

УДК 697.7:519.673:536.423.4

ДО МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДІЛЯНКИ ТРУБЧАСТОГО ГАЗОВОГО НАГРІВАЧА У КОНДЕНСАЦІЙНОМУ РЕЖИМІ РОБОТИ

БЕРЕЗЮК Г. Г.^{1*}, *ст. викл*
ПРОДОВ В. Ф.², *д. т. н, проф.*

^{1*} Кафедра теплотехніки і газопостачання, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернышевского, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-06, e-mail: aberezuik@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4790-3421

² Кафедра теплотехніки і газопостачання, Державний вищий навчальний заклад "Придніпровська державна академія будівництва та архітектури", вул. Чернышевского, 24-а, 49600, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38 (0562) 46-98-06, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862

Анотація. Мета. При згорянні горючих газів в потоці повітря в середині випромінюючої труби обігрівача утворюється газоповітряна суміш, що містить водяні пари. При русі суміші вздовж труби її температура зменшується, що призводить до конденсації водяної пари з газоповітряної суміші. Максимальну економію палива можливо досягти шляхом використання в конструкції обігрівача режиму конденсації водяної пари з газоповітряної суміші. У процесі конденсації стан пари поблизу поверхні фазового переходу є нерівноважним. В існуючій математичній моделі трубчастого газового нагрівача у конденсаційному режимі роботи не враховується стан пари біля поверхні фазового переходу. Метою статті є розглянути існуючу математичну модель ділянки трубчастого газового нагрівача у конденсаційному режимі роботи та внести доповнення з точки зору специфіки фазового переходу. **Методика.** Існуюча математична модель трубчастого газового нагрівача з конденсацією водяної пари включає в себе рівняння збереження маси, руху та енергії. Процеси конденсації пари характеризуються співіснуванням фаз і, як наслідок, наявністю поверхні розділу, в якій течія не підкоряється законам класичної газової динаміки. До розглядання був введено шар розділу фаз – шар Кнудсена, в якому були розглянуті параметри обмінюваної маси при конденсації всередині випромінюючої труби трубчастого газового нагрівача. **Результати.** Встановлено, що на границях шару Кнудсена зміни параметрів обмінюваної маси, а само середньої швидкості, температури та ентальпії відбуваються стрибками. Для визначення цих стрибків необхідно розв'язувати рівняння Больцмана всередині шару Кнудсена і з'єднувати його рішення для зовнішньої області по відношенню до Кнудсівського шару. Граничні умови для шару Кнудсена є граничними умовами до рівнянь газодинаміки. **Наукова новизна.** Для математичної моделі трубчастого газового нагрівача у конденсаційному режимі розглянуто питання можливості врахування нерівноважного стану пари біля поверхні фазового переходу. **Практична значимість.** Розглянуті шляхи визначення параметрів обмінюваних мас при конденсації водяної пари у трубчастому газовому нагрівачу, що дає змогу внести відповідні корективи до існуючої математичної моделі.

Ключові слова: трубчасті газові нагрівачі; математична модель; конденсація водяної пари; шар Кнудсена

К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ УЧАСТКА ТРУБЧАТОГО ГАЗОВОГО НАГРЕВАТЕЛЯ В КОНДЕНСАЦИОННОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ

БЕРЕЗЮК А. Г.^{1*}, *ст. викл.*
ПРОДОВ В. Ф.², *д.т.н. проф.*

^{1*} Кафедра теплотехники и газоснабжения, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-06, e-mail: aberezuik@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4790-3421

² Кафедра теплотехники и газоснабжения, Государственное высшее учебное заведение "Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры", ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днепропетровск, Украина, тел. +38 (0562) 46-98-06, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862

Аннотация. Цель. При сгорании горючих газов в потоке воздуха внутри излучающей трубы обогревателя образуется газозвдушенная смесь, содержащая водяные пары. При движении смеси вдоль трубы ее температура уменьшается, что приводит к конденсации водяных паров из газозвдушенной смеси. Максимальную экономию топлива можно достичь путем использования в конструкции обогревателя режима конденсации водяных паров из газозвдушенной смеси. В процессе конденсации состояние пара вблизи поверхности фазового перехода является неравновесным. В существующей математической модели трубчатого газового нагревателя в конденсационном режиме работы не учитывается состояние пара у поверхности фазового перехода. Целью статьи является рассмотрение существующей математической модели участка трубчатого газового нагревателя в конденсационном режиме работы и внести дополнения с точки зрения специфики фазового перехода. **Методика** .. Существующая математическая модель трубчатого газового нагревателя с конденсацией водяных паров включает в себя уравнения сохранения массы, движения и энергии. Процессы конденсации пара

характеризуются сосуществованием фаз и, как следствие, наличием поверхности раздела, в которой течение не подчиняется законам классической газовой динамики. К рассмотрению был введен слой раздела фаз - слой Кнудсена, в котором были рассмотрены параметры обмениваемой массы при конденсации внутри излучающей трубы трубчатого газового нагревателя. **Результаты.** Установлено, что на границах слоя Кнудсена изменения параметров обмениваемой массы, а именно средней скорости, температуры и энтальпии происходят скачками. Для определения этих скачков необходимо решать уравнения Больцмана внутри слоя Кнудсена и соединять его решения для внешней области по отношению к кнудсеновскому слою. Граничные условия для слоя Кнудсена являются граничными условиями для уравнений газодинамики. **Научная новизна.** Для математической модели трубчатого газового нагревателя в конденсационном режиме рассмотрен вопрос возможности учета неравновесного состояния пара у поверхности фазового перехода. **Практическая значимость.** Рассмотрены пути определения параметров обмениваемых масс при конденсации водяного пара в трубчатых нагревателях, что позволяет внести соответствующие коррективы в существующую математическую модель.

Ключевые слова: трубчатые газовые нагреватели; математическая модель; конденсация водяного пара; слой Кнудсена

TO THE MATHEMATICAL MODELING OF THE AREA OF TUBULAR GAS HEATER IN THE CONDENSING MODE OF WORK

BEREZIUK A. G.^{1*}, *Sen. Inst.*
IRODOV V. F.², *Dr. Sc. (Tech.), Prof*

¹ The department of Heat and Gas Supply, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 46-98-06, e-mail: abereziuk@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-4790-3421

² The department of Heat and Gas Supply, State Higher Education Establishment "Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-A, Chernishevskogo str., Dnipropetrovsk 49600, Ukraine, тел. +38 (0562) 46-98-06, ORCID ID: 0000-0001-8772-9862

Abstract. Purpose. During the combustion of inflammable gases in the air stream, the gas-air mixture, which contains water vapor, is formed inside of the emitting pipe of a heater. While the mixture is moving along the pipe its temperature is decreasing, which leads to the condensation of water vapors from the gas-air mixture. Maximum fuel economy can be achieved through the use of the mode of condensation of water vapor from the gas-air mixture in the construction of the heater. In the process of condensation the condition of vapor near the surface of the phase transition is nonequilibrium. In the existing mathematical model of the tubular gas heater in the condensing mode of operation the state of vapor near the surface of the phase transition is not considered. The purpose of the article is to examine the existing mathematical model of the section of tubular gas heater in the condensing mode of operation and make additions in terms of the specifics of the phase transition. **Methodology.** Existing mathematical model of the tubular gas heater with the condensation of water vapor includes the equations of conservation of mass, motion and energy. The processes of condensation of vapor are characterized by the coexistence of the phases, and as a result, by the presence of the surface of the section, in which the flow does not conform to the laws of classical gas dynamics. The layer of the phase section was taken into the consideration – the Knudsen layer, in which the parameters of exchanged mass with the condensation inside of emitting pipe of the tubular gas heater. **Findings.** It has been found that there are jumps on the borders of the Knudsen layer in the parameter changes of the exchanged mass, such as average speed, temperature and enthalpy. To determine these jumps it is necessary to solve the Boltzmann equations inside of the Knudsen layer and unite his decisions for the outer domain in relation to the Knudsen layer. The boundary conditions for the Knudsen layer are the limiting conditions for the equations of gas dynamics. **Originality.** The question of the possibility of accountability of the nonequilibrium state of vapor near the surface of the phase transition for the mathematical model of the tubular gas heater in the condensing mode has been examined. **Practical value.** The ways of determining the parameters of exchangeable mass during the condensation of water vapor into tubular heaters were examined. It allows to make appropriate adjustments in the existing mathematical model.

Key words: tubular gas heaters; mathematical model; condensation of water vapor; Knudsen layer

Постановка проблеми

Використання трубчастих газових обігрівачів у системах децентралізованого теплопостачання виробничих приміщень забезпечує економію палива і рівномірний розподіл комфортного тепла. При згорянні горючих газів в потоці повітря в середині випромінюючої труби обігрівача утворюється газоповітряна суміш, що містить водяні пари. При

русі суміші вздовж труби її температура зменшується, що призводить до конденсації водяної пари з газоповітряної суміші. Максимальну економію палива можливо досягти шляхом використання в конструкції обігрівача режиму конденсації водяної пари з газоповітряної суміші. У процесі конденсації стан пари поблизу поверхні фазового переходу є нерівноважним. У межах кожної з фаз пара - конденсат справедливі диференціальні рівняння руху

та енергії. На границі фаз виконується деяка умова спряження, яку необхідно враховувати у математичному моделюванні.

Аналіз публікацій

Математичному моделюванню трубчастого газового нагрівача, який може працювати у конденсаційному режимі присвячені роботи [2,3]. У математичній моделі, що надається у цих роботах не враховується нерівноважний стан пари біля поверхні фазового переходу. Дослідження нерівноважних ефектів, які виникають у парі поблизу фазового переходу викладені у [4–13].

Мета

Метою статті є розглянути існуючу математичну модель ділянки трубчастого газового нагрівача у конденсаційному режимі роботи та внести доповнення з точки зору специфіки фазового переходу.

Виклад матеріалу

Існуюча математична модель ділянки трубчастого газового нагрівача з конденсацією водяної пари включає в себе рівняння збереження маси, руху та енергії (без рівняння теплообміну з оточуючим простором).

Рівняння збереження маси:

$$\frac{1}{F} \cdot \frac{d}{dx} (\rho_1 w_1 F) = -m \quad (1)$$

$$\frac{1}{F} \cdot \frac{d}{dx} (\rho_2 w_2 F) = m \quad (2)$$

Рівняння руху:

$$\rho_1 w_1 \frac{dw_1}{dx} = -\alpha_1 \frac{dP}{dx} - m(w_{12} - w_1) - \frac{\Lambda_1}{D_1} \rho_1 \frac{w_1^2}{2} + (\rho_a - \rho_1^0) g dh \quad (3)$$

$$\rho_2 w_2 \frac{dw_2}{dx} = -\alpha_2 \frac{dP}{dx} + m(w_{12} - w_2) - \frac{\Lambda_2}{D_2} \rho_2 \frac{w_2^2}{2} + \rho_2^0 g dh \quad (4)$$

Рівняння енергії:

$$\rho_1 w_1 F d \left(i_1 + \frac{w_1^2}{2} \right) = -m F dx \left[i_{12} - i_1 + \frac{(w_{12}^2 - w_1^2)}{2} \right] - dQ_1 \quad (5)$$

$$\rho_2 w_2 F d \left(i_2 + \frac{w_2^2}{2} \right) = m F dx \left[i_{12} - i_2 + \frac{(w_{12}^2 - w_2^2)}{2} \right] + dQ_1 - dQ_{2w} \quad (6)$$

$$dQ_1 = \pi D dx \alpha_1 (T_1 - T_2) \quad (7)$$

$$dQ_{2w} = \Pi_2 dx \alpha_{2w} (T_2 - T_w) \quad (8)$$

де: m – об'ємна густина розподілених в об'ємі джерел фазового переходу, $\text{кг/м}^3 \cdot \text{с}$;

F – загальна площа перерізу трубопроводу;

ρ_1, ρ_2 – густина газоповітряної суміші та конденсату у двофазному потоці;

w_1, w_2 – середні швидкості газоповітряної суміші та конденсату;

dP – перепад тиску на ділянці довжиною dx ;

Λ_1, Λ_2 – коефіцієнти тертя газоповітряної суміші та конденсату;

D_1, D_2 – еквівалентний діаметр газоповітряної суміші та конденсату;

ρ_a – густина повітря;

ρ_1^0, ρ_2^0 – справжня густина газоповітряної суміші та конденсату;

w_{12} – середня швидкість обмінюваної маси;

i_{12} – ентальпія обмінюваної маси;

Π_2 – змочений периметр рідкого середовища;

dQ_1 – тепловий потік від газоповітряної суміші до конденсату конвекцією;

dQ_{2w} – тепловий потік, який передається конденсатом поверхні трубопроводу;

α_1 – коефіцієнт тепловіддачі від газоповітряної суміші до конденсату;

α_{2w} – коефіцієнт тепловіддачі від конденсату до поверхні труби;

T_1, T_2 – температури газоповітряної суміші та конденсату;

T_w – температура поверхні повітропроводу.

До представлені моделі входять параметри w_{12}, i_{12} обмінюваних мас. У рамках моделі двох суцільних середовищ ці параметри жодним чином не визначаються. Середню швидкість та ентальпію обмінюваної маси можливо визначити із інших джерел або на підставі додаткових математичних моделей.

Процеси конденсації пари характеризуються співіснуванням фаз і, як наслідок, наявністю поверхні розділу. В механіці суцільних середовищ товщиною цієї поверхні нехтують. Вважається, що на поверхні розділу властивості змінюються стрибками. Внаслідок цього в загальному випадку задачі теплообміну при конденсації відносяться до спряжених задач, в яких процеси теплообміну, що відбуваються в суміжних фазах, взаємозв'язані.

При конденсації пари залежне від природи середовищ та стану має місце взаємодія молекул з поверхнею, що визначає зв'язок функцій розподілу

падаючих і відбитих молекул. Частина молекул, що вдаряються об поверхню конденсату конденсується, а решта відбиваються назад в пар. Отже, біля стінки утворюється шар, товщиною порядку довжини вільного пробігу молекул, який у кінетичній теорії прийнято називати шаром Кнудсена. Течія у шарі Кнудсена не підкоряється законам газової динаміки, тому визначення середньої швидкості обмінюваної маси викликає певні складнощі. Визначити цю швидкість можливо із залученням кінетичної теорії газів, а само рішенням рівняння Больцмана в шарі Кнудсена.

Введемо до розглядання шар розділу фаз – шар Кнудсена. На рис. 1 наводиться ймовірний профіль швидкості руху на ділянці теплообміну газоповітряної суміші і конденсату всередині випромінюючої труби трубчастого газового нагрівача.

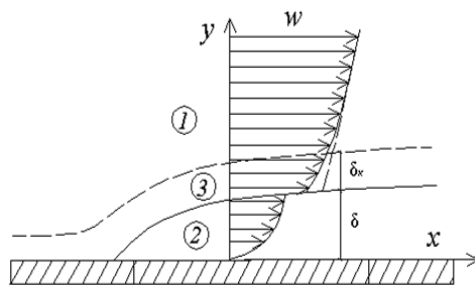


Рис. 1. Ймовірний профіль швидкості руху двофазного потоку / A possible profile speed of the two-phase flow:

- 1 – газоповітряна суміш (газоподібна фаза);
2 - конденсат (рідка фаза); 3 – шар Кнудсена;
 δ – товщина плівки конденсату; δ_k – товщина шару Кнудсена.

На рис. 1 суцільною кривою показано ймовірна зміна швидкості двофазного потоку при русі вздовж труби. Двофазний потік поділяється на три області: газоповітряна суміш, конденсат та шар Кнудсена. У областях 1 та 2 кінетичне рівняння Больцмана з достатньою точністю описується рівнянням Нав'є - Стокса, тобто з позиції механіки суцільного середовища. На верхньої межі шару Кнудсена за законами відбиття молекул відбувається ймовірне гальмування газу на поверхні розділу фаз. Пунктирна лінія, дотична до розподілу швидкості показує швидкість у шарі Кнудсена без гальмування. На межі шару Кнудсена та конденсату спостерігається стрибок швидкості, який обумовлений переносом маси через фазову границю.

У загальному випадку [6, 9]:

$$w_1 = w_2 + \Delta w_{cm} \quad (9)$$

де: w_1 , w_2 – середні швидкості газоповітряної суміші та конденсату;

Δw_{cm} – стрибок дотичної складової швидкості (ковзання фаз).

Стрибок швидкості чи швидкість ковзання Δw_{cm} залежить від густини потоку маси, який проходить крізь фазову границю. У граничному випадку Δw_{cm} може прямувати до нуля.

Крім стрибка швидкості у шарі Кнудсена відбувається стрибок температури [5, 7, 8]:

$$T_1 = T_2 + \Delta T_{cm} \quad (10)$$

де: T_1 , T_2 – температури газоповітряної суміші та конденсату;

ΔT_{cm} – стрибок температури у шарі розділу фаз.

Оскільки ентальпія є функцією температури, то її визначення залежить від температур газоподібної та рідкої фаз. Слід зазначити, що значення ентальпій газоподібної та рідкої фаз дуже відрізняються одне від одного. Це пов'язано з тим, що у значенні ентальпії пари враховується теплота пароутворення, а в ентальпії конденсату ця теплота не враховується, завдяки чому при конденсації пари виділяється додаткова теплота. Все це призводить до стрибку ентальпії у шарі розділу фаз:

$$i_1 = i_2 + \Delta i_{cm} \quad (11)$$

де: i_1 , i_2 – ентальпії газоповітряної суміші та конденсату;

Δi_{cm} – стрибок ентальпії.

Для знаходження стрибків Δw_{cm} , ΔT_{cm} , Δi_{cm} необхідно розв'язувати рівняння Больцмана всередині шару Кнудсена і з'єднувати його рішення для зовнішньої області по відношенню до кнудсівського шару. Граничні умови для шару Кнудсена є граничними умовами до рівнянь газодинаміки.

Наукова новизна і практична значимість

Для математичної моделі трубчастого газового нагрівача у конденсаційному режимі розглянуто питання можливості врахування нерівноважного стану пари біля поверхні фазового переходу. Для цього був введений шар Кнудсена, в межах якого виявляються неправомірними звичайні макроскопічні характеристики і побудовані на їх основі рівняння переносу. Розглянуті шляхи визначення параметрів обмінюваних мас при конденсації водяної пари у трубчастому газовому нагрівачу, що дає змогу внести відповідні корективи до існуючої математичної моделі.

Висновки

1. Параметри обмінюваних мас при конденсації водяної пари у трубчастому газовому нагрівачу у рамках моделі двох суцільних середовищ жодним чином не визначаються.

2. Згідно загального методологічного підходу для математичного моделювання процесів випаровування та конденсації поблизу межі розділу фаз виникає характерний шар протяжністю кілька довжин вільного пробігу молекул, який у кінетичній теорії прийнято називати шаром Кнудсена, в межах якого виявляються несправомірними звичайні макроскопічні

характеристики і побудовані на їх основі рівняння переносу.

3. До математичної моделі трубчастого газового нагрівача необхідно додати рівняння кінетичної теорії газу для шару Кнудсена.

СПИСОК ВИКОРАСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Абрамович, Г. Н. Прикладная газовая динамика: учеб. руководство: Для вузов / Г. Н. Абрамович. – 5-е изд., перераб. – Москва: Наука, 1991. – 600 с.

Abramovich G. N. *Prikladnaja gazovaja dinamika* [Applied gas dynamics]. Moscow, Science Publ., 1991. 600 p.

2. Березюк, А. Г. Математическое моделирование трубчатого газового нагревателя с учетом конденсации водяного пара из газозвдушной смеси / А. Г. Березюк, В. В. Ткачова, В. Ф. Иродов // *Zbiur raportuw naukowych. «Naykowe prace, praktyka, obracomania, innowacje»* - Zakopane: Wydawca: Sp. z o.o. «Diamond trading tour», 2013. – S.- 7-13.

Berezjuk A. G. , Tkachova V. V., Irodov V. F. *Matematicheskoe modelirovanie trubchatogo gazovogo nagrevatelja s uchetom kondensacii vodjanogo para iz gazovozdushnoj smesi* [Mathematical modeling of the tubular gas heater based on the condensation of water vapor from the gas concoction]. *Zbiur raportuw naukowych. «Naykowe prace, praktyka, obracomania, innowacje»* [Zbiur raportuw research. "Naykowe work, practice, obracomania, innovations"], 2013, pp. 7–13.

3. Березюк, Г. Г. Математичне моделювання ділянки трубчастого газового нагрівача у конденсаційному режимі роботи / Г. Г. Березюк, В. Ф. Иродов // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. – Дніпропетровськ, ПГАСА, 2014. – Вип. 5. – С. – 6–9.

Berezjuk H. H., Irodov V. F. *Matematychno modelyuvannya dilyanky trubchatoho hazovoho nahrivacha u kondensatsionomu rezhymi roboty* [Mathematical modeling of the area of tubular gas heater in the condensing mode of work]. *Visnyk Prydniprovskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture], 2014, issue 5, pp. 6–9.

4. Зудин, Ю. Б. Приближенный кинетический анализ интенсивной конденсации [Электронный ресурс] / Ю. Б. Зудин // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2015. – Вып 1. – С. 73-85. – Режим доступа: <http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=162998>. – Загл. с экрана. – Проверено : 5.09.2015.

Zudin, Yu. B. *Priblizhennyi kineticheskii analiz intensivnoi kondensatsii* (An approximate kinetic analysis of intense condensation). *Teplofizika i aeromekhanika - Thermophysics and Aeromechanics*, 2015, issue 1, pp. 78-85. Available at: <http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=162998><http://sibran.ru/journals/issue.php?ID=162998>. (Accessed 5 September 2015).

5. Кузнецова, И. А., Влияние коэффициента испарения на сильную конденсацию одноатомного газа [Электронный ресурс] / И. А. Кузнецова, А. А. Юшканов, Ю. И. Яламов // *Журнал технической физики*. – 1997. – Т. 67. – №. 10. – С. 21–25. Режим доступа: https://scholar.google.com.ua/scholar?cluster=11666693278634597777&hl=ru&as_sdt=0,5. – Загл. с экрана. – Проверено : 7.09.2015.

Kuznetsova I. A., Yushkanov A. A., Yalamov Yu. I. *Vliyanie koeffitsienta ispareniiya na sil'nyuyu kondensatsiyu odnoatomnogo gaza* (Effect of the evaporation of a strong gas condensing monohydric). *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki – Technical Physics*, 1997, no. 10, pp. 21–25 Available at: https://scholar.google.com.ua/scholar?cluster=11666693278634597777&hl=ru&as_sdt=0,5. (Accessed 7 September 2015).

6. Куліченко, В. Р. Теплопередача з елементами масообміну (теорія і практика процесу): підруч. для студентів ВНЗ / В. Р. Куліченко, О. Ю. Шевченко, В. А. Піддубний. – Київ : Фенікс, 2014. – 918 с.

V. R. Kulichenko, O. Yu. Shevchenko, V. A. Piddubnyi *Teploperedacha z elementamy masoobminu (teoriia i praktyka protsesu)* [Heat transfer with elements mass transfer(teoriya and practice processes)]. Kiev, Phoenix Publ., 2014. 918 p.

7. Лабунцов, Д. А. Физические основы энергетики. Избранные труды по теплообмену, гидродинамике, термодинамике / Д. А. Лабунцов – Москва: Издательство МЭИ, 2000. – 388 с.

Labuncov D. A. *Fizicheskie osnovy jenergetiki. Izbrannye trudy po teploobmenu, gidrodinamike, termodinamiki* [Physical bases of energetics. Selected works on heat exchange, fluid dynamics, thermodynamics]. – Moscow: MEI Publ., 2000. 388 p.

8. Макашев, Н. К. Испарение, конденсация и гетерогенные химические реакции при малых значениях Кнудсена / Н. К. Макашев // *Ученые записки ЦАГИ*. – 1974. т. 5, №. 3. – С. 49–62.

Makashev N. K. *Isparenie, kondensacija i geterogennye himicheskie reakcii pri malyh znachenijah Knudsena* [Evaporation, condensation and heterogeneous chemical reactions at small values Knudsen]. *Uchenye zapiski CAGI - TsAGI Scientific Notes*, 1974, vol. 5, no 3, pp. 49–66.

9. Черчиньяни, К. Теория и приложения уравнения Больцмана: Пер. с англ. / Под. ред. Р. Г. Баранцева – Москва: Мир, 1978. – 495 с.

Cherchin'yanі K. *Teorija i prilozhenija uravnenija Bol'cmana* [Theory and applications of the Boltzmann equation]. Moscow: Mir Publ., 1978. 495 p.

10. Bond M. Mean evaporation and condensation coefficients based on energy dependent condensation probability [Virtual Resource] / Maurice Bond, Henning Struchtrup // *The American Physical Society*. – 2004. – 21 p. – Access Mode : www.engr.uvic.ca/~struchtr/2004PRE_evap.pdf. – Title from Screen. – Date of Access: 9 September 2015.

Maurice Bond, Henning Struchtrup *Mean evaporation and condensation coefficients based on energy dependent condensation probability. The American Physical Society*, 2004. 21 p. Available at: www.engr.uvic.ca/~struchtr/2004PRE_evap.pdf. (Accessed 9 September 2015).

11. E. A. T. van den Akker *Thermodynamic analysis of molecular dynamics simulation of evaporation and condensation* [Virtual Resource] / E. A. T. van den Akker, A. J. H. Frijns, A. A. van Steenhoven, P. A. J. Hilbers // *5th European Thermal-Sciences Conference, The Netherlands*. – 2008 – 8 p. – Access Mode :

http://www.eurotherm2008.tue.nl/Proceedings_Eurotherm2008/papers/Micro_Nano-scale_Heat_Transfer/MNH_14.pdf. – Title from Screen. – Date of Access: 9 September 2015.

E. A. T. van den Akker, A. J. H. Frijns, A. A. van Steenhoven, P. A. J. Hilbers Thermodynamic analysis of molecular dynamics simulation of evaporation and condensation *5th European Thermal-Sciences Conference, The Netherlands, 2008/ 8 p.* Available at: http://www.eurotherm2008.tue.nl/Proceedings_Eurotherm2008/papers/Micro_Nano-scale_Heat_Transfer/MNH_14.pdf. (Accessed 10 September 2015).

12. Mashukin, V.I. Boundary conditions for gas-dynamical modeling of evaporation processes [Virtual Resource] / V. I. Mashukin, A. A. Samokhin // X International Seminar "Mathematical Models & Modeling in Laser-Plasma Processes & Advanced Science Technologies". – 2012. - Vol XXIV – pp. 8–11.– Access Mode : [http://lppm3.ru/files/journal/XXIV/MathMontXXIV-](http://lppm3.ru/files/journal/XXIV/MathMontXXIV-Mazhukin.pdf)

Mazhukin.pdf. – Title from Screen. – Date of Access: 10 September 2015.

Mashukin V. I., Samokhin A. A. Boundary conditions for gas-dynamical modeling of evaporation processes. *International Seminar "Mathematical Models & Modeling in Laser-Plasma Processes & Advanced Science Technologies"*, 2012. pp. 8–11. Available at: <http://lppm3.ru/files/journal/XXIV/MathMontXXIV-Mazhukin.pdf>. (Accessed 10 September 2015).

13. Sone, Y. Kinetic theory of and fluid dynamics. *Modeling and Simulation in Science, Engineering and Technology / Yoshio Sone* – Springer Science & Business Media, 2012 – 353 p.

Sone Y. Kinetic theory of and fluid dynamics. *Modeling and Simulation in Science, Engineering and Technology*. Springer Science & Business Media, 2012, 353 p. http://www.dissland.com/catalog/obobshchennaya_teoriya_teploperenosa_v_gazovoy_srede_pri_vseh_chislah_knudsen.html

Статья рекомендована до публикации д-ром. техн. наук, проф. С. З. Полищуком (Украина); д-ром. техн. наук, проф. А. С. Беліковим (Украина)

Статья поступила в редколлегию 10.09.2015

УДК 628.543:628.16.08

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ И УДАЛЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ЖЕЛЕЗА ИЗ СТОЧНЫХ ВОД

ВЫСОЦКИЙ С. П.¹, *д.т.н, проф.*,
СТЕПАНЕНКО Т. И.^{2*}, *ассистент*

¹ Кафедра охраны труда, безопасности жизнедеятельности и гражданской защиты, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ул. Державина, 2, 86123, Макеевка, Украина

^{2*} Кафедра охраны труда, безопасности жизнедеятельности и гражданской защиты, Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, ул. Державина, 2, 86123, Макеевка, Украина, тел. +38 (050) 216-18-94, e-mail: tatyana_stepanenko@list.ru, РИНЦ SPIN-код: 2094-0277

Аннотация. *Целью работы* является определение влияния pH на растворимость тяжелых металлов: железа, алюминия, никеля и хрома, обоснование причин повышения содержания соединений железа после предочистки в системах подготовки воды, а также влияния температуры и концентрации кислоты в сточных водах металлургических производств на степень и скорость осаждения соединений железа. **Методика.** Выполнение исследований включало использование аналитических методов определения соединений металлов с применением модельных растворов в лабораторных условиях, а также определение условий осаждения соединений железа из промышленных сточных вод металлургических производств в зависимости от концентрации кислоты и температуры растворов. **Результаты исследований.** Процесс осаждения тяжелых металлов из сточных вод наиболее целесообразно осуществлять с использованием извести. Значения оптимального pH, при котором имеет место минимальная концентрация отдельных металлов, существенно отличается. При превышении оптимального значения pH остаточная концентрация металла увеличивается. **Научная новизна.** Определены оптимальные условия осаждения тяжелых металлов. Выведены аналитические зависимости и приведена интерпретация причин повышения содержания железа на промышленных установках. Определены характеристики осаждения соединений железа из растворов в зависимости от концентрации кислоты и температуры раствора. Приведены аналитические зависимости, характеризующие влияние указанных факторов на процесс осаждения. **Практическая значимость.** Тяжелые металлы являются источником загрязнения питьевой воды и технологических вод промышленных предприятий. Оптимизация условий удаления металлов из водных растворов является важным условием сохранения здоровья человека и повышения надежности работы предприятия.

Ключевые слова: тяжелые металлы, реагентный метод, сточные воды, известь, соединения железа.