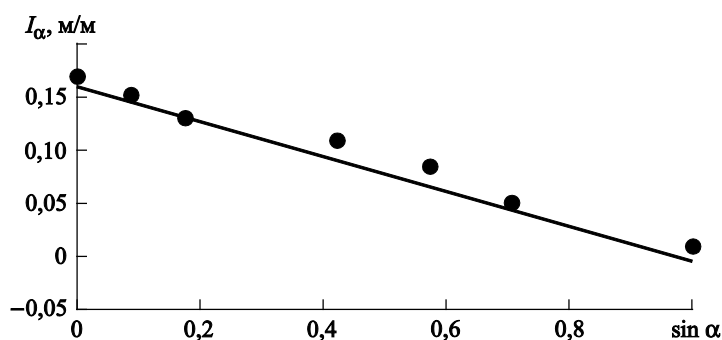


Рис. 4. Зависимость удельных потерь напора в случае движения двухфазной смеси «сверху — вниз» при переменном угле наклона α и объемной доле твердой фазы $\varphi = 0,1$:

● — экспериментальные данные; — — расчетные данные

Экспериментальные и расчетные данные, представленные на рис. 1–4, показывают, что используемые методы расчета [1, 3, 4] как для вертикальной трубы при $\alpha = 90^\circ$, так и горизонтальной трубы при $\alpha = 0$ достаточно хорошо совпадают (на уровне 10 %). В наклонных трубопроводах ($0 < \alpha < 90^\circ$) расхождение между экспериментальными и расчетными значениями удельных потерь напора также невелико. В работах [1, 3, 4] и других трудах авторов настоящей статьи расчеты проводились в горизонтальных и вертикальных трубах для твердых частиц разной степени дисперсности и объемной доли твердых частиц до $\varphi = 0,4$. Причем сопоставление производилось как по распределению скорости двухфазного потока, так и по распределению объемной доли твердых частиц по поперечному сечению трубы. Следует отметить, что соответствие между экспериментальными и расчетными значениями также было удовлетворительным и находилось на уровне $\pm 15\%$.

Заключение. Преимуществом предложенного метода расчета гидравлического уклона двухфазных потоков в наклонных трубопроводах с использованием метода сшивки является то, что параметры горизонтального и вертикального трубопроводов определяются независимыми расчетными способами. Полученные результаты позволяют рекомендовать изложенный метод расчета для определения величин удельных потерь напора в наклонных трубопроводах для практического применения в инженерных расчетах, например, когда отсутствуют исходные экспериментальные данные для эмпирических методов расчета по двухфазным потокам в горизонтальных и вертикальных трубах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кондратьев А.С., Ньа Т.Л. Расчет гидродинамических параметров при движении двухфазной смеси с монодисперсными частицами мелкой и средней крупности в вертикальных трубах. *Фундаментальные исследования*, 2018, № 4, с. 13–20.
- [2] Norman J.T., Navak H.V., Bonnecaze R.T. Migration of buoyant particles in low-Reynolds-number pressure-driven flows. *J. Fluid Mechanics*, 2005, vol. 523, pp. 1–35.
- [3] Кондратьев А.С., Швыдько П.П. Гидротранспортирование монодисперсных частиц средней крупности по горизонтальным трубам. *Современные наукоемкие технологии*, 2017, № 9, с. 28–33.
- [4] Кондратьев А.С., Швыдько П.П. Физико-математическая модель и метод расчета гидротранспортирования твердых монодисперсных частиц. *Вестник МГПУ. Сер. Естественные науки*, 2017, № 2 (26), с. 59–69.
- [5] Семененко Е.В. Методика расчета параметров внутрифабричных систем гидротранспорта. *Наукові праці Дон НТУ. Сер. Гірничо-електромеханічна*, 2007, вып. 15 (131), с. 174–179.
- [6] Криль С.И., Семененко Е.В. Методика расчета параметров трубопроводного гидротранспорта разноплотных полидисперсных материалов. *Прикладная гідромеханіка*, 2010, т. 12, № 1, с. 48–54.
- [7] Карасик В.М., Асауленко И.А., Витошкин Ю.К. *Интенсификация гидротранспорта продуктов и отходов обогащения горно-обогатительных комбинатов*. Киев, Наукова думка, 1976, 156 с.
- [8] Masanobu S., Takano S., Fujiwara T., Kanada S., Ono M., Sasagawa H. Study on hydraulic transport of large solid particles in inclined pipes for subsea mining. *J. Offshore Mechanics Arctic Engineer*, 2017, no. 139 (5), pp. 345–354.
- [9] Eltoukhy M.F.R. Effect of pipe inclination in the pipe flow head losses for different sand concentrations. *Int. J. Civil Eng. Techn. (IJCET)*, 2013, vol. 4, iss. 3, pp. 45–56.
- [10] Coiado E.M., Diniz M.G. Two-phase (Solid-liquid) Flow in Inclined Pipes. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Rio de Janeiro*, 2001, vol. 23, no. 3, pp. 346–362.
- [11] Полянин А.Д., Вязьмина У.А., Дильман В.В. Методы обработки экспериментальных данных. Новые критерии для проверки эмпирических формул. *Теоретические основы химической технологии*, 2008, т. 42, № 4, с. 368–380.

Статья поступила в редакцию 06.02.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Кондратьев А.С., Ньа Т.Л. Метод расчета гидравлического уклона при движении двухфазной смеси в наклонных трубопроводах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-11-1930>

Кондратьев Александр Сергеевич — д-р техн. наук, профессор, кафедра промышленной теплоэнергетики, Московский государственный политехнический университет. e-mail: ask41@mail.ru

Ньа Тьонг Линь — канд. техн. наук, заведующий лабораторией Учебного центра, Ханойский университет науки и технологий. e-mail: linhnt.cfmi@gmail.com, linh.nhatuong@hust.edu.vn

Method of computing hydraulic gradient for the case of a two-phase mixture flowing in sloping pipes

© A.S. Kondratev¹, Tuong Linh Nha²

¹Moscow Polytechnic University, Moscow, 107023, Russia

²Hanoi University of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

The paper investigates two-phase mixture flows in sloping pipes employing two computational methods in the transitional region of pipe slope angle. We used methods of computing two-mixture flows in horizontal and vertical pipes as the basis for our equations. When flowing downwards through a sloping pipe, the solid phase volume ratio distribution changes most significantly: an axisymmetric flow through a vertical pipe transforms into a flow featuring a markedly non-uniform distribution of the solid phase along the vertical plane in the sloping pipe. When flowing upwards, the solid phase volume ratio profile is inversely transformed. Comparison of the experimental and computational data showed that the datasets are in a sufficiently good agreement. The computational method developed is semi-empirical and may be recommended for calculating hydraulic gradient in sloping pipes.

Keywords: two-phase mixture, hydraulic gradient, sloping pipeline, cross-linking method, horizontal pipe, vertical pipe

REFERENCES

- [1] Kondratev A.S., Nha T.L. *Fundamentalnye issledovaniya — Fundamental research*, 2018, no. 4, pp. 13–20.
- [2] Norman J.T., Navak H.V., Bonnecaze R.T. *J. Fluid Mechanics*, 2005, vol. 523, pp. 1–35.
- [3] Kondratev A.S., Shvydko P.P. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii — Modern high technologies*, 2017, no. 9, pp. 28–33.
- [4] Kondratev A.S., Shvydko P.P. *Vestnik MGPU. Ser. Estestvennyye nauki — Moscow City University. Scientific Journal. Ser. Natural Sciences*, 2017, no. 2 (26), pp. 59–69.
- [5] Semenenko E.V. Metodika rascheta parametrov vnutrifabrichnykh sistem gidrotransporta [Method of calculating intrafactory hydrotransport system parameters]. *Naukovi pratsi DonNTU. Ser. Girnicho-elektromekhanichna* [Proc. of DonNTU. Series Mining and Electromechanical], 2007, no. 15 (131), pp. 174–179.
- [6] Kril S.I., Semenenko E.V. *Prikladnaya gidromekhanika — Applied Hydromechanics*, 2010, vol. 12, no. 1, pp. 48–54.
- [7] Karasik V.M., Asaulenko I.A., Vitoshkin Yu.K. *Intensifikatsiya gidro-transporta produktov i otkhodov obogashcheniya gorno-obogatitelnykh kombinatov* [Intensifying hydrotransportation of products and waste in mineral processing plants]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1976, 156 p.
- [8] Masanobu S., Takano S., Fujiwara T., Kanada S., Ono M., Sasagawa H. *J. Offshore Mechanics Arctic Engineer*, 2017, no. 139 (5), pp. 345–354.
- [9] Eltoukhy M.F.R. *Inter. J. Civil Engin. Techn. (IJCET)*, 2013, vol. 4, no. 3, pp. 45–56.
- [10] Coiado E.M., Diniz M.G. *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Rio de Janeiro*, 2001, vol. 23, no. 3, pp. 346–362.

- [11] Polyenin A.D., Vyazmina U.A., Dilman V.V. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii — Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2008, vol. 42, no. 4, pp. 368–380.

Kondratev A.S., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Industrial Thermal Engineering, Moscow Polytechnic University. e-mail: ask41@mail.ru.

Nha T. L., Cand. Sc. (Eng.), Head of Laboratory, Education Centre, Hanoi University of Science and Technology. e-mail: linhnt.cfmi@gmail.com, linh.nhatuong@hust.edu.vn