

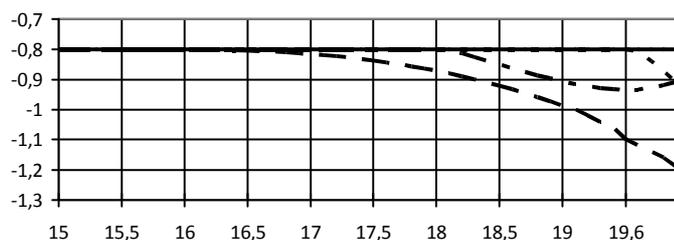
$u_y \cdot 10^3 \text{ см}$ 

Рис. 4 – Перемещения на участке основания 15 – 20 см. контактной зоны зависит от формы и глубины врезов.

Список литературы: 1. Рвачев В.Л., Синекоп Н.С. Метод R -функций в задачах теории упругости и пластичности. – Киев: Наук. думка, 1990. – 216 с. 2. Тарсис Е.Ю. Решение односторонних контактных задач теории упругости вариационно-структурным методом для смешанного функционала Рейсснера // Динамика и прочность машин. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 57. – С. 16 – 23. 3. Тарсис Е.Ю. Контактная задача для плоского тела с односторонними жесткими ограничениями // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков: НТУ «ХПИ», 2001. – № 6 – С. 251 – 255. 4. Тарсис Е.Ю. Вариационно-структурный метод решения плоской контактной задачи теории упругости // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 18. – С. 167 – 178. 5. Рвачев В.Л., Тарсис Е.Ю. Вариационно-структурный метод для решения задач теории упругости на основе функционала Рейсснера // Вісник Інженерної академії України. – Київ, 2001. – № 3. – С. 17 – 20. 6. Рвачев В.Л. Теория R -функций и некоторые ее приложения. – Киев: Наук. думка, 1982. – 552 с. 7. Тарсис Е.Ю. Исследование эффективности вариационно-структурного метода для функционала Рейсснера в смешанных задачах теории упругости // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1999. – Вып. 29. – С. 34 – 42.

Bibliography (transliterated): 1. Rvachjov, V. L., and N. S. Sinekop. *Metod R -funkcij v zadachah teorii uprugosti i plastichnosti*. Kiev: Nauk. dumka, 1990. Print. 2. Tarsis, E. Ju. "Reshenie odносторонnih kontaktnyh zadach teorii uprugosti variacionno-strukturnym metodom dlja smeshannogo funkcionala Rejssnera." *Dinamika i prochnost' mashin*. No. 57. Kharkov: KhGPU, 2004. 16–23. Print. 3. Tarsis, E. Ju. "Kontaktnaja zadacha dlja ploskogo tela s odносторонnimi zhestkimi ogranichenijami." *Vestnik NTU «KhPI»*. No. 6. Kharkov: NTU «KhPI», 2001. 251–255. Print. 4. Tarsis, E. Ju. "Variacionno-strukturnyj metod reshenija ploskoj kontaktnoj zadachi teorii uprugosti." *Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «KhPI»*. No. 18. Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. 167–178. Print. 5. Rvachjov, V. L., and E. Ju. Tarsis. "Variacionno-strukturnyj metod dlja reshenija zadach teorii uprugosti na osnove funkcionala Rejssnera." *Visnyk Inženiernoi akademii' Ukrainy*. No. 3. Kiev. 2001. 17–20. Print. 6. Rvachjov, V. L. *Teorija R -funkcij i nekotorye ejo prilozhenija*. Kiev: Nauk. dumka, 1982. Print. 7. Tarsis, E. Ju. "Issledovanie jeffektivnosti variacionno-strukturnogo metoda dlja funkcionala Rejssnera v smeshannyh zadachah teorii uprugosti." *Vestnik Khar'kovskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta*. No. 29. Kharkov: KhGPU, 1999. 34–42. Print.

Поступила (received) 26.09.2015

Тарсис Катерина Юр'ївна – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: (057) 707-60-87; e-mail: ytarsis@mail.ru.

Тарсис Екатерина Юрьевна – кандидат физико-математических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (057) 707-60-87; e-mail: ytarsis@mail.ru.

Tarsis Yekaterina Yur'yevna – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Kharkov; tel.: (057) 707-60-87; e-mail: ytarsis@mail.ru.

УДК 628.477 : 519.876.5

Ю. В. ШАХОВ, И. И. ПЕТУХОВ, В. В. ВАМБОЛЬ

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Рассмотрено решение одного из проблемных вопросов, связанных с утилизацией отходов, а именно разделение многокомпонентных газовых смесей, образующихся при их газификации. Выполнено математическое описание процессов, происходящих в энерготехнологической установке разделения многокомпонентных газовых смесей, образующихся при газификации отходов, с целью получения продукции целевого назначения. В данной части исследования представлены математические модели таких функциональных элементов энерготехнологической установки, как насос, детандер и рекуперативный теплообменник. В исследовании описана модель энерготехнологической установки как единого целого, которая является исполнительной частью системы управления экологической безопасностью при утилизации отходов. Предложена методика расчета сложных энерготехнологических схем.

Ключевые слова: утилизация, отходы, экологическая безопасность, математическое моделирование, двухфазная многокомпонентная среда.

Введение. Основными принципами государственной политики в сфере обращения с отходами (ст. 5 [1]) является приоритетная защита окружающей среды и здоровья человека от негативного воздействия отходов, обеспечение экономного использования материально-сырьевых и энергетических ресурсов, научно обоснованное согласование экологических, экономических и социальных интересов общества относительно образования и использования отходов.

© Ю. В. Шахов, И. И. Петухов, В. В. Вамболь, 2015

Результатом развития науки и технического обеспечения для создания новых видов материалов является образование большого количества таких отходов, которые приводят к увеличению антропогенной нагрузки на окружающую природную среду (ОПС). Накопление таких отходов на полигонах и несанкционированных местах их скопления снижает уровень экологической безопасности. Для их утилизации наиболее часто применяют термические методы, среди которых наиболее полное разложение материалов отходов на простые вещества обеспечивает газификация. Процесс газификации отходов отличается значительной сложностью и предполагает затраты, сопоставимые со стоимостью производства первичной продукции, а в отдельных случаях, существенно превышает ее. Снизить эти затраты позволяет реализация системы управления экологической безопасностью (СУЭБ) при утилизации отходов. Одним из компонентов данной системы является энерготехнологическая установка (ЭТУ). Она предназначена для разделения многокомпонентных газовых смесей (МГС), и получения топливных продуктов, которые могут быть направлены на поддержание процесса газификации.

В настоящей работе представлено математическое описание ЭТУ для разделения МГС, являющейся частью комплекса энергетических и технологических блоков для утилизации отходов.

Анализ литературных источников. Авторами разработан комплекс ЭТУ для утилизации отходов, в основу функционирования которых положен способ смешанной газификации отходов, описанный в работах [2 – 5]. Математическое моделирование процессов в отдельных агрегатах комплекса представлено в работах [6 – 12]. Комплекс реализует технологическую (исполнительную) часть СУЭБ при утилизации отходов, описанную в работах [3, 5]. Важным является то, что данная СУЭБ построена на основе принципа многоуровневой декомпозиции и системного подхода, как и СУЭБ для пылеподавления, использующая многофазные дисперсные структуры [13]. Описанный подход использован также для построения СУЭБ в процессе эксплуатации энергетических установок (ЭУ) с поршневыми двигателями внутреннего сгорания (ДВС) [14, 15].

Цель и задачи исследования. Целью исследования является математическое описание функциональных элементов сложной энерготехнологической установки для разделения многокомпонентных газовых смесей, образующихся при газификации отходов.

Объектом исследования является многокомпонентные газовые смеси, образующиеся при газификации отходов.

Предметом исследования является математические зависимости, описывающие процесс функционирования комплекса энерготехнологической установки для утилизации отходов.

Для достижения цели исследования были поставлены и решены следующие задачи:

- выполнено описание функциональных элементов сложной ЭТУ разделения МГС;
- выполнено математическое описание отдельных функциональных элементов ЭТУ, в частности насоса, детандера и рекуперативного теплообменника.

Функциональные элементы сложной энерготехнологической установки для разделения многокомпонентных газовых смесей. Рассматривая технологический процесс охлаждения генераторного газа в установке утилизации твердых бытовых и опасных отходов, необходимо теоретически описать ее функциональные элементы.

Математическая модель ЭТУ для разделения многокомпонентных газовых смесей включает систему уравнений, описывающих процессы в функциональных элементах ЭТУ, а также связи между этими элементами. Уравнения, описывающие параметры отдельных функциональных элементов, объединяются в системы уравнений, являющиеся математическими моделями этих функциональных элементов. В качестве исходных параметров и допущений было принято следующее:

- величина недорекуперации в теплообменниках, оцениваемая как разность температур потоков в *пункте* (минимальная), $\Delta T_{\text{мин}} = 5 \text{ К}$;
- температура окружающей среды $\Delta T_{\text{OC}} = 298 \text{ К}$;
- изоэнтропийный коэффициент полезного действия (КПД) детандера $\eta_{\text{д}} = 60 \text{ %}$;
- изоэнтропийный КПД насоса $\eta_{\text{н}} = 75 \text{ %}$;
- изоэнтропийный КПД компрессора $\eta_{\text{к}} = 75 \text{ %}$;
- величина гидравлических потерь в элементах блока низкотемпературного разделения газа принимается равной нулю;
- теплообменом функциональных элементов схемы и соединительных трубопроводов с окружающей средой пренебрегаем.

При расчете параметров многофазных многокомпонентных потоков используется комплект подпрограмм расчетов коэффициентов теплофизических свойств рабочих тел, базирующийся на *уравнении состояния Пенга-Робинсона*. Для достоверного расчета параметров блока низкотемпературного разделения были разработаны математические модели следующих функциональных элементов: турбодетандер; рекуперативный теплообменник; насос. Для возможности реализации сложных схем введены вспомогательные элементы – разделитель потока и смеситель.

Математическая модель расчета насоса. Расчет насоса для сжатия теплоносителя до давления в испарителе сводится к определению потребной мощности привода насоса и температуре на выходе из насоса.

Мощность насоса определяется из следующего соотношения:

$$N_P = (H_H \cdot Q_T) / \eta_P, \quad (1)$$

где $H_H = P_1 - P_2$ – напор, создаваемый насосом, Па; P_1, P_2 – давление на входе и на выходе насоса, Па; Q_T – объемный расход перекачиваемого насосом теплоносителя, м³/с; η_P – адиабатический коэффициент полезного действия насоса.

Для насоса, работающего на постоянных оборотах, напорная характеристика может выглядеть в виде полинома:

$$H_H = A_H + B_H \cdot Q_T + C_H \cdot Q_T^2 + D_H \cdot Q_T^3 + \dots,$$

где A_H, B_H, C_H, D_H – коэффициенты полинома, характеризующие напорную характеристику данной модели насоса.

Аналогично представляется характеристика КПД насоса:

$$\eta_P = a_H + b_H \cdot Q_T + c_H \cdot Q_T^2 + d_H \cdot Q_T^3 + \dots,$$

где a_H, b_H, c_H, d_H – коэффициенты полинома, характеризующие КПД данной модели насоса.

Для расчета температуры теплоносителя на выходе из насоса используется соотношение

$$N_P = M_T \cdot (i_T(P_2, T_2) - i_T(P_1, T_1)), \quad (2)$$

где i_T – энтальпия теплоносителя при заданных давлении P и температуре T ; $M_T = Q_T \cdot \rho_T$ – расход перекачиваемого насосом теплоносителя; ρ_T – плотность теплоносителя.

Математическая модель расчета детандера. Для расчета детандера используется адиабатическая модель, в которой в качестве исходных данных используются давление и температура потока на входе в детандер, давление на выходе из детандера, расход рабочего тела и адиабатический коэффициент полезного действия детандера.

Энтальпия идеального процесса расширения определяется из условия адиабатического расширения потока:

$$i_{T2_ид} = i_T(P_2, S_1), \quad (3)$$

где S_1 – удельная энтальпия потока на входе в детандер, определяемая по известным входным температуре T_1 и давлению P_1 .

Тогда мощность, получаемая в идеальном детандере при адиабатическом процессе расширения составляет

$$N_{ид_дет} = (i_{T2_ид} - i_T(P_1, T_1)) \cdot M_T. \quad (4)$$

Действительная полезная мощность, снимаемая с вала детандера, определяется равенством

$$N_{реал_дет} = N_{ид_дет} \cdot \eta_{дт}. \quad (5)$$

Энтальпия на выходе из детандера в реальном процессе (с учетом потерь) определяется формулой

$$i_T(P_4, T_4) = i_T(P_3, T_3) - N_{реал_дет} / M_T. \quad (6)$$

Данные соотношения позволяют рассчитать температуру газа на выходе из детандера.

Математическая модель расчета рекуперативного теплообменника. Математическая модель расчета рекуперативного теплообменника в наиболее общем случае предполагает существование как прямого, так и обратного потока в жидком, двухфазном и парообразном состоянии. Решение частных задач допускает более простые случаи относительного фазового состояния теплоносителей. Поэтому для расчета рекуперативного теплообменника при принятых нами допущениях производится его условное расчленение по потоку на две секции: в первой секции прямой поток теплоносителя прогревается до температуры насыщения (температуры в пинч-точке), во второй секции теплоноситель меняет свое фазовое состояние и перегревается. Аналогично для обратного потока происходит охлаждение парообразной фазы до температуры конденсации, затем теплоноситель конденсируется и продолжает охлаждаться в виде жидкости. Дополнительные сложности связаны со свойствами многокомпонентных сред. В частности, температура испарения (или конденсации) однокомпонентного рабочего тела при постоянном давлении является величиной постоянной, тогда как для многокомпонентной смеси в ходе испарения или конденсации происходит изменение температуры процесса. Таким образом, при расчете рекуперативного теплообменника с фазовыми переходами теплоносителей обязательным является нахождение положения пинч-точки, определяемое температурой и давлением каждого из теплоносителей на входе в теплообменник, а также расходом теплоносителей. Для каждой из частей записывается система уравнений. Для первой секции:

$$Q_{исп1} = M_{п} \cdot (i_{п}(T_{п_пп}) - i_{п}(T_{п_ин})), \quad (7)$$

$$Q_{ISP1} = M_O \cdot (i_O(T_{O_PP}) - i_O(T_{O_EX})), \quad (8)$$

$$Q_{ISP1} = k_{ISP1} \cdot F_{ISP1} \cdot \overline{\Delta T}_{ISP1}, \quad (9)$$

где $T_{П_PP}$, T_{O_PP} – температуры соответственно прямого и обратного потоков теплоносителей в пинч-точке; $T_{П_IN}$ – температура прямого потока на входе в рекуперативный теплообменник; T_{O_EX} – температура обратного потока на выходе из рекуперативного теплообменника; $M_{П}$, M_O – расход прямого и обратного потока теплоносителей; F – площадь теплообменной поверхности; k – средний коэффициент теплопередачи теплообменника, принимается из литературных источников; $i_{П}$ – удельная энтальпия теплоносителя прямого потока при заданной температуре T ; i_O – удельная энтальпия теплоносителя обратного потока при заданной температуре T ; $\overline{\Delta T}$ – среднее значение температурного напора теплообменника. Индекс *ISP1* обозначает секцию испарителя, в которой осуществляется подогрев теплоносителя до температуры насыщения.

Поскольку в данном расчете не задаются геометрические параметры теплообменников, то площадь F уточняется в процессе итераций заданным значением коэффициента k . Цель расчета – получить достоверное (или приемлемое с технической точки зрения) значение площади F .

Температура прямого потока теплоносителя в пинч-точке определяется как температура насыщения при известном давлении прямого потока $P_{П}$ (для многокомпонентного потока – температура начала процесса испарения):

$$T_{П_PP} = T_{T_SAT}(P_{П}). \quad (10)$$

Соответственно температура обратного потока в пинч-точке

$$T_{O_PP} = T_{П_PP} + \Delta T_{MIN}. \quad (11)$$

Для нахождения величины среднего значения температурного напора теплообменника используется следующее соотношение

$$\overline{\Delta T}_{ISP1} = \frac{(T_{O_PP} - T_{П_PP}) - (T_{O_EX} - T_{П_IN})}{\ln\left(\frac{(T_{O_PP} - T_{П_PP})(T_{O_EX} - T_{П_IN})}{(T_{O_EX} - T_{П_PP})(T_{O_PP} - T_{П_IN})}\right)}. \quad (12)$$

Система уравнений для второй секции имеет аналогичный вид:

$$Q_{ISP2} = M_{П} \cdot (i_{П}(T_{П_EX}) - i_{П}(T_{П_PP})), \quad (13)$$

$$Q_{ISP2} = M_O \cdot (i_O(T_{O_IN}) - i_O(T_{O_PP})), \quad (14)$$

$$Q_{ISP2} = k_{ISP2} \cdot F_{ISP2} \cdot \overline{\Delta T}_{ISP2}. \quad (15)$$

Индекс *ISP2* обозначает секцию рекуперативного теплообменника, в которой осуществляется испарение и перегрев прямого потока теплоносителя.

Для нахождения величины среднего значения температурного напора теплообменника используется следующее соотношение:

$$\overline{\Delta T}_{ISP2} = \frac{(T_{O_IN} - T_{П_EX}) - (T_{O_PP} - T_{П_PP})}{\ln\left(\frac{(T_{O_IN} - T_{П_EX})(T_{O_PP} - T_{П_PP})}{(T_{O_PP} - T_{П_EX})(T_{O_IN} - T_{П_PP})}\right)}. \quad (16)$$

Последующие части исследования будут посвящены построению замыкающих соотношений, а также вспомогательным расчетам по моделированию тепломассообмена и гидравлического сопротивления течения в трубах однофазного потока. В дальнейшем планируется построение математической модели расчета теплообменника-охладителя (аппарата воздушного охлаждения); компрессора, сепаратора, ректификационной колонны и разделителя ЭТУ.

Выводы. Таким образом, в данной работе приведены следующие результаты исследования.

Описана разработанная энерготехнологическая установка для разделения многокомпонентных газовых смесей, образующихся в процессе газификации отходов, которая является исполнительным технологическим звеном системы управления экологической безопасностью при их утилизации. А именно, описаны технологические процессы разделения многокомпонентных газовых смесей и охлаждения генераторного газа.

Разработаны математические модели функциональных элементов описанной энерготехнологической установки для разделения многокомпонентных газовых смесей, образующихся в процессе газификации отходов. В данной части исследования приведены математические модели насоса, детандера и рекуперативного теплообменника.

В последующих частях исследования будут приведены математические модели других элементов комплекса: теплового и гидродинамического расчета аппарата воздушного охлаждения, компрессора, сепаратора, ректификационной колонны, разделителя, смесителя. Там же будут приведены основные составляющие

математической модели функционирования комплекса в целом: постановка задачи моделирования и основные допущения, система основных уравнений, замыкающие соотношения, вспомогательные расчеты, и сам численный метод расчета параметров комплекса. Предложена методика расчета сложных энерготехнологических схем.

С использованием результатов проведенных расчетов и на основе предложенных схем блоков разделения газа предложены различные варианты получения топливного газа и целесообразность реализации предложенного технологического процесса утилизации отходов.

Список литературы: 1. Закон України № 187/98 «Про відходи» від 05.03.1998 р., у редакції станом на 28.06.2015 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/187/98-%D0%B2%D1%80>. 2. Нечипорук Н.В., Эрсамбетов В.Ш. Альтернативная технология утилизации отходов жизнедеятельности // Экологична безпека. – Кременчук: КрНУ, 2012. – Вып. 2(14). – С. 80 – 84. 3. Кобрин В.Н., Нечипорук Н.В., Вамболь В.В. Система управления экологической безопасностью при утилизации твердых бытовых и производственных отходов // Экологична безпека. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вып. 2(18). – С. 25 – 30. 4. Чубенко А.С., Кобрин В.Н., Вамболь В.В. Экологически чистая утилизация отходов жизнедеятельности // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАУ «ХАИ», 2013. – Вып. 62. – С. 98 – 102. 5. Вамболь В.В., Кобрин В.Н., Нечипорук Н.В. Обеспечение экологической безопасности при обращении с отходами // Междунар. науч.-исслед. журнал. – Екатеринбург, 2014. – № 11 – 2 (30). – С. 8 – 10. 6. Вамболь В.В., Костюк В.Е., Кирилай Е.И. Численное моделирование процесса охлаждения генераторного газа установки утилизации твердых бытовых и опасных отходов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАУ «ХАИ», 2014. – Вып. 66. – С. 178 – 187. 7. Вамболь В.В. Математическое моделирование газовой фазы охлаждения генераторного газа установки утилизации отходов жизнедеятельности // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського: зб. наук. праць. – Кременчук: КрНУ, 2014. – № 6/2014 (89). – Ч. 1. – С. 148 – 152. 8. Вамболь В.В. Моделирование газодинамических процессов в блоке охлаждения генераторного газа установки для утилизации отходов [Электронный ресурс] // Технологии техносферной безопасности: Интернет-журнал. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – Вып. 1 (59). – С. 1 – 9. – Режим доступа: <http://ipb.mos.ru/ttb/2015-1/2015-1.html>. 9. Вамболь В.В., Костюк В.Е., Кирилай Е.И. Математическое описание процесса охлаждения генераторного газа при утилизации отходов жизнедеятельности // Технологический аудит и резервы производства. – Х.: НИП ЧП «Технологический Центр», 2015. – № 2/4 (22). – С. 23 – 29. 10. Вамболь В.В., Костюк В.Е., Кирилай Е.И. Выбор структуры и параметров газокapelного потока в блоке охлаждения газа, полученного при термической обработке отходов // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Х.: НАУ «ХАИ», 2015. – Вып. 67. – С. 186 – 196. 11. Вамболь В.В. Математическое моделирование дисперсной фазы охлаждения генераторного газа установки утилизации отходов жизнедеятельности // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського: зб. наук. праць. – № 2/2015 (91). – Ч. 1. – Кременчук: КрНУ, 2015. – С. 165 – 169. 12. Вамболь В.В., Костюк В.Е., Кирилай Е.И. Математическое описание процесса охлаждения генераторного газа в установке утилизации отходов жизнедеятельности // Вісник НТУ «ХПІ», 2015. – № 18 (1127). – С. 24 – 35. 13. Вамболь С.А. Системы управления экологической безопасностью, которые используют многофазные дисперсные структуры: монография. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2013. – 204 с. 14. Вамболь С.А., Строчков А.П., Вамболь В.В., Кондратенко А.Н. Методологический подход к построению системы управления экологической безопасностью эксплуатации энергетических установок // Двигатели внутреннего сгорания: всеукр. научн.-техн. журнал. – 2015. – № 1. – С. 48 – 52. 15. Кондратенко А.Н., Вамболь С.А., Вамболь В.В. Функции системы управления экологической безопасностью эксплуатации энергетических установок // Науковий вісник ХНАДУ – Харків: ХНАДУ, 2015. – Вып. 37. – С. 95 – 99. 16. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача: учеб. для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с. – 4-е изд., перераб. и доп. 17. Хьюитт Дж., Холл-Тэйлор Н. Кольцевые двухфазные течения: пер. с англ. – М.: Энергия, 1974. – 408 с. 18. Баттерворс Д., Хьюитт Дж. Теплопередача в двухфазном потоке: пер. с англ. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.

Bibliography (transliterated): 1. Zakon Ukrainy. "Pro vidhody." No. 187/98. 05 March 1998. U redakcii' stanom na 28 June 2015. Web. 01 September 2015 <<http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/187/98-%D0%B2%D1%80>>. 2. Nechiporuk, N. V., and V. Sh. Ersmambetov. "Alternativnaya tehnologiya utilizatsii othodov zhiznedejatel'nosti." *Ekologichna bezpeka*. No. 2 (14). Kremenchug: KrNU, 2012. 80–84. Print. 3. Kobrin, V. N., N. V. Nechiporuk and V. V. Vambol'. "Sistema upravlenija ekologicheskoy bezopasnost'ju pri utilizatsii tverdyh bytovykh i proizvodstvennykh othodov." *Ekologichna bezpeka*. No. 2 (18). Kremenchug: KrNU, 2014. 24–29. Print. 4. Chubenko, A. S., V. N. Kobrin and V. V. Vambol'. "Ekologicheski chistaja utilizatsija othodov zhiznedejatel'nosti." *Otkrytye informacionnye i kompjuternye integrirovannye tehnologii*. No. 62. Kharkov: NAU «KhAI», 2013. 98–102. Print. 5. Vambol', V. V., V. N. Kobrin and N. V. Nechiporuk. "Obespechenije ekologicheskoy bezopasnosti pri obrashnenii s othodami." *Mezhdunarodnyj nauchn.-issled. zhurnal*. No. 11–2 (30). Ekaterinburg, 2014. 8–10. Print. 6. Vambol', V. V., V. Je. Kostjuk and Je. I. Kirilash. "Chislennoje modelirovanije processa ohlazhdenija generatornogo gaza ustanovki utilizatsii tverdyh bytovykh i opasnykh othodov." *Otkrytye informacionnye i kompjuternye integrirovannye tehnologii*. No. 66. Kharkov: NASU «KhAI», 2014. 178–187. Print. 7. Vambol', V. V. "Matematicheskoe modelirovanije gazovoj fazy ohlazhdenija generatornogo gaza ustanovki utilizatsii othodov zhiznedejatel'nosti." *Visnyk Kremenchuc'kogo nacional'nogo un-tu im. M. Ostrogradskogo: zb. nauk. prac'*. No. 6 (89). Vol. 1. Kremenchug: KrNU, 2014. 148–152. Print. 8. Vambol', V. V. "Modelirovanije gazodinamicheskikh processov v bloke ohlazhdenija generatornogo gaza ustanovki utilizatsii othodov." *Tehnologii tehnosfernoj bezopasnosti: Internet-zhurnal*. Vol. 1 (59). Moscow: Akademija GPS MChS Rossii, 2015. 1–5. Web. 02 September 2015 <<http://ipb.mos.ru/ttb/2015-1/2015-1.html>>. 9. Vambol', V. V., V. Je. Kostjuk and Je. I. Kirilash. "Matematicheskoe opisanije processa ohlazhdenija generatornogo gaza pri utilizatsii othodov zhiznedejatel'nosti." *Mezhdunarodnyj nauchnyj zhurnal «Tehnologicheskij audit i rezervy proizvodstva»*. No. 2/4 (22). Kharkov: NIP ChP «Tehnologicheskij centr», 2015. 23–29. Print. 10. Vambol', V. V., V. Je. Kostjuk and Je. I. Kirilash. "Vybor struktury i parametrov gazokapel'nogo potoka v bloke ohlazhdenija gaza, poluchennogo pri termicheskoj obrabotke othodov." *Otkrytye informacionnye i kompjuternye integrirovannye tehnologii*. No. 67. Kharkov: NASU «KhAI», 2015. 186–196. Print. 11. Vambol', V. V. "Matematicheskoe modelirovanije dispersnoj fazy ohlazhdenija generatornogo gaza ustanovki utilizatsii othodov zhiznedejatel'nosti." *Visnyk Kremenchuc'kogo nacional'nogo un-tu im. M. Ostrogradskogo: zb. nauk. prac'*. No. 2 (91). Vol. 1. Kremenchug: KrNU, 2015. 165–169. Print. 12. Vambol', V. V., V. Je. Kostjuk and Je. I. Kirilash. "Matematicheskoe opisanije processa ohlazhdenija generatornogo gaza v ustanovke utilizatsii othodov zhiznedejatel'nosti." *Visnyk NTU «KhPI»*. *Zbirnyk naukovykh prac'*. Ser.: *Matematychnje modeljuvannja v tehnici ta tehnologijah*. No. 18 (1127). Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. 24–35. Print. 13. Vambol', S. A. *Sistemy upravlenija ekologicheskoy bezopasnost'ju, kotorye ispol'zujut mnogofaznye dispersnye struktury: monografija*. Kharkiv: Nac. aerokosm. un-t «Khar'k. aviac. inst.», 2013. Print. 14. Vambol', S. A., et al. "Metodologicheskij podhod k postroeniju sistemy upravlenija ekologicheskoy bezopasnost'ju ekspluatatsii energeticheskikh ustanovok." *Dvigateli vnutrennego sgoranija: vseukr. nauchn.-tehnič. zhurnal*. No. 1. Kharkov: NTU «KhPI», 2015. 48–52. Print. 15. Kondratenko, A. N., S. A. Vambol' and V. V. Vambol'. "Funkcii sistemy upravlenija ekologicheskoy bezopasnost'ju ekspluatatsii energeticheskikh ustanovok." *Naukovyj visnyk KhNADU*. No. 37. Kharkov: KhNADU, 2015. 95–99. Print. 16. Isachenko, V. P., V. A. Osipova and A. S. Sukomel. *Teplotperedacha: ucheb. dlja vuzov. 4th ed. pererad. i dop.* Moscow: Energoizdat, 1981. Print. 17. H'juitt, Dzh., and N. Holl-Tejlor. *Kol'tsevyje dvuhfaznye techenija: per. s angl.* Moscow: Energija, 1974. Print. 18. Battervors, D., and Dzh. H'juitt. *Teplotperedacha v dvuhfaznom potoke: per. s angl.* Moscow: Energija, 1980. Print.

Поступила (received) 15.09.2015

Шахов Юрій Васильович – старший науковий співробітник, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків; тел.: +38 (068) 60-19-260; e-mail: k205@mail.ua.

Шахов Юрий Васильевич – старший научный сотрудник, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков; тел.: +38 (068) 60-19-260; e-mail: k205@mail.ua.

Shakhov Yuriy Vasylovych – Senior Research Fellow, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov; tel.: +38 (068) 60-19-260; e-mail: k205@mail.ua

Петухов Ілля Іванович – кандидат технічних наук, доцент, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків; тел.: +38 (050) 30-33-187; e-mail: ilya2950@gmail.com.

Петухов Илья Иванович – кандидат технических наук, доцент, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков; тел.: +38 (050) 30-33-187; e-mail: ilya2950@gmail.com.

Petukhov Ilya Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Docent, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov; tel.: +38 (050) 30-33-187; e-mail: ilya2950@gmail.com.

Вамболь Віола Владиславівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімії, екології та експертизи цих технологій, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», м. Харків; тел.: +38 (096) 32-94-136; e-mail: violavambol@gmail.com.

Вамболь Виола Владиславовна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры химии, экологии и экспертизных технологий, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков; тел.: +38 (096) 32-94-136; e-mail: violavambol@gmail.com.

Vambol' Viola Vladislavovna – Candidate of Technical Sciences, Docent, Docent at the Department of Chemistry, Ecology and Expertise Technology, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov; tel.: +38 (096) 32-94-136; e-mail: violavambol@gmail.com.