

ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

4'2016

Видання засновано Харківським державним політехнічним університетом у 1998 році
(з листопада 2000 р. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»)

Держвидання

Свідоцтво Міністерства інформації України
КВ № 3427 від 18.08.1998 р.

ЗАТВЕРДЖЕНО

постановою президії ВАК України
як наукове фахове видання
(протокол № 1-05/3 від 14.04.2010 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ,
член-кор. НАН України

Відповідальний секретар

К. О. ГОРБУНОВ,
канд. техн. наук, доц.

ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ:

В. П. Мешалкін, *д-р техн. наук, проф.*,
РХТУ Москва (Росія)
Д. Б. Ферст, *ВА, ген. директор*
F. Executive Co. (Великобританія)
Й. Клемеш, *PhD, DSc (Hon)*
ун-та «Паннонія» (м. Веспрем, Угорщина)
та ун-та Манчестера (Великобританія)
В. Плешу, *PhD, проф.*, *ун-т POLITEHNICA*
Бухарест (Румунія)
П. Стехлік, *PhD, проф.*, *VUT Брно (Чехія)*
О. Б. Аніпко, *д-р техн. наук, проф.*
Є. І. Сокіл, *член-кор. НАН України*
П. А. Качанов, *д-р техн. наук, проф.*
В. А. Малярєнко, *д-р техн. наук, проф.*
Д. Ф. Сімбірський, *д-р техн. наук, проф.*
В. П. Шапорєв, *д-р техн. наук, проф.*
Ю. Б. Данилов, *д-р техн. наук, проф.*
С. В. Яковлев, *д-р фіз.-мат. наук, проф.*
Ю. М. Мацевітій, *акад. НАН України*
В. Є. Ведь, *д-р техн. наук, проф.*
Л. М. Ульянов, *д-р техн. наук*
П. О. Капустєнко, *акад. Академії будівництва України*
О. П. Арсєнєва, *д-р техн. наук, доц.*

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21
Тел. 70-76-958

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

- Товажнянский Л. Л., Зебешев Т. З., Ульянов Л. М.,
Комутова А. С., Васильев М. А.*
Анализ энергоемкости процесса первичной
перегонки нефти на установке ЭЛОУ АВТ-33
- Товажнянский Л. Л., Зебешев Т. З., Перевертайленко А. Ю.,
Капустенко П. А., Бужало С. И., Комутова А. С.*
Исследование структуры основных схем
газификационных агрегатов большой
единичной мощности9
- Товажнянский Л. Л., Арсеньева О. П., Хавин Г. Л.,
Дунаевский В. А., Арсеньев П. Ю., Пугач Я. А.*
Проект рекуперативного нагрева отопительной
воды на нефтеперерабатывающем заводе17
- Хавин Г. Л., Арсеньева О. П., Мацегора А. И.,
Кусаков С. К., Бочарников И. А., Василенко А. А.*
Автоматизация проектирования тепловых пунктов
системы централизованного теплоснабжения23
- МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ
ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ**
- Андреева О. Л., Борц Б. В., Костиков А. О., Ткаченко В. И.*
Экспериментальные исследования элементарной
конвективной ячейки с твердыми и смешанными
граничными условиями в горизонтальном слое
вязкой несжимаемой жидкости30

*Бобух А. О., Дзевочко О. М., Подустов М. О.,
Переверзева А. М.*
Розробка багатопараметричних
математичних моделей комп'ютерно-
інтегрованих технологій
виробництва соди 36

*Илюнин О. О., Капустенко П. А.,
Кусаков С. К., Перевертайленко А. Ю.,
Селяков А. М., Шамраев А. А.*
Нейросетевой супервизор непрерывных
технологических процес сов..... 44

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Бессонов А. А., Илюнин О. О., Руденко О. Г.
Нейросетевое управление травлением
несистемных дефектов стального
проката..... 52

*Братах М. І., Усіченко Д. В., Романова В. В.,
Дженіффер Джонас*
Відповідність якості природного газу,
що видобувається в Україні, вимогам
європейських норм 61

*Ведь В. Е., Зебешев Т. З., Краснокутский Е. В.,
Гаевой М. А.*
Параметры очистки отработавших газов
двигателя ВАЗ-21081і каталитическими
нейтрализаторами разработки НТУ «ХПИ»
и BOSAL 099-886 68

*Данилов Ю. Б., Перцев Л. П., Коломиец В. Н.,
Гавриличенко И. Г.*
Теплообменные аппараты из фторопласта
для химической промышленности 74

*Редько А. А., Павловская А. А., Давиденко А. В.,
Куликова Н. В., Редько И. А.*
Аэродинамические процессы в топке
водотрубного котла ДЕ-10/14
при различных параметрах закрученного
потока 80

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

Борисенко В. С., Приймак А. В.
Управління факторами ризику
для підвищення рівня безпеки польотів..... 88

Сторінка редколегії 93

Затверджено Вченою радою НТУ «ХПИ» (протокол № 7 від 23.09.2016 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження / Щоквартальний науково-практичний журнал. –
Харків : НТУ «ХПИ», 2016. – № 4. – 96 с.

Збірник наукових та науково-практичних статей з питань енергозбереження та сучасних технологій
різноманітних галузей промисловості.

УДК 338.45: 662.276

Товажнянский Л.Л., Зебешев Т.З., Ульев Л.М., Комутова А.С., Васильев М.А.

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЕМКОСТИ ПРОЦЕССА ПЕРВИЧНОЙ ПЕРЕГОНКИ НЕФТИ НА УСТАНОВКЕ ЭЛОУ АВТ-3

Введение. Сокращение потребления топливно-энергетических ресурсов в промышленности сопряжено с широкомасштабной реализацией современных энергосберегающих технологий, созданием высокоэффективных энерготехнологических комплексов. Хотя этот вопрос далеко не нов для химико-технологических производств, в последнее десятилетие добавились два фактора, которые придали особое значение экономии энергии в Республике Казахстан и вынуждают расширять диапазон используемых для этой цели методов и средств.

Во-первых, рост цен на энергию побуждает более экономно использовать энергоресурсы с тем, чтобы уменьшить общие затраты. Более того, все предприятия, спроектированные и построенные во времена низких цен на энергоносители, в настоящее время работают далеко не в оптимальном режиме с точки зрения потребления энергии.

Во-вторых, значительно уменьшились темпы роста производства, а это означает, что уменьшились возможности введения в строй новых заводов и освоения новых технологических процессов, и внимание направляется все больше в сторону повышения эффективности использования существующего оборудования.

Кроме того, растет износ оборудования. Возникает потребность в реконструкции и модернизации существующих установок.

Нефтепереработка и нефтехимия являются одними из самых энергоемких производств и уровень энергозатрат в значительной степени влияет на себестоимость готовой продукции. В зависимости от глубины переработки нефти, ее состава, ассортимента и качества целевых продуктов, технического уровня оборудования и других факторов расход энергии на собственные нужды нефтеперерабатывающих заводов эквивалентен 6–10 % перерабатываемой нефти. Из общего количества потребляемой энергии 55–65 % приходится на долю технологического топлива, 30–35 – на тепловую и 8–12 – на электрическую энергию [1].

Наиболее энергоемкими являются процессы гидрокрекинга, каталитического крекинга и риформинга, коксования, производства масел. Процессы первичной переработки нефти менее энергоемкие, но атмосферно-вакуумной перегонке подвергается вся поступающая на нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ) нефть, при этом расходуется около 50 % суммарных энергозатрат. Поэтому, особое внимание следует уделить повышению энергоресурсоэффективности работы действующих установок атмосферно-вакуумной трубчатки (АВТ), уменьшению удельных энергозатрат на переработку нефти и снижению внешних тепловых потерь на оборудовании установки [2–7].

На современных зарубежных НПЗ энергетические затраты составляют 3000–3500 МДж или 100–114 кг условного топлива на 1 т перерабатываемой нефти. Приблизительно такие же затраты топлива и на НПЗ стран СНГ, но при значительно меньшей глубине переработки нефти. С увеличением глубины переработки нефти и расширением нефтехимических производств, энергетические затраты возрастают и экономия энергоресурсов приобретает все большее значение. Основными путями повышения конкурентоспособности отечественной нефтепереработки и нефтехимии являются уве-

личение глубины переработки нефти и существенное снижение энергоемкости всех процессов [2].

На казахстанских НПЗ большая часть технологических установок строилась в 60-х и 70-х годах, когда цена энергоресурсов была очень низкая, и экономии энергии не придавалось большого значения. И в последующие годы энергосберегающих мероприятий практически не производили. Поэтому, энергопотребление в основных процессах нефтепереработки и нефтехимии на 30–60 % выше, чем в современных зарубежных установках.

Улучшения в этом направлении достигаются путем модернизации отдельных систем производства, установок и заводов в целом, рационализации и совершенствования производственных операций.

Анализ существующего процесса. В данной работе с помощью метода пинч-анализа [8] анализируется энергопотребление в процессе первичной перегонки нефти на установке ЭЛОУ АВТ-3.

На основании обследования технологической схемы, была построена сеточная диаграмма, были определены теплообменные связи между технологическими потоками (рис. 1).

На сеточной диаграмме для существующей теплообменной системы ЭЛОУ-АВТ-3 отображены все потоки, участвующие в теплообмене в настоящее время, как в рекуперативном, так и в утилитном теплообмене. Поэтому, на диаграмме показаны рекуперативные теплообменные аппараты, воздушные и водяные холодильники, а также печи (рис. 1). Такая диаграмма удобна при вычислении мощности рекуперации теплоты в системе теплообмена установки и также удобна при дальнейшем исследовании эффективности работы теплообменных аппаратов.

Для определения мощности рекуперации в теплообменной системе установки АВТ-3 необходимо знать температуры технологических потоков на выходе из системы разделения и выходе из системы рекуперации. Для того, чтобы определить эффективность работы теплообменных аппаратов, были измерены температуры теплоносителей на каждом теплообменном аппарате.

Для построения составных кривых исходного процесса необходимо определить целевые значения рекуперации, горячих утилит (полезная нагрузка печей) и холодных утилит (воздушные и водяные холодильники).

Для определения ΔT_{\min} существующего проекта в пинч-анализе используется аппарат составных кривых [8]. Составные кривые показывают суммарное энтальпийное изменение в системе потоков (холодных или горячих соотв.) во всех интервалах температуры (рис. 2).

Используя сеточную диаграмму исходной технологической схемы (рис. 1), определяем мощность рекуперации тепловой энергии. В теплообменной схеме процесса первичной переработки нефти 57 рекуперативных теплообменных аппарата [9], мощность рекуперации составляет ~ 54 МВт.

На основе технологических данных, построим на энтальпийно-температурной диаграмме горячую и холодную составные кривые выбранной системы технологических потоков, и далее разместим их таким образом, чтобы интервал перекрытия между ними составил величину в 54 МВт (рис. 2). Для этого, мы используем программное обеспечение Pinch-02, созданное на кафедре ИТПА НТУ «ХПИ» под руководством профессора Ульева Л.М. Горячие утилиты отобразились на диаграмме величиной

$Q_{Hmin} = 66,123$ МВт, а холодные утилиты, изображенные на диаграмме составных кривых, равны $Q_{Cmin} = 45,958$ МВт.

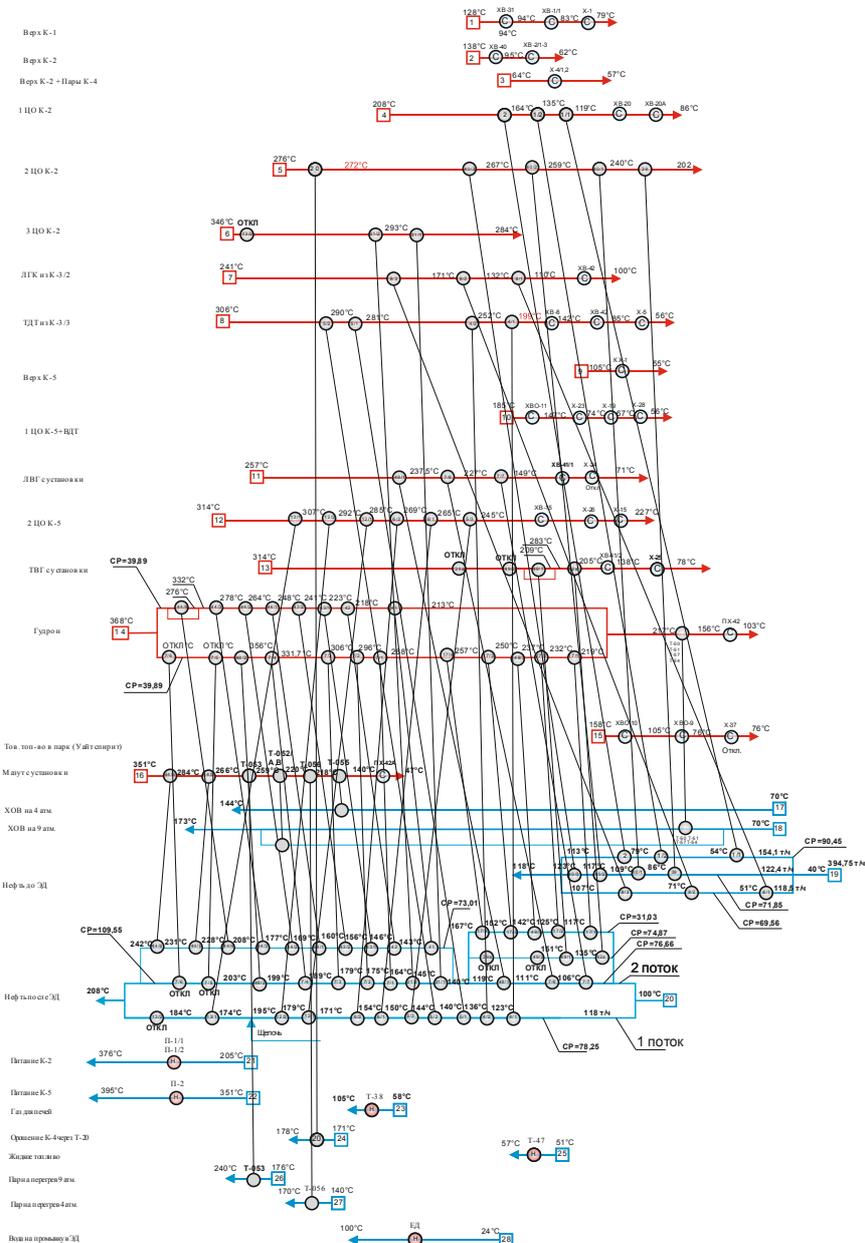


Рисунок 1 – Сеточная диаграмма исходной системы теплообмена установки ЭЛОУ-АВТ-3: Т – рекуперативные теплообменные аппараты, С – охладитель, Н – нагреватель

Проекция горячей составной кривой на энтальпийную ось (абсцисс) показывает значения тепловой мощности, которую возможно отвести от системы горячих потоков и использовать для подогрева холодных технологических потоков. Эта величина составляет значение 99,545 МВт. Аналогично, проекция холодной составной кривой на энтальпийную ось показывает значение мощности, которое необходимо подвести к холодным потокам для осуществления процесса первичной переработки нефти на установке АВТ-3. Для проведения процесса необходима мощность ~119,720 МВт, но это не значит, что вся эта мощность должна быть получена от утилитной системы установки,

в данном случае – системы трубчатых печей. Часть энергии может быть рекуперирована с помощью системы теплообмена между холодными и горячими потоками. Величину мощности тепловой рекуперации и показывает перекрытие кривых (рис. 2). Это значение на диаграмме кривых равно ~ 53.6 МВт. Наименьшее расстояние между кривыми по оси ординат – температурной оси показывается областью пинча, выбранной системы технологических потоков. В нашем случае на действующей установке пинч локализуется на температурах: $T_{гор} = 276$ °С и $T_{хол} = 162$ °С. Разность температур в области пинча равна $\Delta T_{min} = 114$ °С.

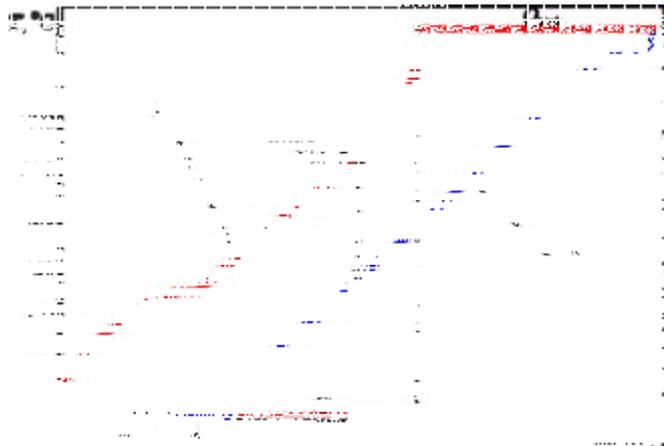


Рисунок 2 – Составные кривые процесса первичной переработки нефти на установке ЭЛОУ-АВТ – 3 для существующей в настоящее время теплообменной системы:

1 – составная кривая горячих потоков; 2 – составная кривая холодных потоков;
 Q_{Hmin} , Q_{Cmin} , Q_{Rec} – потребляемая мощность горячих утилит, холодных утилит и мощность рекуперации. $Q_{Hmin} = 66,123$ МВт, $Q_{Cmin} = 45,958$ МВт, $Q_{Rec} = 53,6$ МВт

Выводы. В данной работе проанализирована энергоэффективность процесса первичной перегонки нефти на установке ЭЛОУ АВТ–3, построена сеточная диаграмма, определены теплообменные связи между технологическими потоками, а также для существующего процесса посчитана мощность рекуперации теплоты, которая составила 54 МВт. Спроектированная составная кривая выявила недостатки существующей теплообменной системы, которые приводят к увеличению энергопотребления. Анализ энергоэффективности процесса первичной перегонки нефти на установке ЭЛОУ АВТ-3 выявил существенные недостатки существующей системы теплообмена. Данная работа послужит основой для разработки новой системы теплообмена исследуемого процесса, а также последующей модернизации всего завода.

Благодарность: Авторы благодарят Министерство образования и науки Республики Казахстан за финансовую поддержку в рамках проекта «Создание интегрированных технологий производственных комплексов Республики Казахстан для обеспечения их энергоресурсоэффективности и экологической безопасности».

Обозначения. T – температура, °С; ΔH – изменение энтальпии потоков, кВт; ΔT_{min} – минимальная разность температур, °С; Q_{Hmin} – тепловая мощность для нагрева холодных потоков кВт; Q_{Cmin} – тепловая мощность для охлаждения горячих потоков, кВт; Q_{Rec} – мощность рекуперации.

Литература

1. Клемеш Й. Применение метода пинч-анализа для проектирования энергосберегающих установок нефтепереработки / Й. Клемеш, Ю.Т. Костенко, Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев, А.Ю. Перевертайленко, Б.Д. Зулин // Теорет. основы хим. технологии. 1999. Т. 33, №4. С. 420.
2. Мешалкин В.П. Ресурсоэнергоэффективные методы энергообеспечения / В.П. Мешалкин // М.: Химия, 2010.
3. Товажнянский Л.Л. Интеграция тепловых процессов на установке первичной переработки нефти АВТ А12/2 при работе в зимнее время / Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Л.М. Ульев, С.А. Болдырев, О.П. Арсеньева, М.В. Тарновский // Теорет. основы хим. технологии. 2009. Т. 43, №6. С. 665.
4. Мешалкин В.П. Энергоэффективная реконструкция установки нефтепереработки на основе пинч-анализа с учетом внешних потерь / В.П. Мешалкин, Л.Л. Товажнянский, Л.М. Ульев, Л.А. Мельниковская, С.М. Ходченко // Теорет. основы хим. технологии. 2012. Т. 46, №5. С. 491.
5. Ульев Л.М., Нечипоренко Д.Д. Пинч-реконструкция секций гидроочистки и каталитического риформинга на установке Л-35-11/600 // Интегрированные технологии и энергосбережение. 2013. № 2. С. 95.
6. Ульев Л.М. Пинч-интеграция процессов разделения широкой фракции легких углеводородов и пропан-пропиленовой фракции на установках газодифракционирования и компримирования / Л.М. Ульев, А. Маатоук, М.А. Васильев // Наукові праці [Одеської національної академії харчових технологій]. – 2015. – Вип. 47(1). – С. 10–15.
7. Ульев Л.М. Определение полезной загрузки трубчатых печей с помощью учета тепловых потерь в системе теплообмена на установке первичной переработки нефти АВТ А12/2 в режиме работы без вакуумного блока / Л.М. Ульев, Л.А. Мельниковская // Интегрированные технологии и энергосбережение. 2011. № 3. С. 15.
8. Смит Р. Основы интеграции тепловых процессов / Р. Смит, Й. Клемеш, Л.Л. Товажнянский и др. – Х.: ХГПУ, 2000. – 457 с.
9. Klemeš, J. Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation / J. Klemeš, O. Arsenyeva, P. Kapustenko, L. Tovazhnyansky // CRC Press. 2015. – 354 с.

Bibliography (transliterated)

1. Klemesh Y. Primenenie metoda pinch-analiza dlya proektirovaniya energosberegayuschih ustanovok neftepererabotki / Y. Klemesh, Yu.T. Kostenko, L.L. Tovazhnyansky, P.A. Kapustenko, L.M. Ulyev, A.Yu. Perevertaylenko, B.D. Zulin // Teoret. osno-vyi him. tehnologii. 1999. T. 33, №4. P. 420.
2. Meshalkin V.P. Resursoenergoeffektivnyie metodyi energoobespecheniya / V.P. Meshalkin // M.: Himiya, 2010.
3. Tovazhnyansky L.L. Integratsiya teplovyih protsessov na ustanovke pervichnoy pererabotki nefiti AVT A12/2 pri rabote v zimnee vremya / L.L. Tovazhnyansky, P.A. Kapustenko, L.M. Ulyev, S.A. Boldyirev, O.P. Arseneva, M.V Tarnovskiy // Teoret. osnovyi him. tehnologii. 2009. T. 43, №6. P. 665.
4. Meshalkin V.P. Energoeffektivnaya rekonstruktsiya ustanovki neftepererabotki na osnove pinch-analiza s uchetom vneshnih poter / V.P. Meshalkin, L.L. Tovazhnyansky, L.M. Ulyev, L.A. Melnikovskaya, S.M. Hodchenko // Teoret. osnovyi him. tehnologii. 2012. T. 46, №5. P. 491.

5. Ulyev L.M. Pinch-integratsiya protsessov rozdeleniya shirokoy fraktsii legkih uglevodorodov i propan-propilenovoy fraktsii na ustanovkah gazofraktsionirovaniya i komprimirovaniya / L.M. Ulyev, A. Maatouk, M.A. Vasilev // Naukovi pratsi [Odeskoyi natsionalnoyi akademiyi harchovih tehnologiy]. – 2015.– Vip. 47(1). – P. 10–15.

6. Ulyev L.M. Pinch-integratsiya protsessov rozdeleniya shirokoy fraktsii legkih uglevodorodov i propan-propilenovoy fraktsii na ustanovkah gazofraktsionirovaniya i komprimirovaniya / L.M. Ulyev, A. Maatouk, M.A. Vasilev // Naukovi pratsi [Odeskoyi natsionalnoyi akademiyi harchovih tehnologiy]. – 2015. – Vip. 47(1). – P. 10–15.

7. Ulyev L.M. Opredelenie poleznoy zagruzki trubchatyih pechey s pomoschyu ucheta teplovyih poter v sisteme teploobmena na ustanovke pervichnoy pererabotki nefiti AVT A12/2 v rezhime raboty bez vakuumnogo bloka / L.M. Ulyev, L.A. Melnikovskaya // Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie. 2011.№ 3. P. 15.

8. Smit R. Osnovy integratsii teplovyih protsessov / R. Smit, Y. Klemesh, L.L. Tovazhnyanskyi i dr. – H.: HGPU, 2000. – 457 p.

9. Klemeš J. Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation / J. Klemeš, O. Arsenyeva, P. Kapustenko, L. Tovazhnyanskyi // CRC Press. 2015. – 354 p.

УДК 338.45: 662.276

Товажнянський Л.Л., Зебешев Т.З., Ульєв Л.М., Комутова А.С. Васильєв М.А.

АНАЛІЗ ЕНЕРГОЄМНОСТІ ПРОЦЕСУ ПЕРВИННОЇ ПЕРЕГОНКИ НАФТИ НА УСТАНОВЦІ ЕЛОУ АВТ-3

У даній роботі проаналізовано енергоефективність процесу первинної перегонки нафти на установці ЕЛОУ АВТ-3, побудована сіткова діаграма, визначені теплообмінні зв'язки між технологічними потоками, а також для існуючого процесу порівняно потужність рекуперації теплоти, яка склала 54 МВт. Спроектована складова крива виявила недоліки існуючої теплообмінної системи, які призводять до збільшення енергоспоживання. Аналіз енергоефективності процесу первинної перегонки нафти на установці ЕЛОУ АВТ-3 виявив суттєві недоліки існуючої системи теплообміну. Дана робота послужить основою для розробки нової системи теплообміну досліджуваного процесу, а також подальшої модернізації всього заводу.

Tovazhnyanskyi L.L., Zebeshev T.Z., Ulyev L.M., Komutova A.S., Vasiliev M.A.

THE ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION FOR THE PRIMARY DISTILLATION PROCESS ELOU AVT-3

In this work we analyze the energy efficiency of the primary process oil re-races at ELOU AVT-3, grid diagram determined heat transfer communication between process streams, and counted for the existing process heat recovery capacity, which was 54 MW. Composite curve revealed shortcomings of the existing heat exchange systems, which lead to an increase in power consumption. The analysis of energy efficiency of the primary distillation process ELOU AVT-3 revealed significant weaknesses in the existing heat exchange systems. This work will form the basis for the development of a new system of heat exchange of the test process, and subsequent modernization of the entire plant.

УДК 66.045.1

Товажнянский Л.Л., Зебешев Т.З., Перевертайленко А.Ю., Капустенко П.А.,
Бухкало С.И., Комутова А.С.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ОСНОВНЫХ СХЕМ ГАЗИФИКАЦИОННЫХ АГРЕГАТОВ БОЛЬШОЙ ЕДИНИЧНОЙ МОЩНОСТИ

Введение. Газификация топлив является одним из процессов термохимической конверсии, в ходе которого производится превращение углеродосодержащего топлива в синтез-газ, состоящий главным образом из смеси водорода и окиси углерода, который затем может быть использован в качестве сырья для получения аммиака, метанола, водорода, углеводородов по методике Фишера-Тропша, заменителя природного газа и некоторых других продуктов. Синтез-газ может быть также использован как топливо в производстве электроэнергии по комбинированному циклу.

В качестве сырья для газификации может быть использован широкий спектр углеродсодержащих веществ, в том числе, угли, тяжелые малоценные фракции и отходы нефтепереработки, биомасса, твердые бытовые отходы, а также смеси этих ингредиентов.

В условиях дефицита природного газа и нефти, сложившегося в силу тех или иных обстоятельств, и колебаний цен на них газификации уделяется в настоящее время все большее внимание.

Анализ состояния вопроса. Согласно информации, представленной в источниках [1–3] к крупным газификационным агрегатам относятся те агрегаты, которые вырабатывают синтез-газ, пригодный для синтеза таких химических продуктов, как аммиак, метанол, синтетические топлива, заменитель природного газа, а также электроэнергии по комбинированному циклу в объеме более 100 МВт в тепловом эквиваленте. Основным сырьем для таких агрегатов является уголь, тяжелые малоценные нефтепродукты и отходы нефтеперерабатывающих производств, нефтекокс.

Подобные газификационные агрегаты работают в настоящее время в 18 странах мира. В азиатско-тихоокеанском регионе сосредоточено 37 % всех мощностей (КНР, Индия, Япония, Республика Корея, Сингапур, Тайвань), затем идет Африка, 22 %, (ЮАР, Египет), Европа, Северная Америка и Латинская Америка (Бразилия, Доминиканская Республика).

Среди производимой продукции первое место занимает химическая продукция, 45 %, (аммиак, метанол, продукты органического синтеза); затем жидкие синтетические топлива, 38 %; электроэнергия – 11 %; заменитель природного газа и газообразные топлива – 6 %. Из 37 разработанных в 1930-х–1990-х годах технологий газификации для крупных агрегатов [4] в настоящее время промышленное применение нашло не более десяти:

- Sasol Lurgi, выработка синтез-газа 25 % от мировой;
- Shell (40 %) в двух модификациях:
 - для газификации жидкого сырья (SGP),

- для газификации твердого сырья (SCGP);
- General Electric (до 2004 г. Техасо), 24 %, в трех модификациях:
 - с прямым контактным водяным охлаждением синтез-газа (GE-ПКВО),
 - с радиантным теплообменником-парогенератором (GE-R),
 - с радиантным и конвективным теплообменниками-парогенераторами (GE-RC);
- ECUST OMB (разработка Восточно-Китайского университета науки и технологии, КНР), 5,5 %;
- E-Gas (ConocoPhillips), Prenflo (Krupp Uhde), Siemens, Mitsubishi HI, KBR – вместе 5,5 %.

В период 2010–2015 гг. наблюдался рост количества газификационных агрегатов большой единичной мощности, главным образом, в Китайской Народной Республике [5]. Сырьем для этих агрегатов являются угли, в том числе, бурые угли.

В 2013 году суммарная производительность газификационных агрегатов превысила 100 Гвт.ч в тепловом эквиваленте [6], причем 60 % из них приходится на Азиатско-Тихоокеанский регион, главным образом, на КНР (свыше 50 %).

Приоритетной продукцией осталась химическая продукция – до 60 Гвт.ч потребления синтез-газа в тепловом эквиваленте. Основным сырьем для производства синтез-газа в 2013–2015 гг. являются угли [5,6]. На данный период времени наибольшее количество синтез-газа было выработано по технологии Shell и General Electric (32 и 25 Гвт.ч синтез-газа в тепловом эквиваленте соответственно).

Газификационный агрегат состоит из нескольких химико-технологических (ХТС) и технологических (ТС) систем, каждая из которых имеет теплообменную систему (ТОС).

Информация, содержащаяся в источниках [7,8], позволяет утверждать, что основными логистическими факторами, определяющими выбор технологии газификации для крупных агрегатов являются: природа, качество и состав газифицируемого сырья, номенклатура целевых продуктов, экологические требования по вредным выбросам а также эмиссии парниковых газов, месторасположение агрегата относительно крупных производственных комплексов, возможности конверсии отходов в товарные продукты.

Изложение основного материала исследований. Рассмотрим основные характеристики и особенности приведенных выше газификационных технологий.

Технология Sasol Lurgi (в настоящее время Sasol^R FBDBTM) [9,10] предназначена для газификации угля с дальнейшим использованием полученного синтез-газа как сырья для получения синтетических жидких топлив и углеводородов по методу Фишера-Тропша. По этой технологии газифицируются все некоксуемые угли, включая бурый уголь и антрацит. Спекающиеся угли подвергаются предварительной термоокислительной обработке. Состояние газифицируемого слоя – насыпной псевдопокоящийся слой. Сухое золоудаление через колосниковую решетку на дне газификатора. Дутье – парокислородное, уголь движется относительно газифицирующего агента противотоком. Высшая температура в слое топлива составляет 700–1000 °С, процесс проводится под давлением 2,4–3,5 МПа. ХТС газификации, включает ТОС охлаждения высокотемпературного газа (ОВГ). При упомянутых температурах процесса сырой син-

тез-газ содержит достаточное количество непрореагировавших продуктов пиролиза: смолы, фенолы, мелкие частицы углерода, а также аммиак и тяжелые углеводороды. Синтез-газ покидает газификатор с температурой 550 °С, что объясняется его охлаждением в газификаторе при контакте с поступающим в аппарат углем. Тепло горячего синтез-газа идет на пиролиз и сушку угля. Выйдя из газификатора сырой синтез-газ поступает в оросительный скруббер, где происходит его первичная очистка и охлаждение до 200–205 °С. Далее синтез-газ поступает на охладители 2-й ступени. На всей стадии ОВГ из синтез-газа конденсируются различные примеси и водяные пары. Конденсат синтез-газа поступает на очистку. Синтез-газ поступает в смолоотделитель и затем в систему низкотемпературного охлаждения синтез-газа (НОСГ), где охлаждается до температуры не выше 30 °С перед установкой очистки от сернистых соединений. В технологии Sasol Lurgi, как правило, применяется абсорбционный способ очистки Ректизол, который позволяет производить очистку синтез-газа от H₂S, COS, CO₂, а также HCN без предварительной стадии гидролиза.

Система охлаждения газификатора предусматривает подачу подготовленной воды в рубашку аппарата, в которой вода испаряется, и образовавшийся пар с давлением около 30 бар смешивается с дутьевым паром, подающимся в нижнюю часть газификатора. В парогенераторе также генерируется пар с давлением 3–7 бар.

В установке разделения газового конденсата производится выделение смол, затем конденсат поступает на выделение фенолов на установку Phenosolvan, где применяются процессы экстракции и ректификации. ТОС этой установки включает позицию предварительного подогрева конденсата, рекуперативную позицию подогрева потока после экстрактора потоком с низа основной ректификационной колонны, а также холодильники-конденсаторы ректификационных колонн. В качестве продуктов образуются сырые фенолы и аммиак.

Базовым аппаратом технологии Sasol Lurgi в настоящее время является газификатор модели MkIV с производительностью около 55 тонн в час по исходному углю. Всего установлено 83 таких газификатора на пяти крупных газификационных агрегатах в ЮАР, США и Китае. Кроме жидких синтетических топлив производится аммиак и метанол[11].

Технология Shell SGP [12,13] предназначена для газификации жидких тяжелых малоценных фракций переработки нефти, а также жидких отходов нефтеперерабатывающих производств. Газификация происходит в спутном потоке сырья и газифицирующего агента. Применяется парокислородное дутье. Газификация в потоке позволяет достигать температур процесса до 1300–1350 °С, процесс проводится при давлении 30–65 бар. Система ОВГ включает первичный охладитель – парогенератор, в котором синтез-газ, выходящий из газификатора, охлаждается до температуры не выше 400 °С, генерируя насыщенный пар высокого давления (порядка 100 бар). Далее синтез-газ проходит первый экономайзер (рис. 2), контактный водяной охладитель, в котором улавливается большая часть образовавшейся в газификаторе сажи и золы, второй экономайзер и поступает в насадочный скруббер, где происходит его дальнейшее охлаждение и улавливание оставшейся сажи. Насадочный скруббер орошается фильтратом скрубберной воды из отделения очистки скрубберной воды.

Внутренняя часть газификатора обмурована устойчивым к высоким температурам огнеупорным материалом. Синтез-газ поступает в трубную часть охладителя-

парогенератора, в то время, как пар генерируется в межтрубном пространстве. Подготовленная питательная вода поступает в парогенератор после предварительного нагрева в экономайзерах.

Система очистки скрубберной воды предусматривает отделение органической части, которая возвращается в газификатор, и неорганики, из которой извлекают соединения металлов, представляющие товарную ценность.

Технология разработана в 1950-е гг. и постоянно совершенствуется. Наиболее крупными являются подобные агрегаты Брунсбюттеле (Германия, 1978 г.), Пернисе (Нидерланды, 1997 г.), в Санназаро (Италия, 2006 г.).

Технология Shell SCGP [14] используется для газификации различных углей, начиная от бурых углей (лигнитов) и заканчивая антрацитами. Технология была разработана в 1974–1981 гг. совместно с Krupp-Koppers. Сырье (уголь) подается в сухом измельченном виде. Газификация проводится в спутном потоке с применением парокислородного дутья. Система ОВГ данной технологии подробно описана в [15] и включает смешение сырого горячего синтез-газа с очищенным холодным синтез-газом, а также конвективный парогенератор. Одной из характерных особенностей системы охлаждения газификатора является применение водотрубных стенок зоны газификации, внутри трубок циркулирует охлаждающая вода под высоким давлением, которая, нагреваясь, образует пароводяную смесь. Образующийся при газификации жидкий шлак стекает сверху вниз, образуя защитный слой с низкой теплопроводностью на поверхности трубок, при этом полностью исключен контакт горячего шлака с обмуровкой газификатора и, следовательно, нет коррозионного воздействия шлака на обмуровку. Это позволяет газифицировать угли с относительно высоким содержанием золы без ремонтов газификатора, связанных с заменой обмуровки. В настоящее время ведутся разработки газификаторов Shell с прямым контактным водяным охлаждением.

На агрегате в Буггенуме (Нидерланды) производится ко-газификация угля, нефтекокса, биомассы и отходов птицеводства. В Китае в 2006–2010 гг. введено в эксплуатацию около 12 газификационных агрегатов, в основном, с использованием полученного синтез-газа для получения аммиака, метанола и других химпродуктов.

Технология GE Energy (Texaco) [16,17] используется при газификации как твердого, так и жидкого сырья. Газификация проводится в спутном потоке с применением парокислородного дутья. При газификации твердого сырья (уголь, нефтекокс) предусмотрена подача сырья в газификатор в виде водоугольной смеси. Конструкция газификатора для конверсии твердого или жидкого сырья одинакова, внутренние стенки реактора обмурованы. Температура газификации составляет 1250–1450 °С, давление 3 МПа для получения синтез-газа, используемого для выработки электроэнергии по комбинированному циклу (КЦКГ) и 6–8 МПа для получения водорода и продуктов синтеза (аммиак, метанол и др.). Технология предусматривает три варианта системы ОВГ:

- с прямым контактным водяным охлаждением синтез-газа (GE-ПКВО);
- с радиантным теплообменником-парогенератором (GE-R);
- с радиантным и конвективным теплообменниками – парогенераторами (GE-RC).

Второй вариант является промежуточным. В этом случае прямое контактное водяное охлаждение синтез-газа осуществляется после радиантного теплообменника-

парогенератора. В первом и втором случае образуется высокое содержание водяных паров в синтез-газе, что значительно упрощает узел конверсии окиси углерода, который необходим при получении химических продуктов, некоторых топлив и водорода.

Технология Техасо была разработана в конце 1950-х гг. для газификации жидких нефтепродуктов, в 1973 г. – для газификации угля. К настоящему времени эксплуатируется. На КЦКГс газификацией смеси угля и нефтекокса, установленном в Полк (Tampa Electric, США) для ОВГ последовательно используются радиантный и конвективный теплообменники-парогенераторы [18].

Технология ConocoPhilips (E-Gas), известна также как Dectec, разработана компанией Dow в 1970-е гг. [19]. Предназначена для газификации угля, который подается в газификатор в виде водоугольной суспензии. Газификация проходит в спутном восходящем потоке в две стадии при температуре 1350–1400 °С и давлении около 3 МПа.

Синтез-газ, полученный на первой стадии, поднимается в верхнюю часть газификатора, куда подается 20 % водоугольной суспензии. Это позволяет получить синтез-газ с достаточно высокой теплотворной способностью и снизить его температуру на выходе до 1050 °С. Изнутри газификатор обмурован. ОВГ включает жаротрубный парогенератор, снижающий температуру синтез-газа до 370 °С, после чего последний поступает на очистку. Для газификации применяется парокислородное дутье. Крупный агрегат – КЦКГ – установлен в Уэйбеш Ривер (США) для производства электроэнергии свыше 300 МВт при газификации 2200 т/сут угля с высоким содержанием серы.

Процесс имеет существенные преимущества при получении заменителя природного газа из угля, так как в синтез-газе содержание метана выше, чем в остальных процессах газификации, проходящих в спутном потоке, но в одну стадию.

Технология ECUST OMB [20] аналогична технологии Техасо и предназначена для газификации углей. Газификация происходит в спутном потоке, измельченный уголь подается в виде водоугольной суспензии. Для охлаждения синтез-газа применяется принцип ПКВО.

Процесс проходит под давлением 4–6,5 МПа при кислородном дутье.

Разработана модификация технологии с радиантным теплообменником-парогенератором, позволяющая использовать данную технологию для производства электроэнергии (КЦКГ).

Технология ECUST OMB реализована на крупнотоннажных газификационных агрегатах, целевыми продуктами производства которых являются аммиак и метанол.

Технология Siemens (Siemens Fuel Gasification Technology – SFGTM) разработана в 1975 г. компанией DBI (ФРГ) для газификации низкосортных углей Германии. В 1991 г. группа Noell применила эту технологию с соответствующими модификациями для газификации жидких нефтепродуктов. Газификаторы также эксплуатировались под марками Babcock-Borsig и FutureEnergy. С 2008 г. технология приобретена компанией Siemens [21]. Процесс проходит в спутном потоке при паро-кислородном дутье; температурный диапазон: 1300–1800 °С, давление около 4 МПа. Имеется две модификации газификаторов: для жидкого сырья и малозольных углей (менее 2 %) применяются газификаторы с внутренней обмуровкой, а для углей с зольностью выше 2 % применяются водотрубные стенки зоны газификации (т.н. мембранные стенки). Для твердого сырья применяется система его подачи в газификатор в сухом измельченном виде. Базовой конструкцией газификатора для крупных газификационных агрегатов по техноло-

гии Siemens является аппарат SFG-500 производительностью 500 МВт тепла в эквиваленте [21].

Охлаждение зоны газификации с помощью мембранных стенок происходит аналогично подобным газификаторам Shell с той разницей, что в газификаторах Siemens в трубки подается вода под высоким давлением и парообразования не происходит, зато во внешней рубашке охлаждения генерируется пар низкого давления. Технология Siemens является универсальной для газификации углей, начиная от лигнитов и заканчивая антрацитами. С 1984 по 2010 г. смонтировано и пущено в эксплуатацию четыре крупных газификационных агрегата. Так в составе КЦКГ Вржешова (Чехия) газификатор Siemens установлен для газификации смол и жидких органических отходов, образующихся после газификации бурого угля в 26 газификаторах Lurgi. В 2009–2010 гг. в Китае были сданы в эксплуатацию два крупнотоннажных газификационных агрегата для получения аммиака и метанола при газификации твердых углей и антрацита.

В качестве ОБГ применяется ПКВО синтез-газа. Секция ПКВО расположена в нижней части газификатора. В настоящее время компанией Siemens разработана конструкция газификатора со встроенным радиантным теплообменником-парогенератором, охлаждающим синтез-газ до 700–800 °С. Это позволит применить данную технологию для производства электроэнергии.

Технология *PRENFLO* [22] разработана компаниями Krupp и Shell. С 1981 г. исключительные права на ее использование принадлежат компании Krupp Uhde.

Технология предназначена для газификации углей и нефтекокса. Осуществляется пневмоподача измельченного сухого топлива в газификатор. Газификация проходит в спутном потоке с паро-кислородным дутьем при температуре около 1600 °С. На выходе из камеры газификации горячий синтез-газ разбавляется холодным очищенным синтез-газом и с температурой около 800 °С поступает в теплообменник-парогенератор, где охлаждается до 380 °С и далее идет на очистку. Разработана также конструкция газификатора, в котором применяется ПКВО.

Промышленной инсталляцией технологии является крупнейшее в мире КЦКГ, работающее на твердом топливе в Пуэрто-Лано (Испания) мощностью 338 МВт по электроэнергии. В качестве топлива использовалась смесь угля и нефтекокса. Агрегат находится в работе с 1996 г. [23].

Выводы. Рассмотрены основные технологии, применяющиеся в газификационных агрегатах большой единичной мощности. Процесс газификации является ресурсосберегающим и более экологически чистым, чем существующие процессы термохимической конверсии топлив и углеродосодержащих соединений, а также является более полигенеративным, так как полученный синтез-газ является сырьем для получения ряда химических продуктов, электроэнергии, водорода, жидких и газообразных топлив.

Основной проблемой теплообменной сети узла газификаторов является надежность работы теплообменных элементов и аппаратов, утилизирующих тепло горячего синтез-газа. Это лимитирует применение рекуперативных теплообменных аппаратов и напрямую связано со стадией очистки синтез-газа от механических примесей.

Перспективой для дальнейших исследований является изучение стадии очистки синтез-газа от соединений серы и улавливания углекислого газа и поиск возможностей построения эффективных теплообменных систем.

Благодарность. Авторы выражают признательность ГУ «Комитет науки Министерства образования и науки Республики Казахстан» (договор №98) за финансовую поддержку.

Литература

1. Handbook of Gasifiers and Gas-Treatment Systems. DoE/ET 10159 – T24, 1982.
2. IGCC State-of-art report. A part of EU-FP7 Sub Project 4, WP-1 – System analysis, University of Stavanger, Norway, 2010, 91 pp.
3. Gasification Technologies Project Portfolio, NETL, USDoE, Version 2006.
4. Gasification Database. Gasification Plant Report. NETL, USDoE, 2010, 191 pp.
5. China Gasification Database: Existing and Developmental Plants and Projects, July, 2014.
6. C. Higman. State of the Gasification Industry – the Updated Worldwide Gasification Database. – International Pittsburgh Coal Conference, September 16–19, 2013, Paper, 11 pp.
7. Strategic Issues for IGCC. Report CRN 08-16A, Bluewave Resources LLC, 2009 Update, Virginia, USA, 35 pp.
8. Мешалкин В.П., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А. (2006). Основы теории ресурсосберегающих интегрированных химико-технологических систем. Харьков: НТУ «ХПИ».
9. S. Mangena. Effective Utilization in Sasol Gasification Technology Perspective. – SACPS International Conference “Coal Powering the Future”, Secunda, South Africa, 2009, 12 pp.
10. J.C. van Dyk et al. Suitability of feedstocks for the Sasol-Lurgi fixed bed dry bottom Gasification process. – “Gasification Technologies”, 2001, San Francisco, 11 pp.
11. O. Turna. Sasol-Lurgi Fixed Bed Dry Bottom Gasification for Fuels and Chemicals. –Presentation at 2nd International Freiberg Conference, 8-12th May, 2007, 22 pp.
12. M. Mak. The Merits of Heavy Residue Gasification in Today;s World. – Presentation at Gasification Technologies Conference, 2010, 16pp.
13. J. Volk. Innovation in Gasification. – Presentation at Gasification Technologies Conference 2011, October 2011, 13 pp.
14. T. Kreutz. Shell Gasifier-based coal IGCC with CO₂ capture: partial water quench vs. Novel Water-Gas Shift. – Proceedings of ASME TurboExpo 2010, Glasgow, 10 pp.
15. R.D. Doctor et al. Life-Cycle Analysis of Shell Gasification-Based Multi-Product System With CO₂ Recovery. – The first National Conference on Carbon Sequestration, May 15–17, 2001, Washington, DC, USA, Paper, 29 pp.
16. O. Mourstad. An Overview of Coal Based IGCC Technology. MITLFEE 2005-02 WP. Massachusetts Institute of Technology, USA, Sept. 2005
17. Bottomless Refinery Gasification. Imagination of Work. – General Electric Presentation, 5/24/2010, 13pp.
18. Tampa Electric Polk Power Station IGCC Project. Final Technical Report. Cooperative Agreement DE-FC-21-91MC27363, August 2002, Tampa, FL, USA, 26 pp.
19. P. Amik. ConocoPhilips Petroleum Coke Gasification Synergies for Refineries. – Presentation, Gulf Coast Power Association, April 14, 2005, 17 pp.

20. Fuchen Wang. Coal Gasification Technology in China: Application and Development. – Presentation, 35 pp.

21. F. Hanemann et al. Siemens IGCC and Gasification Technology – Today’s Solution and Developments. – Presentation at 2nd International Freiberg Conference, 8–12 May 2007, 17 pp.

22. M. Heinritz-Adrian. PRENFLO™ for biomass and coal (co-) gasification. – Presentation at 4th International Freiberg Conference, 3–5 May, 2010, Dresden, Germany, 27 pp.

23. F. Garcia Pena. ELCOGAS IGCC Plant: Clean Coal Technology Experience and Future. – Presentation at Potsdam, May 14, 2004, OPET Network, 21 pp.

Bibliography (transliterated)

8. Meshalkin V.P., Tovazhnyansky L.L., & Kapustenko P.A. (2006). Osnovy teorii resursosberegaiushchih integrirovannykh khimiko-technologicheskikh system. Kharkov: NTU “KhPI”

УДК 66.045.1

Товажнянський Л.Л., Зебешев Т.З., Перевертайленко О.Ю., Капустенко П.О.,
Бухкало С.І., Комутова А.С.

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ОСНОВНИХ СХЕМ ГАЗИФІКАЦІЙНИХ АГРЕГАТІВ ВЕЛИКОЇ ОДИНИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Досліджено основні технології, що застосовуються у сучасних газифікаційних агрегатах великої одиничної потужності. Вказано на основну проблему у роботі теплообмінних елементів та апаратів, що утилізують тепло гарячого синтез-газу. Визначено перспективу подальших досліджень для побудови ефективних теплообмінних систем.

Tovazhnyansky L.L., Zebeshev T.Z., Perevertaylenko O.Yu., Kapustenko P.O.,
Buhkalo S.I., Komutova A.S.

RESEARCH OF BIG GASIFICATION PLANTS PROCESSING SYSTEMS STRUCTURE

The basic gasification technologies used for big gasification plants were investigated. The main problem for heat exchange equipment processing of gasification island was underlined. The future researches direction was defined.

УДК 665.63:66.045.126

Товажнянский Л.Л., Арсеньева О.П., Хавин Г.Л., Дунаевский В.А., Арсеньев П.Ю.,
Пугач Я.А.

ПРОЕКТ РЕКУПЕРАТИВНОГО НАГРЕВА ОТОПИТЕЛЬНОЙ ВОДЫ НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ЗАВОДЕ

Введение. Многообразие процессов нагрева и охлаждения в процессе технологии как неглубокой, так и глубокой переработки нефти, позволяет использовать рекуперацию тепла, в том числе и для подогрева сетевой отопительной воды централизованного теплоснабжения. Решение проблемы получения дешевой отопительной воды невозможно без тепловой реконструкции технологической схемы основного производства и замены или модернизации теплового оборудования для повышения уровня энергосбережения. Реализация такой идеи является актуальной задачей, имеющей научную и практическую ценность.

Анализ исследований и состояние вопроса. Проблеме тепловой реконструкции нефтехимических заводов посвящено большое количество теоретических и экспериментальных исследований. В настоящее время наиболее эффективным методом в многочисленных исследованиях принято считать «пинч-анализ» [1,2]. Метод «пинч-анализа» позволяет на стадии проектирования и модернизации снизить энергопотребления за счет более высокой доли регенерации тепла, которое достигается повышением тепловой интеграции технологического процесса, что и есть главное приложение «пинч-анализа». При этом достижения «пинч-анализа» не могут быть реализованы без внедрения нового современного теплопередающего оборудования и правильного его расчета.

Среди последних публикаций, использующих в исследованиях «пинч-анализ», необходимо отметить работы [3,4], посвященные общей проблеме утилизации отработанного тепла для разных видов теплоносителей технологической схемы нефтеперерабатывающего завода. Улучшение технологии и, как следствие, применение нового оборудования, требует внесения изменений в топологию установки теплообменников даже в случае, когда теплообменная сеть уже была запроектирована с использованием «пинч-анализа». С этой точки зрения рассмотренная проблема формулируется как задача снижения затрат утилит при модернизации теплообменных сетей. Также актуальным является использование технологического тепла в коммунальном теплоснабжении.

В работах [5,6] рассмотрена реконструкция отделения предварительного нагрева сырой нефти перед блоком перегонки. Используя программное обеспечение, авторам удалось промоделировать теплообменную сеть с лучшими показателями по сравнению с существующей сетью. Проведенный анализ показал не только возможность повышения выходной температуры сырой нефти, но и экономию тепла для достижения этой цели.

Модернизация теплообменных сетей требует изменения топологии существующей сети: добавление, удаление, перестановка и перемещение теплообменников, изменение тепловой нагрузки, разветвление потоков, а также изменение разделения потоковых фракций. Реализация этого процесса невозможна без корректного расчета пластинчатых теплообменников [7,8]. Ключевой проблемой при эксплуатации теплообменных аппаратов всех типов является прогнозирование их работоспособности во времени. Не-

смотря на достигнутые успехи при моделировании появления и прогнозирования загрязнений во времени [9,10], этот вопрос для многих отраслей промышленности остается недостаточно изученным. Загрязнение теплопередающей поверхности теплообменного оборудования приводит не только к нарушению температурного и гидравлического режима работы всего технологического процесса, но и к значительным финансовым потерям, связанным с остановкой оборудования на чистку или безостановочную промывку в процессе его эксплуатации.

Цель работы. Целью настоящего исследования является анализ и проектирование последовательной схемы установки рекуперативных теплообменных аппаратов в процессе тепловой реконструкции нефтеперегонного завода, а также анализ работоспособности предложенных к установке теплообменников и прогнозирование их загрязнения во время работы.

Постановка задачи. В результате «пинч-анализа» существующего отделения технологии подготовки сырой нефти и частично дистилляции [11,12], а также предварительного анализа схемы с модификацией 6 аппаратов [11,12], было установлено, что последовательная схема установки теплообменников более выгодна, чем параллельная. Результатом анализа является проект установки аппаратов, представленный на рис. 1.

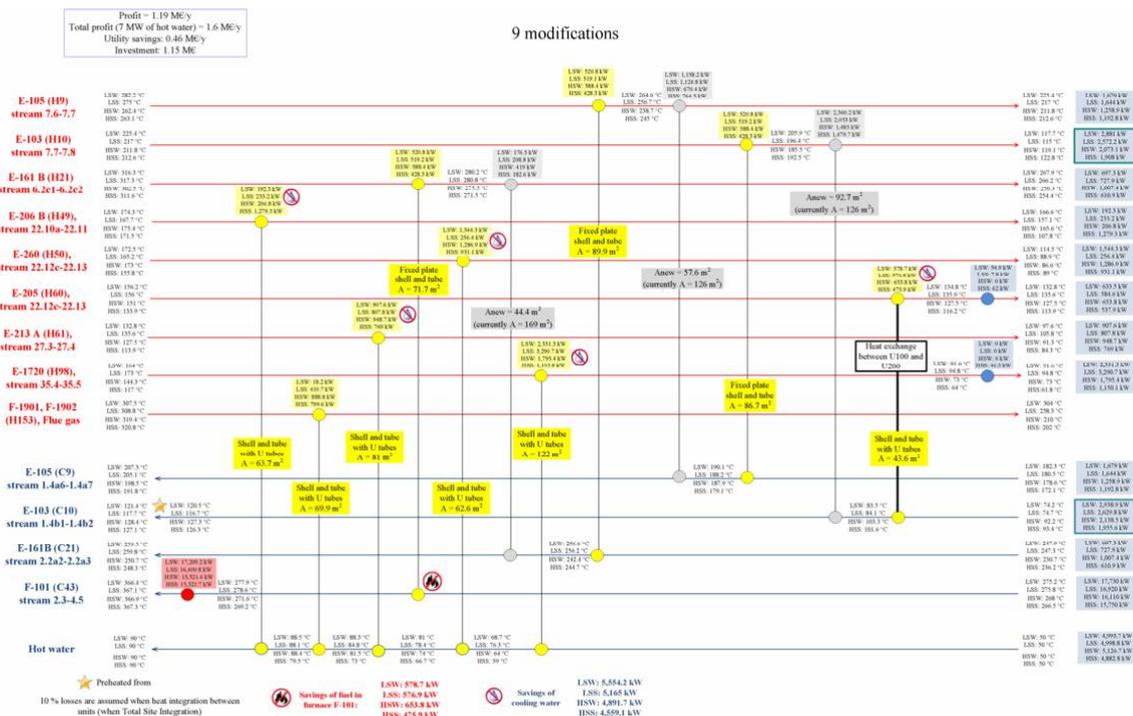


Рисунок 1 – Последовательная схема установки теплообменников подогрева воды центрального теплоснабжения

Для каждого из теплообменников в качестве греющего теплоносителя могут использоваться среды: легкий и тяжелый вакуумный газойль (LVGO и HVGO), обычный газойль (GO) или продукт III cut oil. Эти среды в процессе эксплуатации завода могут применяться в четырех модификациях – LWS; LSS; HWS; HSS, в зависимости от времени года и содержания серы в составе теплоносителя. Для каждой из сред и их моди-

фикаций, в результате расчетов получена отдельная тепловая нагрузка и значения расходов.

Результаты решения. Для каждой из 9-ти позиций рекуперации тепла (рис. 1) были подготовлены и проанализированы исходные данные для определения марки и типа теплообменных аппаратов, наилучшим образом подходящих для работы на этих позициях. Для каждого из предполагаемых к установке аппаратов проведен расчет подогрева отопительной сетевой воды. Было принято, что эти теплообменники устанавливаются по последовательной схеме. Например, для теплообменника E213A из последовательной схемы подогрева воды, данные для расчета представлены в табл. 1, результаты расчета в табл. 2.

Таблица 1 – Данные для расчета теплообменника E213A

Позиция	Среда	Тепловая нагрузка, кВт	LVGO: температура по греющей стороне, °C		Вода: температура по холодной стороне, °C	
			Вход	Выход	Вход	Выход
1	LSW	907,6	132,8	97,6	68,7	75,9
2	LSS	807,8	135,6	105,8	76,3	82,8
3	HSW	948,7	127,5	91,3	64,0	71,4
4	HSS	769,0	113,9	84,3	59,0	65,3

В расчетах принимались потери давления по холодной и горячей стороне – 50 кПа, запас поверхности – 10 %. К установке были приняты теплообменники типа Compracloc производства «Альфа Лаваль», материал пластин – AISI 316L, толщина пластины – 0,8 мм (CPL50 – 1,0 мм).

Таблица 2 – Результаты расчетов для расчета теплообменника E213A

Модель	Компоновка	Поверхность теплопередачи, м ²	Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)	Запас, %	Касательное напряжение на стенке (горячая /холодная), Па
CPL30	5×16М /3×27М	18,14	1228	13	43,40 / 58,62
CPL30	4×20М /3×27М	18,14	1121	15	30,48 / 56,64
CPK40	4×15М /2×20М +1×21М	20,01	1209	10	32,60 / 67,18
CPL30	5×16М / 3×27М	18,14	1201	12	47,71 / 55,72

Для аппаратов на 1–4 позициях (для различных сред – LWS; LSS; HWS; HSS) все подобранные теплообменники могут быть установлены и будут обеспечивать подогрев воды. Теплообменник марки CPK40 с компоновкой 4×15М/2×20М+1×21М и теплопередающей поверхностью 20,01 м² может быть принят к установке для всех четырех сред. Параметры работы этого аппарата представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов для расчета теплообменника E213A

Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)	Запас, %	Касательное напряжение на стенке (горячая /холодная), Па	Потери давления по греющей стороне, кПа
1115	22	30,78 / 64,78	23,09
1023	40	32,95 / 62,64	24,68
1209	10	32,60 / 67,18	26,91
1098	20	33,54 / 61,45	25,17

Специфические условия для рекуперации тепла легкого вакуумного газойля в теплообменнике E213A могут быть выполнены на для всех модификаций сред, путем установки аппаратов типа Comrabloc марки CPL30 и СРК40.

Установка СРК40 для всех сред с компоновкой 4×15М/2×20М+1×21М обеспечивает выполнение расчетных условий. При этом для LSW и LSS коэффициент теплоотдачи несколько падает, что свидетельствует о его работе в не совсем выгодных условиях. Частично это касается и установки этого теплообменника для HSW.

Заключение. На все позиции рассчитаны пластинчатые теплообменные аппараты перекрестного тока типа «Comrabloc», которые полностью удовлетворяют заданным рабочим условиям и обеспечивают достаточно высокую работоспособность при длительной эксплуатации.

Из проведенных расчетов и их анализа можно сделать следующие основные выводы. Для нагрева централизованной сетевой воды последовательная схема присоединения теплообменников обеспечивает более высокую скорость холодного теплоносителя (воды) в каналах, что дает более высокое значение касательного напряжения на стенке, и меньшую склонность к появлению загрязнений и отложений в процессе эксплуатации. В целом при последовательном присоединении коэффициент теплопередачи аппаратов выше, что дает снижение площади теплообмена и уменьшение стоимости устанавливаемых аппаратов.

Возможность установки на одной позиции теплообменного аппарата для всех используемых сред не всегда оправдана так, как резкое отличие в тепловой нагрузке может привести к эксплуатации аппарата с низкой скоростью теплоносителя в каналах теплообменника.

Литература

1. Основы интеграции тепловых процессов / Р. Смит, И. Клемеш, Л.Л. Тобажнянский, П.А. Капустенко, Л.М. Ульянов // Харьков: НТУ "ХПИ", 2000. – 458 с.
2. Мешалкин В.П. Основы теории ресурсосберегающих интегрированных химико-технологических систем / В.П. Мешалкин, Л.Л. Тобажнянский, Р.А. Капустенко. – Харьков: НТУ" ХПИ". – 2006. – 616 с.
3. Retrofitting Crude Oil Refinery Heat Exchanger Networks to Minimize Fouling While Maximizing Heat Recovery / B.L. Yeap, D.I. Wilson, G.T. Polley, S.J. Pugh // Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications Engineering Conferences International Year, 2003. – P. 1–8.

4. Chegini. S. Modification of Preheating Heat Exchanger Network in Crude Distillation Unit of Arak Refinery Based on Pinch Technology / S. Chegini. R. Dargahi, A. Mahdavi // Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008, San Francisco, USA.
5. Heat exchanger network modification for waste heat utilisation under varying feed conditions / J.Y. Yong., A. Nemet, P.S. Varbanov, J.J. Klemes, L. Cucek, Z. Kravanja, V. Mantelli // Chemical Engineering Transactions, 2015. – 43. – P. 1279–1284.
6. Gadalla M.A. A new graphical method for Pinch Analysis applications: Heat exchanger network retrofit and energy integration // Energy, 2015. – 81, N3. – P. 159–174.
7. Пластинчатые теплообменники в промышленности / Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л. Арсеньева О.П. Пластинчатые теплообменники в промышленности. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004. – 232 с.
8. Mathematical modelling and optimal design of plate-and-frame heat exchangers / Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin, G. // Chemical Engineering Transactions. – 2009. – 18. – P. 791–796.
9. Optimal design of plate-and-frame heat exchangers for efficient heat recovery in process industries / O.P. Arsenyeva, L.L. Tovazhnyansky, P.O. Kapustenko, G.L. Khavin // Energy. – 2011. – 36(8). – P. 4588–4598.
10. Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers / O.P. Arsenyeva, B. Crittenden, M. Yang, P.O. Kapustenko // Applied Thermal Engineering. – 2013. – 61(1). – P. 53–59.
11. Проектирование системы теплообменников подогрева отопительной воды на нефтеперерабатывающем заводе / Л.Л. Товажнянский, О.П. Арсеньева, П. Варбанов и др. // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2015. – № 3. – С. 56–63.
12. Обоснование выбора и прогноз работоспособности теплообменников подогрева отопительной воды на нефтеперерабатывающем заводе / О.П. Арсеньева, П. Варбанов, П.А. Капустенко и др. // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2015. – № 3. – С. 67–72.

Bibliography (transliterated)

1. Osnovyi integratsii teplovyih protsessov / R. Smit, I. Klemesh, L.L. Tovazhnyansky, P.A. Kapustenko, L.M. Ulyev // Harkov: NTU "HPI", 2000. – 458 p.
2. Meshalkin V.P. Osnovyi teorii resursosberegayuschih integrirovannyih himiko-tehnologicheskikh sistem / V.P. Meshalkin, L.L. Tovazhnyansky, R.A. Kapustenko. –Harkov: NTU" HPI". – 2006. – 616 p.
3. Retrofitting Crude Oil Refinery Heat Exchanger Networks to Minimize Fouling While Maximizing Heat Recovery / B.L. Yeap, D.I. Wilson, G.T. Polley, S.J. Pugh // Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications Engineering Conferences International Year, 2003. – P. 1–8.
4. Chegini S. Modification of Preheating Heat Exchanger Network in Crude Distillation Unit of Arak Refinery Based on Pinch Technology / S. Chegini. R. Dargahi, A. Mahdavi // Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008, San Francisco, USA.
5. Heat exchanger network modification for waste heat utilisation under varying feed conditions / J.Y. Yong., A. Nemet, P.S. Varbanov, J.J. Klemes, L. Cucek, Z. Kravanja, V. Mantelli // Chemical Engineering Transactions, 2015. – 43. – P. 1279–1284.

6. Gadalla M.A. A new graphical method for Pinch Analysis applications: Heat exchanger network retrofit and energy integration // *Energy*, 2015. – 81, N3. – P. 159–174.

7. Platinchatyie teploobmenniki v promyishlennosti / Tovazhnyanskiy L.L., Kapustenko P.A., Havin G.L. Arseneva O.P. Platinchatyie teploobmenniki v promyishlennosti. – Harkov: NTU «HPI». – 2004. – 232 p.

8. Mathematical modelling and optimal design of plate-and-frame heat exchangers / Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin, G. // *Chemical Engineering Transactions*. – 2009. – 18. – P. 791–796.

9. Optimal design of plate-and-frame heat exchangers for efficient heat recovery in process industries / O.P. Arsenyeva, L.L. Tovazhnyansky, P.O. Kapustenko, G.L. Khavin // *Energy*. – 2011. – 36(8). – P. 4588–4598.

10. Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers / O.P. Arsenyeva, B. Crittenden, M. Yang, P.O. Kapustenko // *Applied Thermal Engineering*. – 2013. – 61(1). – P. 53–59.

11. Proektirovanie sistemyi teploobmennikov podogreva otopitelnoy vodyi na neftepererabatyivayuschem zavode / L.L. Tovazhnyansky, O.P. Arseneva, P. Varbanov i dr. // *Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie*. – 2015. – # 3. – P. 56–63.

12. Obosnovanie vyibora i prognoz rabotosposobnosti teploobmennikov podogreva otopitelnoy vodyi na neftepererabatyivayuschem zavode / O.P. Arseneva, P. Varbanov, P.A. Kapustenko i dr. // *Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie*. – 2015. – # 3. – P. 67–72.

УДК 665.63:66.045.126

Товажнянський Л.Л., Арсенєва О.П., Хавін Г.Л., Дунаєвський В.А., Арсенєв П.Ю., Пугач Я.А.

ПРОЕКТ РЕКУПЕРАТИВНОГО НАГРІВУ ОПАЛЮВАЛЬНОЇ ВОДИ НА НАФТОПЕРЕРОБНОМУ ЗАВОДІ

Розглянуто задачу проектування теплообмінників для підігріву сітрової води централізованого тепlopостачання на нафтопереробному заводі. Для послідовної схеми приєднання проводився розрахунок для 4-ох технологічних потоків. У якості рекуперативних теплообмінників підігріву води використовувати сварні апарати перехресного току типу «Compabloc». Зроблено вивід про можливість використання апаратів для усіх технологічних потоків.

Tovazhnyansky L.L., Arsenyeva O.P., Khavin G.L., Dunaevsky V.A., Arsenyev P.U., Pugach Y.A.

PROJECT OF REGENERATIVE HEATING OF HEATING WATER ON OIL REFINERY FACTORY

The problem of the design of heat exchangers for heating of the district water on the oil refinery factory is considered. For serial connection circuit for 4 process streams are perform calculations. As a recuperative heat exchanger for heating water the welded cross-type machines «Compabloc» current is used The conclusion about the possibility of using equipment's for all process streams.

УДК 66.045.1

Хавин Г.Л., Арсеньева О.П., Мацегора А.И., Кусаков С.К., Бочарников И.А.,
Василенко А.А.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Вступление. В настоящее время в государственной энергетической политике Украины экономии энергетических ресурсов отдается высший приоритет, что подтверждается разработкой и внедрением ряда национальных, отраслевых и региональных программ энергосбережения. Реализацию экономически целесообразных энергосберегающих проектов можно рассматривать в качестве альтернативы роста цен на энергоносители в условиях проявляющегося в некоторых регионах энергетического кризиса. Особенно важным является внедрение быстроокупаемых проектов в области распределения и потребления тепловой энергии, что, по некоторым оценкам [1], составляет величину, достаточную для решения проблем коммунальной энергетики без увеличения тарифов на энергоснабжение или отключение потребителей независимо от их уровня оплаты за энергоресурсы.

Для систем теплоснабжения Украины характерно максимальное упрощение оборудования тепловых вводов большинства потребителей. Это использование элеваторов на вводе и наличие центральных тепловых пунктов (ЦТП) для нужд горячего водоснабжения (ГВС). Последние обслуживают, как правило, большие группы зданий, а порой и целые микрорайоны. Системы такого типа обуславливают значительные потери тепла при подаче отопления и горячей воды потребителю. При этом снижение температуры теплоносителя, подаваемого от источника тепла, оборудование вводов потребителей приводит к существенному понижению температуры воздуха в помещениях и температуры воды ГВС.

В ряде стран Западной Европы, которые имеют довольно крупные системы тепловых сетей (Швеция, Финляндия, Германия и др.) характерно размещение на вводах зданий индивидуальных тепловых пунктов (ИТП), оснащенных пластинчатыми подогревателями для отопления и ГВС, средствами автоматического регулирования и насосным оборудованием. Это позволило снизить нагрузки на тепловые сети, эксплуатационные затраты на ремонт коммуникаций и обеспечить эффективное регулирование отпуская тепла. По данным [2], при реконструкции систем теплоснабжения применение компактных ИТП позволяет значительно увеличить степень рекуперации тепла. При этом наибольший эффект достигается за счет реконструкции периферийных точек системы потребителей.

Состояние проблемы и формулировка задачи. Как отмечено в [3], наибольший экономический эффект достигается в научно обоснованном применении пластинчатых теплообменных аппаратов при энергоэффективной реконструкции открытых систем тепло- и горячего водоснабжения. В практике проектирования, строительства и эксплуатации теплоснабжающих систем имеются известные недостатки, приводящие к перерасходу тепловой энергии. К ним относятся: перегрев в теплый период отопительного сезона зданий, присоединенных к централизованному теплоснабжению; большие тепловые потери в наружных тепловых сетях. В целях более рационального использования тепловой энергии при централизованном теплоснабжении и особенно теплофи-

кации на первый план выходит вопрос о практической реализации, которая, в первую очередь, должна опираться на качественное и достоверное проектирование. Общая стратегия снижения энергозатрат, в том числе снижение расхода энергоресурсов, снижение потребления воды, снижение вредных выбросов, включает в себя [3]:

- интеграция и оптимизация производственных процессов, в которых имеются теплоиспользующие технологические схемы;
- создание, разработка и внедрение пластинчатых теплообменных аппаратов, и создание на их базе оптимальных теплообменных комплексов;
- разработка и создание программного продукта, а именно пакетов прикладных программ по расчету и оптимизации пластинчатых теплообменников любого типа, синтезу теплообменной поверхности, расчету и синтезу оптимальных систем теплообменных аппаратов; оптимальному расчету и проектированию индивидуальных и местных тепловых пунктов;
- подготовка кадров и научные контакты.

Таким образом, важнейшей задачей при проектировании тепловых пунктов (ТП) является обеспечение возможности быстрых многовариантных расчетов теплообменных аппаратов и другого оборудования для различных схем ТП, с определением стоимости капитальных вложений и последующих эксплуатационных расходов. Последнее обстоятельство позволяет на стадии проектирования выбрать оптимальный вариант из соотношения капитальные затраты – эксплуатационные расходы для различных сочетаний тепловых нагрузок горячего водоснабжения (ГВС) и отопления, смоделировать работу теплового пункта на рабочих режимах и в нештатной ситуации.

Цель работы. Целью настоящей работы является реализация задачи оптимального проектирования индивидуальных тепловых пунктов и создание математического обеспечения для проведения многовариантных расчетов, позволяющее автоматизировать процесс проектирования теплового пункта системы отопления и горячего водоснабжения. Подбор теплообменников отопления и ГВС осуществляется по параллельной, двухступенчатой смешанной и последовательной схемам.

Постановка задачи. Общая схема установки пластинчатых Тепловая нагрузка коммунального теплоснабжения имеет сложную структуру, состоящую из нагрузки отопления, горячего водоснабжения, вентиляции и кондиционирования. Эти виды нагрузки изменяются по различным сезонным и суточным графикам. Расход тепла зависит от схемы присоединения к тепловой сети и метода центрального регулирования.

График тепловой нагрузки отопления имеет сезонную неравномерность при близком к постоянному суточному значению. В течение отопительного сезона тепловая нагрузка здания пропорциональна разности принятой внутренней температуры отапливаемых помещений и наружной температуры воздуха.

Регулирование отпуска тепла в систему отопления осуществляется изменением температуры сетевого теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха (качественное регулирование) и путем изменения расхода сетевого теплоносителя (количественное регулирование). В зависимости от количества присоединенных зданий тепловые пункты делятся на центральные тепловые пункты для присоединения к тепловой сети групп зданий и для присоединения одного здания или его части – индивидуальные тепловые пункты. В зависимости от числа присоединенных потребителей условно принято различать групповые тепловые пункты (ГТП) и районные (РТП). Групповые или микрорайонные тепловые пункты обслуживают группу жилых зданий или

все здания в пределах микрорайона. Районные тепловые пункты обслуживают все здания в пределах жилого района.

В качестве основного вида регулирования применяется центральное регулирование на источнике отпуска тепла (ТЭЦ, котельные). В настоящее время повсеместно развивается дополнительное регулирование отпуска тепловой энергии на групповых, районных, микрорайонных и индивидуальных тепловых пунктах. При этом для каждого вида регулирования имеется своя область эффективного действия: центральное регулирование по замыслу должно ориентироваться на некоторую стандартную нагрузку района и гарантировать обеспечение теплом любого потребителя из этого района. Если система теплофикации имеет достаточное количество разнородных потребителей, тогда целесообразно сочетание центрального качественного регулирования по совмещенной нагрузке отопления и ГВС с групповым, местным или индивидуальным количественным регулированием.

Для местных и индивидуальных тепловых пунктов в случае независимой системы отопления и горячего водоснабжения наиболее эффективными являются присоединение системы отопления через теплообменник отопления и двухступенчатая смешанная схема горячего водоснабжения, рис. 1.

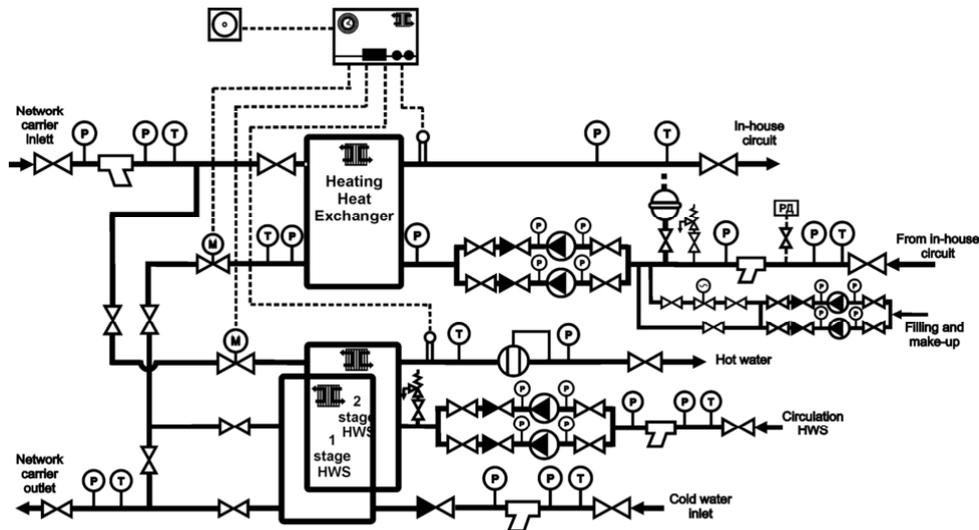


Рисунок 1 – Принципиальная схема индивидуального теплового пункта системы отопления и ГВС (двухступенчатая смешанная схема)

В качестве теплообменных аппаратов в расчетах используется номенклатура разборных теплообменников «Альфа Лаваль». Производится оптимальный расчет аппаратов по критерию минимума приведенных затрат с учетом загрязнения теплопередающей поверхности в процессе эксплуатации. Для реализации метода автоматизированного проектирования принята классификация ТП по нескольким признакам. Классификация по установленному оборудованию теплового пункта с независимым присоединением системы отопления, которая включает в себя следующие варианты компоновки теплового пункта [4].

Классификация по линии подпитки:

- схема теплового пункта системы отопления с насосным блоком на линии подпитки, рис. 2;

- схема теплового пункта системы отопления с обратным клапаном на линии подпитки;
- схема теплового пункта системы отопления без автоматической подпитки.

Классификация по установленному оборудованию на сетевой магистрали:

- схема теплового пункта системы отопления с электроприводным клапаном на подающем трубопроводе сетевого теплоносителя;
- схема теплового пункта системы отопления с электроприводным клапаном на обратном трубопроводе сетевого теплоносителя;
- схема теплового пункта системы отопления с трехходовым краном на обратном трубопроводе сетевого теплоносителя (постоянство расхода).

Классификация по установленному оборудованию в контуре отопления:

- схема теплового пункта системы отопления с циркуляционным насосным блоком на обратном трубопроводе внутреннего контура отопления;
- схема теплового пункта системы отопления с циркуляционным насосным блоком на подающем трубопроводе внутреннего контура отопления.

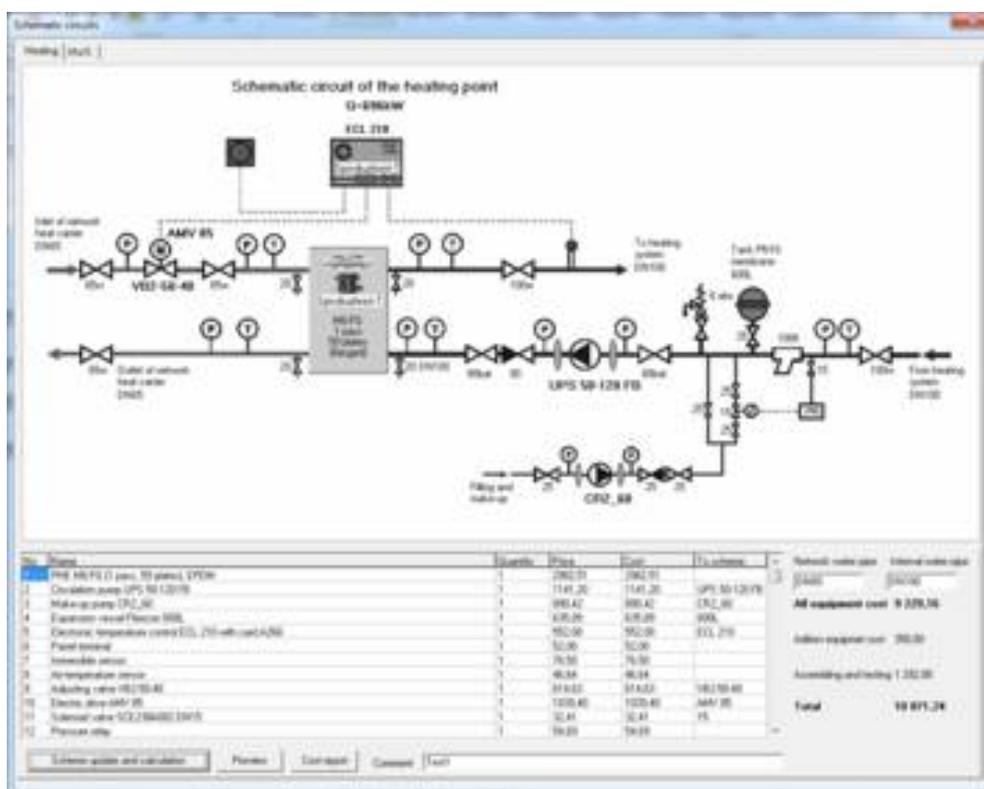


Рисунок 2 – Общий вид, принципиальная схема и номенклатура установленного оборудования для системы отопления

Если провести классификацию по установленному оборудованию теплового пункта ГВС, то можно предложить следующие варианты компоновки теплового пункта.

Классификация по установленному оборудованию на сетевой магистрали:

- схема теплового пункта системы ГВС с электроприводным клапаном на подающем трубопроводе сетевого теплоносителя, рис. 3;

- схема теплового пункта системы ГВС с электроприводным клапаном на обратном трубопроводе сетевого теплоносителя;
- схема теплового пункта системы отопления с трехходовым краном на обратном трубопроводе сетевого теплоносителя (постоянство расхода).

Классификация по установленному оборудованию в контуре холодного теплоносителя ГВС (по наличию или отсутствию повысительного насоса):

- схема теплового пункта системы ГВС без повысительного насосного блока;
- схема теплового пункта системы ГВС с повысительным насосным блоком на трубопроводе, подающем холодную воду;
- схема теплового пункта системы ГВС с повысительным насосным блоком на трубопроводе, подающем горячую воду.

Число вариантов исполнения теплового пункта ГВС достаточно ограничено, что также, как и для тепловых пунктов системы отопления, позволяет в значительной степени унифицировать их изготовление в серийном порядке.

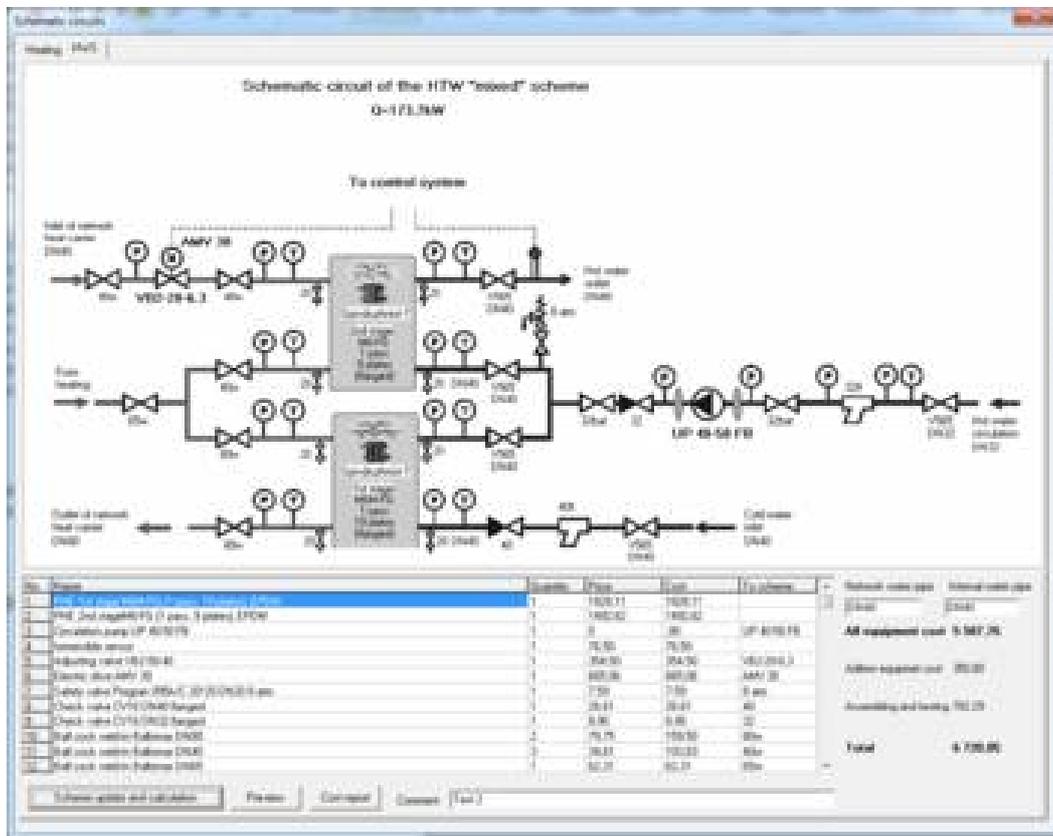


Рисунок 3 – Общий вид, принципиальная схема и номенклатура установленного оборудования для двухступенчатой смешанной схемы ГВС

В разработанном математическом обеспечении предусмотрено проектирование теплового пункта горячего водоснабжения по двум основным схемам: смешанной двухступенчатой и параллельной. При проектировании предусмотрена установка циркуляционного насоса или циркуляционно-повысительного насоса, как варианта реализации для смешанной двухступенчатой схемы.

В качестве оборудования системы управления и контроля по умолчанию используется оборудование фирмы «Danfoss», в состав которого входит:

- электронные регуляторы серии ECL Comfort 210 и (или) ECL Comfort 110;
- регулятор температуры для системы отопления или ГВС;
- датчик температуры наружного воздуха марки ESMT, датчик погружной ESMU;
- реле давления;
- клапаны, регулирующие седельные фланцевые марки VB2 и VFM2;
- электроприводы редукторные с импульсным управлением (трехпозиционные) серии AMV 20 и AMV 30, а также AMV 55 и AMV 56.

В качестве соленоидного клапана предлагается использовать электромагнитный клапан производства фирмы ASCO Numatics или TORK.

Вспомогательное оборудование системы обеспечения работы теплового пункта включает в себя:

- предохранительные клапаны Pregran;
- обратные резьбовые и фланцевые клапаны ГРАНЛОК;
- мембранные расширительные баки Flamco Flexcon CE;
- краны шаровые фланцевые приварные Broen Ballomax; муфтовые «Boston», «New York»; шаровые Zetkama;
- фильтры фланцевые Zetkama с магнитной вставкой;
- термометры и манометры с краном «Boston» и «спускником».

Обвязка насосов производится как для одного насоса, так и в дублирующем исполнении. В комплект насосного блока входят:

- задвижки типа «Баттерфляй» фланцевые;
- обратные фланцевые и резьбовые клапаны ГРАНЛОК;
- компенсаторы трубопроводные резиновые (гибкие вставки) фланцевые и муфтовые.

Проектирование оборудования теплового пункта и расчет его стоимости оборудования осуществляется автоматически после выбора комплектации теплового пункта. Предлагаются принципиальные схемы и таблицы со списком выбранного оборудования для отопления и ГВС. Предусмотрено редактирование или внесение изменений в номенклатуру оборудования ТП и пересчет новой полной стоимости. Все внесенные изменения найдут свое отражение на схеме теплового пункта и в протоколе его стоимости.

Заключение. Таким образом, представленный пакет программ автоматизированного проектирования оборудования теплового пункта, позволяет:

- производить оптимальный подбор теплообменного оборудования для системы отопления и ГВС из номенклатуры разборных теплообменников «Альфа Лаваль»;
- осуществлять подбор циркуляционных и подпиточного насосов по заданному критерию выбора;
- при расчете присоединения системы ГВС по двухступенчатой схеме оптимизировать значение температуры и потерь напора между ступенями;
- запроектировать общую схему ТП, подобрать и рассчитать оборудование ТП, редактировать конфигурацию модуля в целом;
- оценить стоимость изготовления с учетом монтажа и сборки всего теплового пункта;
- получить необходимую техническую и экономическую документацию.

Литература

1. Мешалкин В.П. Основы теории ресурсосберегающих интегрированных химико-технологических систем / В.П. Мешалкин, Л.Л. Товажнянский, Р.А. Капустенко. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2006. – 616 с.

2. Пластинчатые теплообменники в промышленности / Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л. Арсеньева О.П. Пластинчатые теплообменники в промышленности. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2004. – 232 с.

3. Mathematical modelling and optimal design of plate-and-frame heat exchangers / Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin, G. // Chemical Engineering Transactions. – 2009. – 18. – P. 791–796.

4. Пластинчатые теплообменники в теплоснабжении / Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин, О.П. Арсеньева. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007. – 448 с.

Bibliography (transliterated)

1. Meshalkin V.P. Osnovy teorii resursosberegayuschih integrirovannyih himiko-technologicheskikh sistem / V.P. Meshalkin, L.L. Tovazhnyansky, R.A. Kapustenko. – Harkov: NTU" HPI". – 2006. – 616 p.

2. Plastinchatyie teploobmenniki v promyishlennosti / Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A., Khavin G.L. Arseneva O.P. Plastinchatyie teploobmenniki v promyishlennosti. – Harkov: NTU «HPI». – 2004. – 232 p.

3. Mathematical modelling and optimal design of plate-and-frame heat exchangers / Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin, G. // Chemical Engineering Transactions. – 2009. – 18. – P. 791–796.

4. Plastinchatyie teploobmenniki v teplosnabzhenii / L.L. Tovazhnyansky, P.A. Kapustenko, G.L. Khavin, O.P. Arseneva. – Harkov: NTU «HPI», 2007. – 448 p.

УДК 66.045.1

Хавін Г.Л., Арсеньєва О.П., Мацєгора О.І., Кусаков С.К., Бочарніков І.А.,
Василенко О.А.

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЄКТУВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПУНКТІВ СИСТЕМИ
ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ**

Розроблено автоматизовану систему проєктування теплових пунктів на основі пластинчатих теплообмінників. Представлено їх класифікацію за встановленим обладнанням. Надана номенклатура системи управління роботою теплового пункту та допоміжного обладнання.

Khavin G.L., Arsenyeva O.P., Matsegora O.I., Kusakov S.K., Bocharnikov I.A.,
Vasilenko A.A.

AUTOMATION DESIGN OF HEAT POINT FOR DISTRICT HEATING SYSTEM

The automated system of designing heating points based on plate heat exchangers is developed. Their classification according to the installed basic equipment is submitted. The nomenclature of the operation control system and substation accessories is adduced.

УДК 621.384.6:620.198

Андреева О.Л., Борц Б.В., Костиков А.О., Ткаченко В.И.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНОЙ КОНВЕКТИВНОЙ ЯЧЕЙКИ С ТВЕРДЫМИ И СМЕШАННЫМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ СЛОЕ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ

Большой научный и практический интерес представляет изучение физических процессов, связанных с формированием конвективных ячеек в слоях подогреваемой снизу жидкости, в условиях, когда границы слоя контактируют с жидкими или газообразными средами (свободные границы) или твердыми теплоотводящими массивами (твердые границы). В таких слоях при определенных геометрических размерах и параметрах жидкости возможно образование конвективных ячеистых структур. Процесс образования таких пространственно-временных структур обусловлен неспособностью среды обеспечить необходимый перенос тепла с нижней границы на верхнюю только за счет тепловой диффузии, в следствие чего возникает упорядоченное конвективное движение жидкости обусловленное силой плавучести – разностью архимедовой силы и силы тяжести [1].

Тепловая конвекция – явление массопереноса вещества в поле силы тяжести и градиента температуры, встречается как в природе [2], так и во многих технологических процессах [3]. Конвективный массоперенос воздушных масс, например, эффективно используется в сельском хозяйстве [4]. Явление конвекции также применяется в сложных процессах выращивания кристаллов для микроэлектроники [5].

Поэтому целью настоящей работы является экспериментальное исследование зарождения и развития устойчивых конвективных структур в подогреваемом снизу горизонтальном слое вязкой, несжимаемой жидкости с твердыми или смешанными (верхняя граница свободная, нижняя – твердая) граничными условиями.

Для экспериментального исследования зарождения и развития конвективных ячеек с твердыми или смешанными граничными условиями необходимо жидкости придать свойства однофазной суспензии [6], что позволяет визуализировать процесс. Однофазность суспензии необходима для того, чтобы пограничный слой жидкости на нижней границе не являлся свободной дисперсионной средой и, в некотором смысле, не являлся смазкой для второй фазы – суспензии, а имел такие же свойства, что и основная масса жидкости. Это условие накладывает определенные требования на параметры частиц дисперсной фазы [6]:

– либо размер частиц дисперсной фазы должен быть достаточно малым (порядка толщины поверхностной пленки жидкости), сводя, таким образом, толщину прослоек свободной дисперсионной среды к минимуму;

– либо объемное содержание твердых частиц дисперсной фазы должно быть значительно меньше их предельного объемного содержания, обеспечивая максимальную толщину прослоек свободной дисперсионной среды.

В експериментах первое требование реализации твердых или смешанных граничных условий было выполнено за счет использования в качестве однофазной вязкой среды вакуумного масла ВМ-5 с добавлением в него, для визуализации процесса, определенного количества (50–100 мг) масляной краски белого цвета. Размер частиц такой краски достаточно мал – менее 15 мкм (ГОСТ 11826-77), что меньше толщины пограничного слоя масла и способствует формированию однофазной жидкости.

Второе требование может быть выполнено добавлением в вакуумное масло алюминиевой пигментной пудры ПАП-1, которая представляет собой тонкоизмельченные частицы алюминия пластинчатой формы, средняя толщина пластин которой составляет приблизительно 0,25–0,50 мкм, а средний линейный размер 20–30 мкм (ГОСТ 5494–95) в таких малых количествах, что визуализация еще возможна, а вязкость суспензии соответствует вязкости дисперсионной среды.

На Рис. 1, 2 приведены микрофотографии вакуумного масла ВМ-5 с добавлением в 2 мл масла масляной краски в количестве 0,05 гр (рис. 1) или алюминиевой пигментной пудры ПАП-1 в количестве 0,005 г (рис. 2), выполненные на микроскопе МБС-9.



Рисунок 1 – Распределение частиц масляной краски в вакуумном масле, увеличение $\times 42$



Рисунок 2 – Распределение частиц алюминиевой пудры в вакуумном масле, увеличение $\times 42$

Анализ рисунков указывает на то, что в случае добавленной в вакуумное масло масляной краски прослойки в виде свободной дисперсионной среды отсутствуют (рис. 1), в то время, как в пространственном распределении частичек алюминиевой пудры наблюдаются прослойки свободной дисперсионной среды толщиной порядка 0,3–0,5 мм (рис. 2).

Таким образом, описанные выше способы подготовки жидких, вязких сред могут быть использованы для реализации твердых или смешанных граничных условий при моделировании конвективных процессов в слоях подогреваемой снизу вязкой, несжимаемой жидкости.

В опытах использовалось 2 мл вакуумного масла ВМ-5 с добавлением масляной краски в количестве 0,05 гр., или алюминиевой пигментной пудры в количестве 0,005 гр.

Цилиндрическая емкость заполнялась маслом, толщина слоя которого выбиралась эмпирически и равнялась 1,0 мм, после чего емкость накрывалась стеклянной крышкой так, чтобы крышка соприкасалась с маслом. Дно емкости равномерно подогревалось электрической печью, в результате чего его температура поднималась до уровня 140 ± 1 °С.

В ходе проведения экспериментов показано, что в тонком слое масла при подогреве снизу начинают образовываться обособленные ячейки цилиндрической формы, которые по аналогии с [7, 8] будем называть элементарными. Внутри каждой ячейки масло поднималось вверх по центру ячейки, и опускалось вниз по ее внешней границе.

На рис. 3. показаны фотографии цилиндрических конвективных ячеек в вакуумном масле с добавлением масляной краски. Их количество с увеличением температуры дна цилиндрической емкости от 82 °С до 110 °С растет, начиная от одной-двух ячеек и заканчивая плотной упаковкой в емкости с изменением цилиндрической формы на призматическую (на поверхности масла образуются многоугольники, формирующие в конце концов упорядоченную гексагональную структуру в виде ячеек Бенара. Измеренный диаметр конвективных ячеек варьировался в интервале 2,4–2,5 мм.

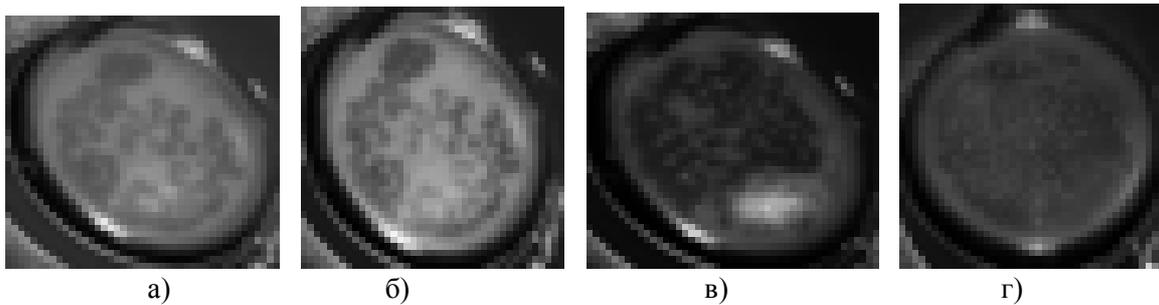


Рисунок 3 – Изменение количества ячеек в масле с добавлением масляной краски при варьировании температуры дна емкости:

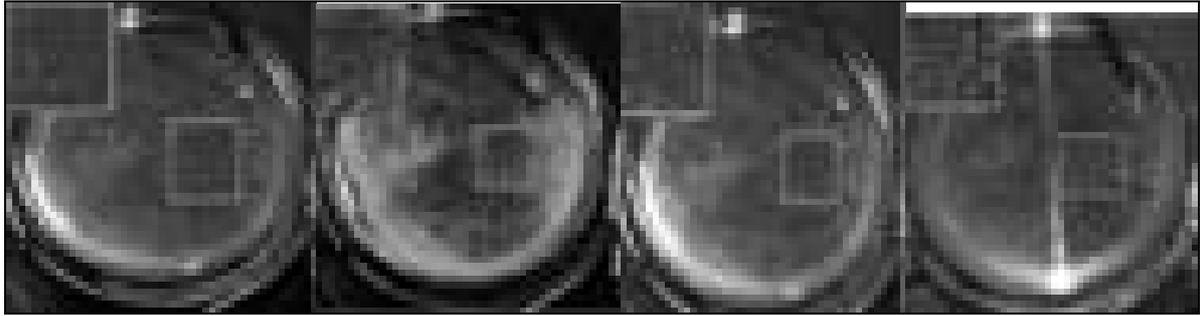
температура верхней границы масла и дна ёмкости соответственно

а) 81 и 91 °С, б) 85 и 96 °С, в) 92 и 110 °С, г) 97 и 110 °С

В экспериментах с алюминиевой пигментной пудрой цилиндрическая емкость заполнялась маслом, толщина слоя которого выбиралась эмпирически и равнялась $h=1$ мм. Равномерный подогрев дна емкости осуществлялся электрической печью и поднималась до уровня 130 ± 1 °С. В этих экспериментах также, как и в случае с добавлением масляной краски, зарождались элементарные конвективные ячейки. Динамика жидкости внутри каждой ячейки, и их переход в упорядоченную конвективную структуру повторяли динамику предыдущего эксперимента.

На рис. 4. показаны фотографии цилиндрических конвективных ячеек в вакуумном масле с добавлением алюминиевой пудры. Измеренный диаметр конвективных ячеек варьировался в интервале 2,6–2,7 мм.

На рис. 4. прямоугольниками выделены области, в которых наблюдается зарождение цилиндрических ячеек: сначала 3–5, затем 5–6, а на последних снимках – от 10–12 до 20. Видно, что ячейки имеют цилиндрическую форму, и разделены прослойками неподвижного масла определенной толщины.



а) б) в) г)

Рисунок 4 – Изменение количества ячеек в масле с добавлением алюминиевой пудры при варьировании температуры дна емкости:
температура верхней границы масла и дна ёмкости соответственно
а) 84 и 113 °С, б) 87 и 118 °С, в) 92 и 122 °С, г) 95 и 126 °С

Исходя из результатов экспериментов, можно сделать вывод, что при определенной температуре дна емкости в слое масла с добавкой такого небольшого количества масляной краски или алюминиевой пудры, что реализуются твердые граничные условия (верхнюю часть емкости накрывали стеклом), появляются обособленные элементарные конвективные ячейки цилиндрической формы. С увеличением температуры дна емкости количество элементарных цилиндрических конвективных ячеек увеличивается вплоть до полного заполнения ими объема масла с переходом в упорядоченную структуру в виде ячеек Бенара. Независимо от вида добавленной дисперсной фазы (масляная краска или алюминиевая пудра), отношение диаметра элементарных конвективных ячеек к толщине слоя варьируется от 2,65 до 2,83, т.е. безразмерный диаметр ячеек со смешанными граничными условиями меньше диаметра элементарной конвективной ячейки со свободными границами, который примерно равен 3,4 [7, 8].

Заключение

Экспериментальные исследования формирования конвективных ячеек в горизонтальном, подогреваемом снизу слое вакуумного масла для смешанных граничных условий (верхняя граница свободная, нижняя – твердая) проведены для двух вариантов визуализации процесса.

Первый вариант реализации смешанных граничных условий заключался в использовании в качестве однофазной вязкой среды вакуумного масла ВМ–5 с добавлением в него, для визуализации, небольшого количества (50–100 мг) масляной краски белого цвета, размер частиц которой достаточно мал – менее 15 мкм.

Второй вариант заключался в добавлении в масло небольшого количества алюминиевой пудры (5 мг). Микроскопическими исследованиями показано, что малые количества добавленной алюминиевой пудры не изменяют вязкость и плотность масла. Таким образом, масло представляет собой однофазную среду, в которой реализуются граничные условия на твердой стенке. В экспериментах показано, что при определенной температуре дна емкости в слое масла с добавкой небольшого количества масляной краски или алюминиевой пудры появляются обособленные ячейки цилиндрической

форми. С увеличением температуры дна емкости количество ячеек увеличивается вплоть до полного заполнения ими объема масла с переходом в упорядоченную структуру в виде ячеек Бенара. Независимо от вида добавленной дисперсной фазы, безразмерный (отнесенный к толщине слоя масла) диаметр ячеек варьируется в пределах от 2,65 до 2,83.

Литература

1. Chandrasekhar S. Hydrodynamic and hydromagnetic stability / S. Chandrasekhar. – Oxford University Press, 1970. – 657 p.
2. Неклюдов И.М. Прикладная гидромеханика / И.М Неклюдов, Б.В Борц., В.И.Ткаченко – ХНУ им. В.Н. Каразина, Том. 14(86), № 2,2012 – С. 29–40.
3. Щука А.А. Нанoeлектроника / А.А. Щука. – М.: Физматкнига, 2007. – 464 с.
4. Сажин Б.С. Сушка и промывка текстильных материалов: теория, расчет процессов / Б.С. Сажин, В.А. Реутский – М. : Легпромбытиздат, 1990. – С. 17–66.
5. Мюллер Г. Выращивание кристаллов из расплава. Конвекция и неоднородности / Г. Мюллер; [пер. с англ. В. Бунэ]. – М.: Мир, 1991. – 143 с.
6. Ходаков Г.С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование / Г. С. Ходаков // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). – 2003. Том. XLVII. № 2. с. 33–44.
7. Bozbey L.S. Elementary convective cell in the layer of incompressible, viscous liquid and its physical properties / L.S. Bozbey, A.O. Kostikov, V.I. Tkachenko // International conference MSS-14 «Mode conversion, coherent structures and turbulence». – Space Research Institute, Moscow, 2014. – P. 322–328.
8. Experimental study of liquid movement in free elementary convective cells / L. Bozbiei, B. Borts, Yu. Kazarinov, A. Kostikov, V. Tkachenko // Energetika. – 2015. – Т 61, № 2. – P. 45–56.

Bibliography (transliterated)

1. Chandrasekhar S. Hydrodynamic and hydromagnetic stability / S. Chandrasekhar Oxford University Press, 1970. – 657 p.
2. Neklyudov I.M. Prikladnaya gidromekhanika / I.M Neklyudov, B.V Borts., V.I.Tkachenko – HNU im. V.N. Karazina, Tom. 14(86), № 2,2012. – P. 29–40.(in Russian).
3. Schuka A.A. Nanoelektronika / A.A. Schuka fizmatkniga,ucheb.posobie dlya vuzov, 2007. – 464 p. (in Russian).
- 4.Sazhin B.S. Sushka i promyivka tekstilnyih materialov: teoriya, raschet protsessov / B.S. Sazhin, V.A. Reutskiy – М. : Legprombytizdat, 1990. – P. 17–66. (in Russian).
5. Myuller G. Vyirashivanie kristallov iz rasplava. Konvektsiya i neodnorodnosti / G. Myuller; [per. s angl. V. Bune]. – М.: Mir, 1991. – 143 p. (in Russian).
6. Hodakov G.S. Reologiya suspenziy. Teoriya fazovogo techeniya i ee eksperimentalnoe obosnovanie / G.S. Hodakov // Ros. him. zh. (Zh. Ros. him. ob-va im. D.I. Mendeleeva). –2003. Tom. XLVII. № 2. p. 33–44. (in Russian).

7. Bozbey L.S. Elementary convective cell in the layer of incompressible, viscous liquid and its physical properties / L.S. Bozbey, A.O. Kostikov, V.I. Tkachenko // International conference MSS-14 «Mode conversion, coherent structures and turbulence». – Space Research Institute, Moscow, 2014. – P. 322–328.

8. Experimental study of liquid movement in free elementary convective cells / L. Bozbiei, B. Borts, Yu. Kazarinov, A. Kostikov, V. Tkachenko // Energetika. – 2015. – Т 61, № 2. – P. 45–56.

УДК 621.384.6:620.198

Андреева О.Л., Борц Б.В., Костіков А.О., Ткаченко В.І.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТАРНОЇ КОНВЕКТИВНОЇ КОМІРКИ З ТВЕРДИМИ І ЗМІШАНИМИ ГРАНИЧНИМИ УМОВАМИ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ ШАРІ В'ЯЗКОЇ НЕСТИСКУВАНОЇ РІДИНИ

Наведено результати експериментальних досліджень формування конвективних комірок із змішаними граничними умовами у вакуумній оливі. Показано, що малі кількості доданої дисперсної фази (алюмінієва пудра) не змінюють в'язкість і щільність олива, і в таких умовах застосовні граничні умови на твердій стінці для швидкості рідини.

Andreeva O.L., Borts B.V., Kostikov A.O., Tkachenko V.I.

EXPERIMENTAL STUDY OF FORMATION ELEMENTARY CONVECTION CELL IN THE HORIZONTAL LAYER OF VISCOUS INCOMPRESSIBLE LIQUID WITH RIGID AND MIXED BOUNDARY CONDITIONS

The result of experimental study of convection cells formation of vacuum oil with mixed boundary conditions was presented. The adding small amounts of dispersed phase (aluminum powder) the viscosity and density of the oil didn't change and under such conditions the boundary conditions for liquid velocity on a rigid boundary can be applied was shown. The experiments demonstrated that exceeding the certain temperature of the container bottom cells of cylindrical shape start to appear in the oil layer with small addition of dispersed phase (oil paint or aluminum powder). The process of appearing of cells finished when the number of cells increases up to the complete filling of oil volume. When amount of the added dispersed phase are small regardless of the its type a rigid boundary conditions can be applied for the lower boundary, i.e. the mixed boundary conditions are present in the layer was shown. The diameter of cells with the mixed boundary conditions varies from 2,65 to 2,83 mm, which is less than the diameter of a cell with free boundary conditions.

УДК 681.513.6:519.718:66

Бобух А.О., Дзевочко О.М., Подустов М.О., Переверзева А.М.

РОЗРОБКА БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІХ ТЕХНОЛОГІЙ ВИРОБНИЦТВА СОДИ

Вступ

Для розробки комп'ютерно-інтегрованих технологій хімічних виробництв перешкодами є відсутність або недостовірність існуючих математичних моделей. А це може призвести до зниження ефективності експлуатації при впровадженні таких виробництв, тому необхідно розробити математичні моделі комп'ютерно-інтегрованих технологій конкретних хімічних виробництв.

Кожна комп'ютерно-інтегрована технологія хімічних виробництв повинна використовувати або перетворювати певним чином не один відповідний параметр, а сукупність параметрів, при цьому характер змінювання кожного із них наперед повністю визначити неможливо [1]. Тому перед проектуванням комп'ютерно-інтегрованих технологій хімічних виробництв та їх впровадженням [2, 3], необхідно провести дослідження та виконати статистичний аналіз основних збурень та параметрів відповідних об'єктів, щоб віднести їх до конкретного класу випадкових процесів. При цьому треба пам'ятати, що причинами, які зумовлюють складність вирішення задач ідентифікації, можуть бути труднощі проведення експериментальних досліджень в реальних умовах протікання відповідних технологій, їх складність, відсутність розроблених методів дослідження, обчислювальні труднощі при обробці експериментальних даних тощо.

Придатність відомих методів ідентифікації отримання математичних моделей [1] визначається лінійністю та не лінійністю характеристик, неперервністю технологій, ступенем передачі динамічних властивостей, рівнем випадкових перешкод, можливістю введення штучних збурень. Але для багатьох технологій хімічних виробництв подавати штучні збурення неможливо із-за порушення нормального їх функціонування, зокрема, до них відноситься виробництво кальцинованої соди за аміачним способом [4].

Мета роботи

Розглянуто теоретичні підстави розробки багато параметричних математичних моделей однієї із основних комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва кальцинованої соди за аміачним способом (ВКС) – технології абсорбції-десорбції та алгоритми для оптимального керування нею, які будуть сприяти ефективному функціонуванню таких технологій, підвищенню їх енергозбереження та ефективності експлуатації.

Основна частина

Структурну та параметричну ідентифікацію таких реальних технологій хімічних виробництв треба виконувати із застосуванням пасивних експериментів [3, 5, 6].

З урахуванням вищенаведеного розглянемо одну із основних технологій ВКС – типову чотириелементну ($i = \overline{1,4}$) технологію абсорбції-десорбції [7], для якої проведений пасивний експеримент із числом (N) вимірювань кожні 15 хвилин $N = 300$ значень для кожного із параметрів. Кожний елемент ($i = \overline{1,4}$) цієї технології має п'ять керуючих ($j = \overline{1,5}$) та п'ять керованих Y_{si} ($s = \overline{1,5}$) параметрів, для яких визначені та при-

ведені (табл. 1) їх мінімальні та максимальні значення.

Таблиця 1 – Умовні позначення, назви керуючих і керованих параметрів технології абсорбції-десорбції, їх мінімальні та максимальні значення та одиниці виміру

Умовне позначення параметрів	Назва параметру	Мінімальне значення параметру	Максимальне значення параметру	Одиниця виміру
X_{ji}	Витрати фільтрової рідини ($j=1$) на один із елементів ($i=1,4$)	80	160	м ³ /год.
X_{ji}	Витрати пари ($j=2$) на один із елементів ($i=1,4$)	20	50	т/год.
X_{ji}	Витрати очищеного розсолу ($j=3$) на один із елементів ($i=1,4$)	70	140	м ³ /год
X_{ji}	Витрати вапняної суспензії ($j=4$) на один із елементів ($i=1,4$)	34	52	м ³ /год
X_{ji}	Сумарні витрати холодної води ($j=5$) на один із елементів ($i=1,4$)	440	510	м ³ /год
$\sum_{i=1}^{i=4} X_{ji}$	Сумарні витрати фільтрової рідини ($j=1$) на чотири елементи	475	485	м ³ /год.
Y_{si}	Концентрація аміаку ($s=1$) в амонізованому розсолі після одного із елементів	4,8	5,2	кмоль/м ³
Y_{si}	Концентрація хлору ($s=2$) в амонізованому розсолі після одного із елементів ($i=1,4$)	4,25	4,6	кмоль/м ³
Y_{si}	Температура суміші ($s=3$) аміаку, вуглекислого газу та пари після одного із елементів ($i=1,4$)	58	62	°C
Y_{si}	Концентрація аміаку ($s=4$) в суспензії дистиляції після одного із елементів ($i=1,4$)	0,2	5,0	моль/м ³
Y_{si}	Концентрація аміаку ($s=5$) в суспензії дистиляції після одного із елементів ($i=1,4$)	2,9	3,4	кмоль/м ³
$Y_{1i}Y_{1i}/Y_{2i}Y_{2i}$	Показник роботи одного із елементів ($i=1,4$) за обмеженнями, які характеризують ступінь абсорбції аміаку очищеним розсолом	1,12	1,17	

За алгоритмами структурної ідентифікації [8] визначені структури математичних моделей кожного із чотирьох елементів, обчислені (табл. 2) середні значення керуючих і керованих параметрів і сумарні витрати фільтрової рідини (як ведучого потоку названої технології), які повинні розраховуватися на початку кожної робочої зміни (8 годин) та залишатися незмінними на її протязі.

Таблиця 2 – Умовні позначення середніх значень керуючих і керованих параметрів та сумарні витрати фільтрової рідини на технологію абсорбції-десорбції

Елемент → Умовне позначення середніх значень параметрів ↓	Елемент 1 $i = 1$	Елемент 2 $i = 2$	Елемент 3 $i = 3$	Елемент 4 $i = 4$	Сумарні витрати фільтрової рідини
$\overline{X_{1i}} \overline{X_{li}}$	145	110	105	120	480
$\overline{X_{2i}}$	49,60	21,14	36,89	49,90	
$\overline{X_{3i}}$	135,97	136,95	142,23	114,79	
$\overline{X_{4i}}$	34,6	35,2	35,3	39,6	
$\overline{X_{5i}}$	460	455	470	465	
$\overline{Y_{1i}}$	4,93	4,89	5,03	4,86	
$\overline{Y_{2i}}$	4,31	4,19	4,49	4,32	
$\overline{Y_{3i}}$	61	61	61	59	
$\overline{Y_{4i}}$	0,4	0,5	0,2	0,3	
$\overline{Y_{5i}}$	3,27	3,29	3,39	3,25	
$/\overline{Y_2} \overline{Y_2}$	1,14	1,17	1,15	1,12	

Параметричну ідентифікацію оптимальної структури названих моделей та статистичний аналіз отриманих результатів краще всього виконувати методом найменших квадратів та алгоритмами стабілізації якісних показників роботи [9] технології абсорбції-десорбції.

Для статистичного аналізу отриманих математичних моделей треба обчислити наступні характеристики:

- а) матрицю кореляцій оцінок параметрів моделі шляхом перетворення інформаційної матриці з ітераційним уточненням отриманих результатів;
- б) залишкові помилки керованих параметрів математичних моделей (E_{si}):

$$E_{si} = Y_{si} - \overline{Y}_{si}; \quad (1)$$

- в) оцінку середньоквадратичного відхилення залишкових помилок математичних моделей ($S_{e_{si}}$):

$$S_{E_{si}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N E_{si}^2}{N-g}}, \quad (2)$$

де g – кількість параметрів в моделі;

г) визначення критерію Фішера (F), як відношення оцінки дисперсії керованого параметру до дисперсії оцінки залишкової помилки математичної моделі для перевірки гіпотези про їх однорідність:

$$F = S_{E_{si}}^2 / S_{Y_{si}}^2; \quad (3)$$

д) визначення коефіцієнту множинної кореляції R_{y/ϕ^j} [8], який показує оцінювання близькості зв'язку між вхідними (керуючими) і вихідними (керованими) параметрами та є своєрідним критерієм адекватності математичної моделі та реального об'єкту за формулою:

$$S_{E_{si}}^2 / S_{Y_{si}}^2 = 1 - R_{y/\phi^j} = \prod_{i=1}^r (1 - \rho_{y, \phi_i, \phi^{i-1}}), \quad \phi_i \in \phi \setminus \phi^{i-1}, \quad (4)$$

де $\rho_{y, \phi_i, \phi^{i-1}}$ – коефіцієнти часткової кореляції;

$$\rho_{y, \phi_i, \phi^{i-1}} = \frac{\rho_{y, \phi_i, \phi^{i-1}} - \rho_{y, \phi_{i-1}, \phi^{i-2}} \cdot \rho_{y, \phi_i, \phi^{i-2}}}{[(1 - \rho_{y, \phi_{i-1}, \phi^{i-2}})(1 - \rho_{y, \phi_i, \phi^{i-2}})]^{1/2}}, \quad (5)$$

$i-1$ – число елементів множини ϕ^{i-1} .

При цьому припускається, що елементи множини ϕ підпорядковані та включені в множини ϕ^{i-1} послідовно $1, 2, \dots, i-1$, тим саме, обумовлено виконання умови $\phi_i \in \phi \setminus \phi^{i-1}$.

Перед визначенням багато параметричних математичних моделей із застосуванням алгоритму визначення тренду [10] були обчислені тренди (для відокремлення не-випадкової компоненти, яка присутня у результатах вимірювань параметрів при промислових експериментах, від випадкової) для керованих параметрів ($f_i(Y_{sj}); i = \overline{1, 4}; s = \overline{1, 5}; j = \overline{1, 5}$), які наведені в табл. 3.

Із застосуванням алгоритмів структурної та параметричної ідентифікацій [5–9] обчислені багато параметричні математичні моделі технології абсорбції-десорбції у вигляді:

$$Y_{si} - f_i(Y_{si}) = \sum_{j=1}^5 E_{ji} (X_{ji} - \bar{X}_{ji}); \quad s = \overline{1, 5}; i = \overline{1, 4}; j = \overline{1, 5}, \quad (6)$$

де $f_i(Y_{si})$ – тренди керованих параметрів; $\bar{X}_{ji} \bar{X}_{ji}$ – середні значення керуючих параметрів; $E_{ji} E_{ji}$ – коефіцієнти для залишкових помилок керуючих параметрів математичних моделей.

Таблиця 3 – Умовне позначення трендів керованих параметрів чотирьох елементів технології абсорбції-десорбції в залежності від часу (t)

Перший елемент, $i = 1$	Другий елемент, $i = 2$
$f_1(Y_{11}) = 5,1955 - 0,0116t - 0,0002t^2$	$f_2(Y_{12}) = 4,875 + 0,0867t + 0,0013t^2$
$f_1(Y_{21}) = 4,3595 - 0,0066t$	$f_2(Y_{22}) = 4,572 - 0,0063t$
$f_1(Y_{31}) = 61,74 - 0,0412t$	$f_2(Y_{32}) = 60,66 - 0,0409t$
$f_1(Y_{41}) = 4,3595 - 0,0066t$	$f_2(Y_{42}) = 4,8001 - 0,0124t$
$f_1(Y_{51}) = 3,113 + 0,0041t$	$f_2(Y_{52}) = 3,0595 + 0,00621t$
Третій елемент, $i = 3$	Четвертий елемент, $i = 4$
$f_3(Y_{13}) = 4,9715 + 0,0003t$	$f_4(Y_{14}) = 4,936 + 0,0635t$
$f_3(Y_{23}) = 4,4205 - 0,0049t$	$f_4(Y_{24}) = 4,437 - 0,0034t$
$f_3(Y_{33}) = 60,49 + 0,0391t$	$f_4(Y_{34}) = 60,69 + 0,0001t$
$f_3(Y_{43}) = 4,025 - 0,0083t$	$f_4(Y_{44}) = 4,951 - 0,0132t$
$f_3(Y_{53}) = 3,071 + 0,0059t$	$f_4(Y_{54}) = 3,051 + 0,0071t$

Значення відповідних коефіцієнтів обчислених 20 математичних моделей технології абсорбції-десорбції наведені в табл. 4, а табличне значення критерію Фішера для $F_{табл.} = 6,61. F_{табл.} = 6,61.$

Аналіз значень коефіцієнтів множинної кореляції R_{si} та критеріїв Фішера для всіх математичних моделей технології абсорбції-десорбції показує, що близькість зв'язку між вхідними (керуючими) і вихідними (керованими) параметрами дуже висока, а умова $F_{облік.} > F_{табл.}$ виконується, тому можна говорити про адекватність отриманих математичних моделей експериментальним даним, тобто взаємозв'язок між кожним вихідним і вхідними параметрами не є випадковим

Висновок

В результаті досліджень розглянуті теоретичні підстави розробки багато параметричних математичних моделей технології абсорбції-десорбції та алгоритми для оптимального керування цією технологією, розроблені математичні моделі, які в першому наближенні можуть бути використані для розробки та впровадження комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва кальцинованої соди за аміачним способом і будуть сприяти ефективному функціонуванню таких технологій та підвищенню їх енергозбереження.

Таблиця 4 – Умовне позначення керованих параметрів $Y_{si}(s=\overline{1,5}; i=\overline{1,4})$, числові значення коефіцієнтів для залишкових помилок керуючих параметрів $(j=\overline{1,5}; i=\overline{1,4})(j=\overline{1,5}; i=\overline{1,4})$ та статистичні оцінки за коефіцієнтами множинної кореляції $(s=\overline{1,5}; i=\overline{1,4})(s=\overline{1,5}; i=\overline{1,4})$ і облікованих критеріїв Фішера $F_{облік.}$ для всіх моделей

		$E_{2i}E_{2i}E_{2i}E_{2i}$	$E_{3i}E_{3i}E_{3i}E_{3i}$	$E_{4i}E_{4i}E_{4i}E_{4i}$	$E_{5i}E_{5i}E_{5i}E_{5i}$	$R_{si}R_{si}R_{si}R_{si}$	$F_{облік.} F_{облік.}$ $F_{облік.} F_{облік.}$
$Y_{11}Y_{11}$	-0,074	0,011	0,821	-0,394	2,494	0,81	11,07
Y_{21}	0,016	0,187	-0,276	0,134	-0,355	0,80	8,72
Y_{31}	-13,12	-139,2	-23,09	-89,31	52,88	0,82	12,10
Y_{41}	18,35	0,346	0,421	1,175	-25,69	0,87	18,21
Y_{51}	0,962	-0,081	0,345	0,745	0,302	0,85	14,62
Y_{12}	0,582	0,765	0,098	-0,443	-0,121	0,84	15,71
Y_{22}	0,241	-0,478	0,196	0,881	0,334	0,84	15,35
Y_{32}	27,52	-9,536	7,611	-2,603	43,66	0,87	19,36
Y_{43}	2,345	-0,183	1,193	12,43	2,547	0,77	8,83
Y_{52}	0,812	-1,076	-0,264	0,725	-0,259	0,75	7,32
Y_{13}	1,031	3,845	-2,385	-2,205	-1,002	0,91	22,59
Y_{23}	-0,303	-0,991	0,662	0,925	0,291	0,81	11,32
Y_{33}	-8,274	6,761	-17,31	-12,31	15,91	0,81	11,23
Y_{43}	10,41	-28,39	7,209	25,21	-3,739	0,78	9,43
Y_{53}	0,715	0,975	0,045	-1,053	-0,428	0,80	10,39
Y_{14}	-0,473	0,634	0,203	-0,321	0,099	0,85	14,79
Y_{24}	0,162	-0,483	5,811	0,845	-0,251	0,81	10,91
Y_{34}	-10,14	7,422	0,634	-3,471	0,078	0,83	13,71
$Y_{44}Y_{44}$	1,986	-0,916	-0,852	1,381	1,983	0,80	10,17
Y_{54}	0,631	-0,994	-0,195	0,291	0,752	0,83	13,49

Література

1. Дорф Р. Современные системы управления [Текст] / Р. Дорф, Р. Бишоп, пер. с англ.: Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 832 с.
2. Соколов Ю.Н. Компьютерное проектирование ПИД-регуляторов [Текст] / Ю. Н. Соколов. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 1 (68). – С. 43–45.
3. Романенко В.Д. Методи автоматизації прогресивних технологій [Текст] / В.Д. Романенко. – К.: Вища школа, 1995. – 519 с.

4. Зайцев И.Д. Производство соды [Текст] / И.Д. Зайцев, Г.А. Ткач, Н.Д. Стоев. – М.: Химия. 1984. – 312 с.
5. Степашко В.С. Методы и критерии решения задач структурной идентификации [Текст] / В.С. Степашко, Ю.Л. Кочерга. // Автоматика. –1985. – № 5. – С. 29–37.
6. Справочник по теории автоматического управления [Текст] / под общ. ред. А. А. Красовского. – М. : Наука, 1987. – 75 с.
7. Бобух А.А. Выбор и оптимизация критерия управления объектом абсорбции-десорбции производства кальцинированной соды [Текст] / А.А. Бобух, А.М. Дзевочко, М.А. Подустов, А.Н. Переверзева, Р.С. Романенко // Щоквартальний науково-практичний журнал «Інтегровані технології та енергозбереження». Видавничий центр НТУ «ХПІ». 2015. № 4. – С. 72–81.
8. Бобух А.О. Алгоритм структурної ідентифікації об'єктів виробництва кальцинованої соди [Текст] / А.О. Бобух, О.М. Дзевочко, М.О. Подустов, А.С. Сляднева // Щоквартальний науково-практичний журнал «Інтегровані технології та енергозбереження». Видавничий центр НТУ «ХПІ». 2016. № 1. – С. 13–18.
9. Бобух А.О. Алгоритм стабілізації якісних показників роботи технологічних процесів абсорбції-десорбції виробництва кальцинованої соди у реальному інтервалі часу [Текст] / А.О. Бобух, О.М. Дзевочко, М.О. Подустов, А.М. Переверзева // Щоквартальний науково-практичний журнал «Інтегровані технології та енергозбереження». Видавничий центр НТУ «ХПІ». 2016. № 3. – С. 15–20.
10. Бобух А.О. Алгоритм ідентифікації технологічних об'єктів хімічних виробництв із визначенням тренду [Текст] / А.О. Бобух, О.М. Дзевочко, М.О. Подустов // Загальнодержавний науково-виробничий та інформаційний журнал «Енергосбережение. Энергетика. Энергоаудит». – 2016. № 2 (145). – С. 43–49.

Bibliography (transliterated)

1. Dorf R. C. Sovremennye sistemy upravleniya. [Tekst] / R C.Dorf, R. H. Bishop – Moscow: Laboratoriua Basovykh Snaniy Publ., 2004. – 832 p.
2. Sokolov YU.N. Komp'yuternoe proektirovanie PID-regulyatorov [Tekst] / YU.N. Sokolov // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. 2010. – no. 1 (68). – pp. 43–45.
3. Romanenko V.D. Metody avtomatizatsii progresivnykh tekhnologii [Tekst] / V.D. Romanenko – Kyiv: Vishcha shkola Publ., 1995. – 519 p.
4. Zaytsev I.D. Proizvodstvo sodyi [Tekst] / I.D. Zaytsev, G.A. Tkach, N.D.Stoev. – Moscow: Himiya. 1984. – 264 p.
5. Stepashko V.S. Metody i kriterii resheniya zadach strukturnoy identifikatsii [Tekst] / V.S. Stepashko, YU.L. Kocherga // Avtomatika. 1985. – no 5. – pp. 29–37.
6. Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravliya [Tekst] / pod obsch. red. A.A. Krasovskogo. – Moscow: Nauka. 1987. – 75 p.
7. Bobukh, A.A. Vybory i optimizatsiia kriteriia upravleniia ob'ektom absorbtcii-desorbtsii virobnytstva kal'tcinirovannoi` sody` [Tekst] / A.A. Bobukh, A.M. Dzevochko, M.A. Podustov, A.N. Pereverseva, R.S. Romantnko // Schokvartal`nii` naukovopraktichnii` zhurnal "Integrovani tekhnologii ta energozberezhennia". Vidavnichii` centr NTU "KHPI". 2015. № 4. – P. 72–81.
8. Bobukh, A.O. Algoritmy strukturnoi identifikatsii ob'ektov virobnytstva kal'tcinirovannoi` sody` [Tekst] / A.O. Bobukh, O.M. Dzevochko, M.O. Podustov, A.S.

Slyadneva // Schokvartal`nii` naukovo-praktichnii` zhurnal "Integrovani tekhnologii ta energozberezhennia". Vidavnichii` centr NTU "KHPI". 2016. № 1. – P. 13–18.

9. Bobukh, A.O. Algoritm stabilizatsii yakisnykh pokaznykiv roboty tekhnologichnykh protsesiv absorptsii-desorbtsii proizvodstva kal`tcinirovannoï sody`u realnovu intervali chasy [Tekst] / A.O. Bobukh, O.M. Dzevochko, M.O. Podustov, A.M. Pereverseva // Schokvartal`nii` naukovo-praktichnii` zhurnal "Integrovani tekhnologii ta energozberezhennia". Vidavnichii` centr NTU "KHPI". 2016. № 1. – P. xx–xx.

10. Bobukh, A.O. Algoritm identifikatsii tekhnologichnykh ob'ektiv khimichnuch vyrobnytstv iz vyznachennym trendu [Tekst] / A.O. Bobukh, O.M. Dzevochko, M.O. Podustov // Zagalnoderzhavnyy naukovo-vyrobnychiy zhurnal "Energoberezhenie. Energetika. Enerdoaudit". – 2016. № 2 (145). – P. 43–49.

УДК 681.513.6:519.718:66

Бобух А.А., Дзевочко А.М., Подустов М.А., Переверзева А.Н.

**РАЗРАБОТКА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ
ПРОИЗВОДСТВА СОДЫ**

В результате исследований рассмотрены теоретические основания разработки многопараметрических математических моделей технологии абсорбции-десорбции и алгоритмы для её оптимального управления, разработаны математические модели, которые в первом приближении могут быть использованы при разработке и внедрению компьютерно-интегрированных технологий производства кальцинированной соды по аммиачному способу, а также будут способствовать эффективному функционированию и повышению энергосбережения этой технологии.

Bobukh A.O., Dzevochko O.M., Podustov M.O., Pereverzieva A.M.

**DEVELOPMENT OF MATHEMATICS MULTIPARAMETER
MODEL COMPUTER-INTEGRATED MANUFACTURING
TECHNOLOGIES SODA**

The studies examined the theoretical bases of development multi-parametric mathematical models of the absorption-desorption technology and algorithms for its optimal control, mathematical models, which in the first approximation can be used in the development and implementation of computer-integrated technologies soda ash production by ammonia method, and It will also contribute to the effective functioning and increase energy savings of this technology.

Илюнин О.О., Капустенко П.А., Кусаков С.К., Перевертайленко А.Ю., Селяков А.М., Шамраев А.А.

НЕЙРОСЕТЕВОЙ СУПЕРВИЗОР НЕПРЕРЫВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Введение. Непрерывные технологические процессы (ТП) в период функционирования используют ресурсы и различные виды энергии. В настоящее время во всем мире особое значение при проектировании и модернизации химических производств имеют аспекты энергосбережения [1] и минимизации использования сырьевых ресурсов и вредных сбросов [2]. Важную роль в решении этих задач занимает системы управления и регуляторы ТП [3], при синтезе которых используют современные методы, модели и алгоритмы теории искусственных нейронных сетей и нечеткой логики и кластерного анализа.

Для процессов и объектов с неизвестными или сложно формализуемыми нелинейными математическими моделями регуляторы разрабатываются на основе экспертных знаний по рассматриваемой проблеме, учитывая опыт оператора, который успешно освоил управление соответствующим объектом путем обучения. Всегда существует проблема неполноты знаний эксперта, а в процессе работы оператор часто ни разу не сталкивается с некоторыми пограничными или редко встречающимися режимами ТП, которые могут оказаться критическими, хотя сами эти границы критических состояний и алгоритмы выхода из них могут быть описаны достаточно прозрачными моделями и четкими регламентами.

Проблема стабилизации нелинейных систем решается посредством применения дополнительных супервизорных регуляторов. Схема управления для обеспечения устойчивости системы, приведенная в [4], представлена на рис. 1. Устойчивость управляемой системы обеспечивается за счет использования дополнительного супервизора R2 в помощь основному регулятору R1 контура управления C1 (или группе регуляторов).

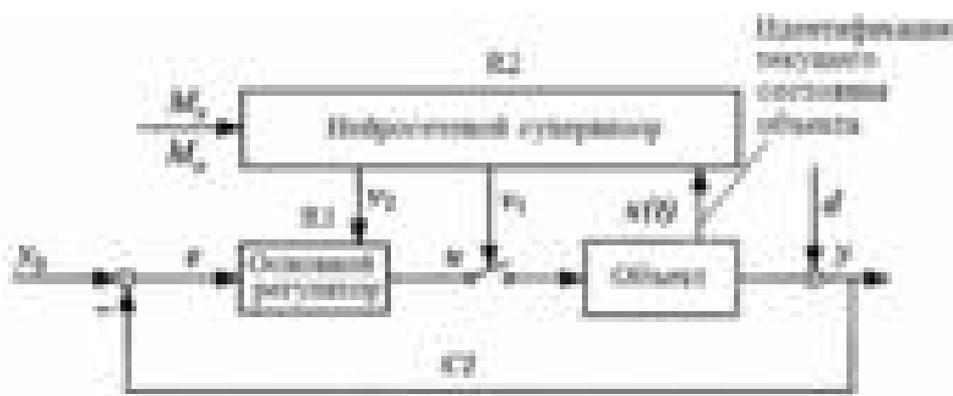


Рисунок 1 – Нейросетевой супервизор обеспечения устойчивости управления нелинейными системами

Работу предлагаемого супервизора можно описать следующим образом. Супервизор отслеживает состояние и входы объекта управления. Если состояние системы под влиянием возмущения d выходит за некоторые установленные границы M_x (становится потенциально опасным), то он запускает стабилизирующее действие v_2 , чтобы вернуть объект в область допустимых состояний M_o . Если результат выполнения стабилизирующего действия неудовлетворителен, то сигнал v_1 осуществляет отключение входного управляющего сигнала u .

Так, например, в сетях транспортировки теплоносителя к критическим состояниям относят изменение регламентных порогов давления (порывы в сети, отказы насосных групп, засоренность фильтров, отложения в каналах теплообменных аппаратов). В непрерывных травильных агрегатах (НТА) окалины стального проката к критическим состояниям относят: превышение пороговых значений мультигидратов солей железа в составе травильного раствора (ТР), при достижении которого обязательно производится освежение ТР (частичный слив и замена), т.к. возможен аварийный останов процесса; достижение регламентного минимума концентрации серной кислоты в ТР, ниже которого процесс становится неэффективным, и при достижении которого выполняется обязательный долив кислоты и воды в ТР.

Введение супервизора упрощает структуру управления объектом, поскольку сразу на этапе разработки системы появляется возможность отказаться от многих достаточно жестких ограничений, вытекающих из критериев устойчивости, и обеспечивает возможность спроектировать регуляторы основных контуров управления с более высокими характеристиками реализуемого процесса регулирования (значением коэффициента усиления), что обеспечивает априорную устойчивость системы в целом.

Целью статьи является представление формализованной процедуры, основанной на методах теории нейронных сетей и нечетких систем, для построения нейросетевого супервизора нелинейного объекта в виде многослойного персептрона (МП), формирующего воздействия v_1, v_2 .

Подход, основанный на использовании основного регулятора (ОР) и супервизорного регулятора, позволяющий осуществить стабилизацию систем нечеткого управления, включающих нелинейные объекты некоторых классов, описывается в [5], где под понятием устойчивости принимается, что состояние системы не выходит за границы, установленные при проектировании. Критерии устойчивости, аналогичные получаемым согласно вход-выходному методу и методу Ляпунова, дают возможность обосновать устойчивость систем управления в основном при небольших значениях коэффициентов усиления. По мере того, как частота выполняемых регулятором действий увеличивается, проверка устойчивости становится все более затруднительной.

Метод разработки супервизора, предложен в [6], где дается строгое доказательство и методика проверки устойчивости системы управления для случая неизвестной модели объекта. Управляющий регулятор Ванга обеспечивает устойчивость нечеткого управления для некоторого класса нелинейных объектов, описываемых уравнением вида:

$$x^{(n)} = f(x) + g(x)u, \quad (1)$$

где $x \in \mathfrak{X}$ – выход объекта, а $u \in \mathfrak{U}$ – его вход. Предполагается, (а в нашем случае так и есть), что вектор состояния $x = [x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}]^T$ можно вычислить или измерить, а f, g – неизвестные нелинейные функции. Математические модели многих нелинейных объектов можно с успехом представить в виде (1). Примем, что основной регулятор (полученный с помощью любого из методов) реализует управление $u_r(x)$, а граница M_x задает те состояния объекта, которые можно считать безопасными и устойчивыми.

Момент активации регулятора-супервизора зависит от значения M_x , определяемого соотношением:

$$M_x : |x(t)| \geq M_x, \quad \forall t \geq 0, \quad (2)$$

где $|x(t)|$ — модуль вектора состояния. Входной сигнал рассматриваемого объекта:

$$u = u_r(x) + I \cdot u_s(x), \quad (3)$$

где функция инициализации I воздействия на ОР определяется в виде:

$$I(x(t)) = \begin{cases} 1, & \text{if } |x| \geq M_x, \\ 0, & \text{if } |x| < M_x. \end{cases} \quad (4)$$

Чтобы обосновать устойчивость системы такого рода, принимают, что известны значения верхнего предела f'' функции f и нижнего предела g_l функции g . Требования для функций f'' и g_l определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} f''(x) &: f(x) \leq f''(x), \\ g_l(x) &: 0 < g_l(x) \leq g(x). \end{aligned} \quad (5)$$

Как правило, известен только общий вид $g(x)$, а в ходе течения ТП функция принимает случайные значения, и построить $I(x(t))$ в аналитическом виде классическими методами представляется затруднительным.

Нечеткие регуляторы (НР), построенные по моделям Мамдани на основе синглетонов с помощью непрерывно дифференцируемых функций принадлежности решают подобные задачи. НР являются прототипами искусственных нейронных сетей (ИНС), которые могут успешно замещать НР в структурах управления [7]. Построение функции инициализации $I(x(t))$ при нелинейно связанных f, g значительно упрощается с использованием аппарата ИНС, в частности персептронов [8].

Персептрон представляет собой модель следующего вида:

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^N w_{ji} x_i + \theta_j\right), \quad (6)$$

где y_j – выходной сигнал j -го нейрона; f – ограничивающая или пороговая функция (активационная); N – число входов; w_{ji} – синаптические веса; x_i – входные сигналы ($i = \overline{1, N}$); $\theta_j, (\theta_j \in R)$ – пороговый сигнал, также называемый *смещением*; с активационной функцией вида:

$$f(z) = \begin{cases} 1 & \text{при } z \geq \theta; \\ 0 & \text{при } z < \theta. \end{cases} \quad (7)$$

При достижении взвешенной суммой значения, большего заданного порога θ , на выходе нейрона появляется единичный сигнал, если же взвешенная сумма меньше θ , сигнал отсутствует.

Особенностью персептрона является способность к обучению его весовых коэффициентов. Упрощенный персептрон представлен на рис. 2, где w_1 и w_2 – весовые коэффициенты; $\theta > 0$ – порог выходного нейрона.

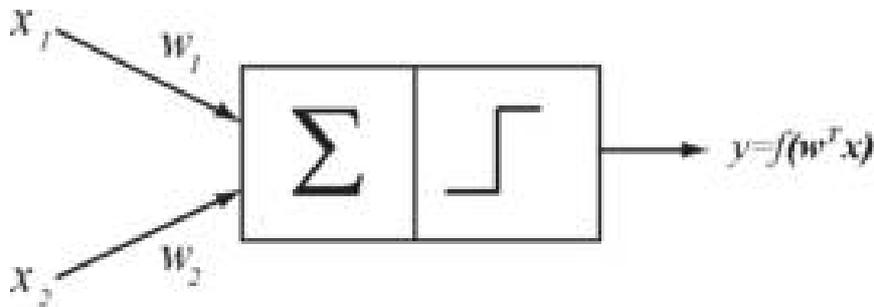


Рисунок 2 – Персептрон

В основе процесса обучения персептрона лежит следующее правило: весовые коэффициенты персептрона изменяются только тогда, когда возникает расхождение между его фактической и желаемой реакциями. В режиме обучения ему предъявляют образы – обучающие пары (x, y^*) , на основании которых он настраивает свои параметры так, чтобы при появлении некоторого входного вектора x на его выходах появлялись соответствующие этому входу сигналы y . Процесс обучения заканчивается, когда все пары (x, y^*) ассоциируются правильно. Алгоритм обучения персептрона реализует способ обучения с учителем, при котором выходная ошибка минимизируется. Реализация данного обучения возможна только при известном наборе значений выходных переменных для всех обучающих пар.

Процесс обучения заключается в последовательном предъявлении множества обучающих пар $(x_p, y_p^*), p = \overline{1, P}$, где $x_p, y_p^* - N \times 1$ – входной вектор и желаемый выходной сигнал p -ой обучающей пары соответственно, с помощью которых определяется требуемый вектор весовых коэффициентов w^* .

Алгоритм обучения может быть записан следующим образом:

$$w_{p+1} = w_p + \gamma e_p x_p, \quad (8)$$

где $e_p = y_p^* - y_p$ – ошибка классификации; γ – параметр, влияющий на скорость сходимости алгоритма (длительность процесса обучения).

Алгоритм обратного распространения ошибки, называемый в дальнейшем просто алгоритмом обратного распространения, (Backpropagation, BP), представляющий собой расширенное дельта-правило, широко известен и описан в источниках [8,9]. Он реализует градиентный метод минимизации выпуклого (обычного квадратичного) функционала ошибки в многослойных сетях прямого распространения, использующих модели нейронов с дифференцируемыми, монотонно возрастающими функциями, имеющими отличные от нуля производные на всей области определения активации. Их применение обеспечивает правильное обучение и функционирование сети. Процесс обучения состоит в последовательном предъявлении сети обучающих пар $(x(i), y^*(i))$, $i = \overline{1, P}$, где $x(i)$ и $y^*(i)$ – вектор входных и желаемых выходных сигналов сети соответственно, изучении реакции на них сети и коррекции в соответствии с реакцией весовых параметров (элементов весовой матрицы). Начальным весам присваиваются небольшие различные случайные значения (при одинаковых значениях сеть не будет обучаться).

Таким образом, при обучении сети подача входного сигнала и вычисление реакции соответствует *прямому* проходу сигнала от входного слоя к выходному, а вычисление ошибки и коррекция выходных параметров – *обратному*, когда сигнал ошибки распространяется по сети от ее выхода к входу. При обратном проходе осуществляется послойная коррекция весов, начиная с выходного слоя.

При превышении общей концентрации мультигидратов сульфата железа C_n с учетом содержания моногидрата сульфата железа ($C_n = X + C_{2n}$, где X – мультигидраты вида $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ и $FeSO_4 \cdot 4H_2O$) в ТР, немедленно производят освежение, что в нормированном виде представлено на рис. 3 (а,б). Освежение ТР производится на внешней границе гипотенузы треугольной области.

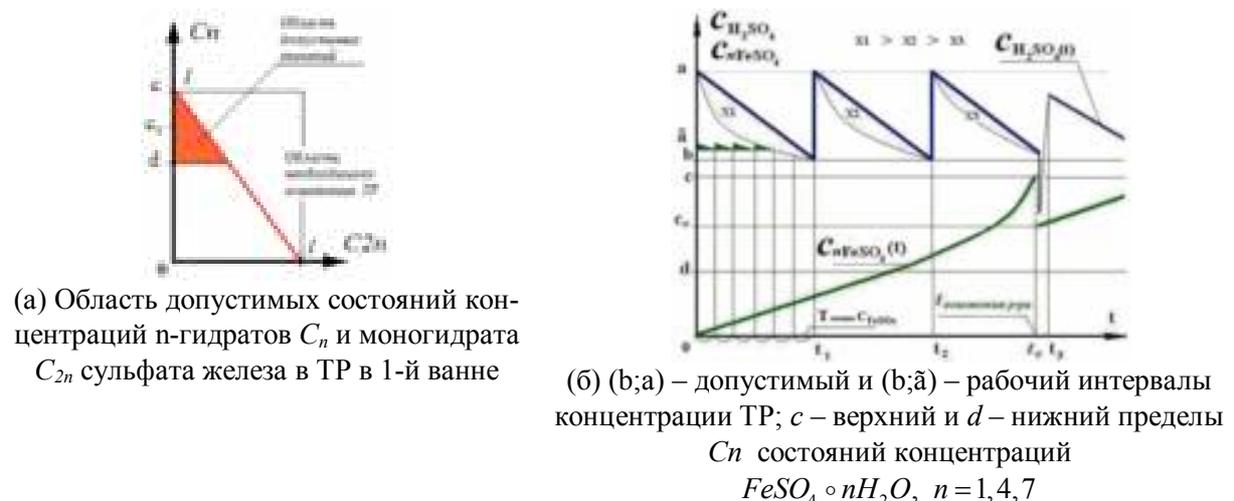


Рисунок 3 – Области допустимых состояний травильного раствора

Функция $g(C, C_n, C_{2n})$ ограничена сверху гиперповерхностью $g(\bar{a}, c, c_{2n})$ и $b \leq f(c) \leq a$, согласно регламента и в соответствии с (6). С учетом этих ограничений функций f, g была проведена серия измерений состава ТР в ходе течения ТП и сформирован массив обучающих пар для МП.

Многослойный персептрон с тангенциальными активационными функциями 1-го и 2-го слоев и сигмоидальными – в выходном слое, где дополнительные нейроны 2-го и 3-го слоев являются пороговым смещением $\theta_j, (\theta_j \in R)$ в формуле (7), и послойно вычисленными векторами весовых коэффициентов w^* , представлен на рисунке 4.

МП имеет структуру 3-8-2, у которого три входа: (C, C_n, C_{2n}) и два выхода. Выходы инициируют управляющие сигналы: при $u_{refr} = 1$ происходит останов подачи полосы на травление и освежение или полная замена ТР; при $u_{add} = 1$ увеличение концентрации ТР. Обучение МП проходило в пакете NeurophStudio (рис. 5) при заданном пороге ошибки $e^2 = 0,01$ по ВР-алгоритму с последовательным уменьшением параметра сходимости от $\gamma = 0,15$ до $\gamma = 0,1$ в каждой эпохе обучения.

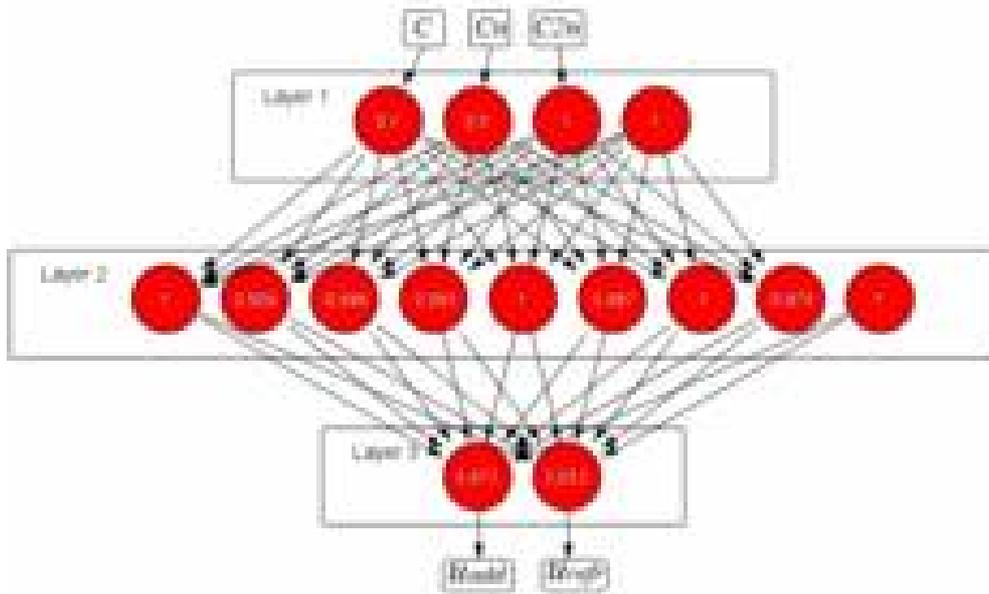


Рисунок 4 – Нейросетевой супервизор НТА на многослойном персептроне



а) первая эпоха: $\gamma=0,15$; $e^2 = 0,0447$



б) третья эпоха: $\gamma=0,1$; $e^2 = 0,0099$

Рисунок 5 – Уменьшение ошибки e^2 в процессе обучения МП

Выводы. Представленный усовершенствованный супервизор Ванга препятствует работе объекта при критичных состояниях, передавая управление «целевым» регуляторам различных типов и обеспечивая устойчиво безопасную работу объекта в целом. Синтез переключающей функции I значительно упрощен за счет применения аппарата теории ИНС. Применение МП дает возможность: разделить алгоритм управления на две части; декомпозировать сложный регулятор на несколько более простых; формализовано смягчить ограничения при их проектировании.

Литература

1. Капустенко П.А., Кузин А.К., Макаровский Е.Л., Тovaжнянский Л.Л., Ульев Л.М., Черная Е.Б. (2004). Альтернативная энергетика и энергосбережение: современное состояние и перспективы. ООО Издательский дом “Вокруг цвета”.
2. Мешалкин В.П., Тovaжнянский Л.Л., Капустенко П.А. (2006). Основы теории ресурсосберегающих интегрированных химико-технологических систем. Харьков: НТУ" ХПИ”.
3. Ілюнін О.О. До питання автоматизації процесу безперервного травління листової вуглецевої сталі за умов невизначеності / О.О. Ілюнін, П.О. Капустенко, А.Ю. Перевертайленко, Самер Лага // Комп’ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. Міжвузівський збірник.– Луцьк: ЛНТУ.– 2011. – №5. – С. 100–107.
4. Opitz H.P. Fuzzy Control-Stabilitat von Fuzzy-Regelungen. // Autmatisierungstechnk. – 1993. – vol. 41. – №88. – pp. A21–A24.
5. Wang L.X. Adaptive fuzzy systems and control design and stability analysis. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2004. – 232 p.
6. Wang L.X. A supervisory controller for fuzzy control systems that guarantees stability. // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1994. – vol.39. – №9. – pp. 1845–1847.
7. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Heidelberg: A Springer – Verlag , 2011. – 798 p.
8. Haykin S. Neural networks. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998. – 1104 p.
9. Руденко О.Г., Бодянский Е.В. Основы теории искусственных нейронных сетей. – Харьков: ТЕЛТЕХ, 2002. – 317 с.

Bibliography (transliterated)

1. Kapustenko P.A., Kuzin A.K., Makarovskiy E.L., Tovazhnyansky L.L., Ulyev L.M., Chernaya E.B. (2004). Alternativnaya energetika i energosberezhenie: sovremennoe sostoyanie i perspektivy. ООО Izdatelskiy dom “Vokrug tsveta”.
2. Meshalkin V.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A. (2006). Osnovy teorii resursosberegayuschih integrirovannyih himiko-tehnologicheskikh sistem. Harkov: NTU" HPI”.
3. Ilyunin O.O. Do pitannya avtomatizatsiyi protsesu bezperervnogo travlinnya listovoyi vugletsevoyi stali za umov nevznachennosti / O.O. Ilyunin, P.O. Kapustenko, A.Yu. Perevertaylenko, Samer Laga // Komp’yuterno-integrovani tehnologiyi: osvIta, nauka, virobnitstvo. Mizhvuzivskiy zbirnik.– Lutsk: LNTU.– 2011. – #5. – P. 100–107.

4. Opitz H.P. Fuzzy Control-Stabilitat von Fuzzy-Regelungen. // *Automatisierungstechnik*. – 1993. – vol. 41. – #88. – pp. A21–A24.
5. Wang L.X. Adaptive fuzzy systems and control design and stability analysis. – Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2004. – 232 p.
6. Wang L.X. A supervisory controller for fuzzy control systems that guarantees stability. // *IEEE Transactions on Automatic Control*. – 1994. – vol.39. – #9. – pp. 1845–1847.
7. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control. Heidelberg: A Springer – Verlag, 2011. – 798 p.
8. Haykin S. Neural networks. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998. – 1104 p.
9. Rudenko O.G., Bodyanskiy E.V. *Osnovyi teorii iskusstvennyih neyronnyih setey*. – Harkov: TELETEH, 2002. – 317 p.

УДК 004.898

Ілюнін О.О., Капустенко П.А., Кусаков С.К., Перевертайленко О.Ю., Селяков О.М.,
Шамраєв А.А.

НЕЙРОМЕРЕЖЕВИЙ СУПЕРВІЗОР БЕЗПЕРЕРВНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

У статті запропоновано вдосконалений нейромережевий супервізор Ванга для керування нелінійними об'єктами на багатошаровому перцептроні. Супервізор перешкоджає роботі об'єкта при критичних для нього станах, передаючи управління «цільовим» регуляторам і забезпечуючи стійку безпечну роботу об'єкта в цілому.

Ilyunin O.O., Kapustenko P.O., Kusakov S.K., Perevertaylenko O.Yu.,
Selyakov O.M., Shamraev A.A.

NEURAL SUPERVISOR OF CONTINUOUS TECHNOLOGICAL PROCESSES

An improved neural network Wang's supervisor is proposed for control of nonlinear objects on a multilayer perceptron base. Supervisor prevents the object functioning under critical conditions for it, handing control of the "target" regulators and providing stable, safe operation of the plant as a whole.

Бессонов А.А., Илюнин О.О., Руденко О.Г.

НЕЙРОСЕТЕВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРАВЛЕНИЕМ НЕСИСТЕМНЫХ ДЕФЕКТОВ СТАЛЬНОГО ПРОКАТА

Введение. В настоящее время при проектировании и модернизации химических непрерывных производств и технологических процессов (ТП) особое внимание уделяют проблемам энергосбережения [1], экономии сырьевых ресурсов и минимизации вредных сбросов [2]. Для решения этих задач используют современные методы, модели и алгоритмы теории искусственных нейронных сетей и нечеткой логики в процессе синтеза эффективных систем управления, регуляторов и процедур идентификации состояний ТП.

Основными критериями эффективности работы непрерывного травильного агрегата (НТА), включающего блок предварительного орошения, каскад ванн с подогреваемым через пластинчатые теплообменники травильным раствором (ТР) и ванну промывки, являются: чистота поверхности листового проката на выходе (качество травления), скорость, удельная энергоемкость и ресурсоемкость ТП. Эксплуатирующиеся на настоящий момент в Украине НТА имеют ряд недостатков, обусловленных слабым уровнем автоматизации и энергоемкостью ТП. Например, наличие только визуального контроля систематических и несистемных дефектов (НД), проявляющиеся в виде полос, пятен, зон и участков окалины и вкатышей различной формы, что влечет товарные потери из-за выбраковки полосы с такими участками.

Травление относится к медленным ТП и его скорость зависит от двух видов технологических параметров [3,4]. К первому относят характеристики стали, состав, структуру и толщину σ_n окалины, нечетко зависящих от процессов предшествующих травлению. Ко второму виду параметров относят связанные нелинейными временными зависимостями: концентрацию серной кислоты C и солей железа C_n в растворе; $T_{p-ра}$ – температуру раствора, время контакта дефекта с ТР, определяемое скоростью сматывания – $V(t)$, имеющие ограничение во избежание перетрава; давление P_t , при котором раствор контактирует с поверхностью дефекта. Взаимное нелинейное влияние параметров процесса и техническая сложность реализации визуального контроля качества обработки НД затрудняет применение традиционных методов и моделей теории управления для синтеза классических ПИД-регуляторов процесса.

В данной статье предлагается формализованная процедура для идентификации НД на поверхности металлической полосы и формирования управляющих сигналов на блок предварительного орошения дефектов при поддерживаемых оптимальных параметрах ТР, построенная на методах теории нейронных сетей и нечетких адаптивных систем.

Нейросетевые модели. Эффективность создаваемых систем управления реальными объектами в значительной мере зависит от качества используемых при этом математических моделей, которые с одной стороны, должны наиболее полно отражать свойства исследуемого объекта, а с другой – быть удобными для реализации алгорит-

мов управління. Поєтому ефективним представляється розробка систем управління на основі адаптивного підходу в поєднанні з методами теорії штучних нейронних мереж (ІНС) [5–7]. Структура побудованої таким чином системи управління приведена на рис. 1.

Проста архітектура радіально-базисних мереж (они складаються з одного шару нейронів) і використання для їх навчання ефективних рекурентних алгоритмів призводять до того, що дана ІНС виявляється більш переважної при розв'язанні завдань ідентифікації і управління в реальному часі, ніж багаторівневий перцептрон.

Розглянемо багатовимірний нелінійний динамічний об'єкт, описуваний класическим рівнянням:

$$y(k) = f[y(k-1), \dots, y(k-m), u(k-1), \dots, u(k-n)] + \xi(k), \quad (1)$$

де $y(i) = (y_1(i), \dots, y_{N_y}(i))^T$; $u(i) = (u_1(i), \dots, u_{N_u}(i))^T$ – вектори вихідних і керуючих сигналів розмірностей $N_y \times 1$ і $N_u \times 1$ відповідно; $f(\bullet) = (f_1(\bullet), f_2(\bullet), \dots, f_{N_y}(\bullet))^T$ – невідома нелінійна векторна функція; $\xi(k) = [\xi_1(k), \dots, \xi_{N_y}(k)]^T$ – вектор шумів.

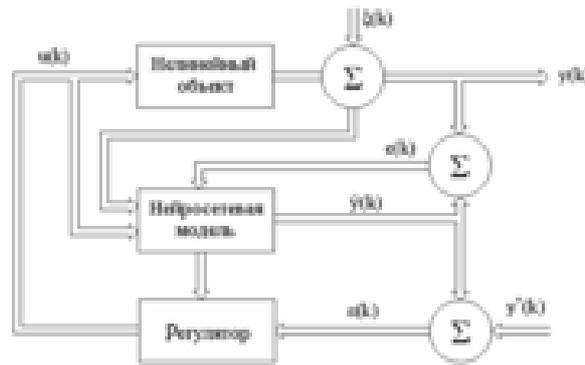


Рисунок 1 – Структура системи нейро-адаптивного управління

Обозначив вектор обобщенного сигнала, поступающего на вход модели, как

$$x(k) = [y^T(k-1), \dots, y^T(k-m), u^T(k-1), \dots, u^T(k-n)]^T, \quad (2)$$

уравнение (1) можно переписать в виде

$$y(k) = f(x(k)) + \xi(k). \quad (3)$$

Аппроксимация нелинейности $f(\bullet)$ радиально-базисными функциями

$$\Phi_i(x) = \exp\left\{-\frac{\|x - \mu_i\|^2}{\sigma_i^2}\right\}, \quad (4)$$

где μ_i, σ_i – центры и радиусы базисных функций соответственно; $\|\cdot\|$ – евклидова норма, приводит к нейросетевой модели, представленной на рис. 2. В выражении (5) $c_j, j \in (\overline{0, N})$ – некоторые векторы весовых коэффициентов.

$$\hat{y}(k) = c_0 + \sum_{i=1}^N c_i \Phi_i(x). \quad (5)$$

По аналогии с традиционным подходом к решению задачи идентификации, при котором процесс построения модели разбивается на два этапа – структурную и параметрическую идентификацию, применение ИНС также требует решения двух задач: определения структуры сети и настройки (обучения) ее параметров.

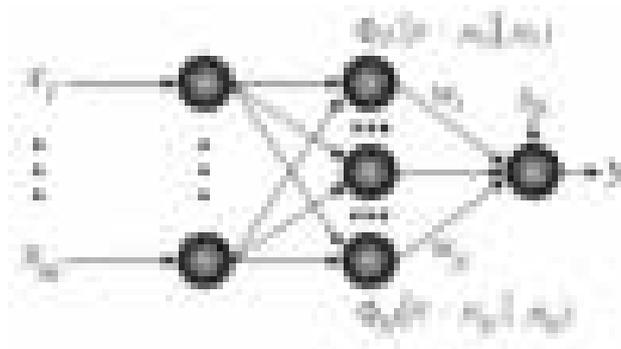


Рисунок 2 – Структура радиально-базисной сети

Структуру сети усложняют путем постепенного добавления новых нейронов, проводимого каждый раз, когда при появлении очередного входного сигнала возникает ошибка идентификации $e = y - \hat{y}$, превышающая допустимую. Обучение (параметрическая идентификация) состоит в определении параметров сети μ_i, σ_i, c_i и сводится к минимизации ошибки идентификации – как правило, квадратичного функционала ошибки $e^2(k) = (y(k) - \hat{y}(k))^2$.

В настоящее время существует большое число методов настройки параметров сети, среди которых достаточно широко используется рекуррентный алгоритм метода наименьших квадратов (РМНК) с экспоненциальным взвешиванием информации.

Введя вектор оценок настраиваемых параметров сети

$$w(k) = (c_0^T(k), c_1^T(k), \mu_1^T(k), \sigma_1(k), \dots, c_N^T(k), \mu_N^T(k), \sigma_N(k))^T,$$

можно записать данный алгоритм следующим образом:

$$w(k) = w(k-1) + K(k)e(k) \\ K(k) = P(k-1) \nabla_w \hat{Y}(k) [\lambda I + \nabla_w^T \hat{Y}(k) P(k-1) \nabla_w \hat{Y}(k)]^{-1}, \quad (6)$$

$$P(k) = \lambda^{-1} (P(k-1) + K(k) \nabla_w^T \hat{y}(k) P(k-1)),$$

где $\nabla_w \hat{y}(k) = \left[I, \Phi_1(\mathbf{x}(k))I, \Phi_1(\mathbf{x}(k))(2c_1 / \sigma_1^2)(\mathbf{x}(k) - \boldsymbol{\mu}_1)^T, \Phi_1(\mathbf{x}(k))(2c_1 / \sigma_1^3) \|\mathbf{x}(k) - \boldsymbol{\mu}_1\|^2, \dots, \Phi_N(\mathbf{x}(k)), \Phi_N(\mathbf{x}(k))(2c_N / \sigma_N^2)(\mathbf{x}(k) - \boldsymbol{\mu}_N)^T, 2\Phi_N(\mathbf{x}(k))(2c_N / \sigma_N^3) \|\mathbf{x}(k) - \boldsymbol{\mu}_N\|^2 \right]^T$;

I – единичная матрица; $\lambda \in (0, 1]$.

После окончания процесса обучения сеть в нашем случае используется для реализации алгоритма управления, подавая сигналы на вход нечеткого регулятора.

Алгоритм управления. Обозначим требуемое значение вектора выходных сигналов объекта как $y^*(k)$. Задача управления заключается в определении значений $u(k)$, обеспечивающих минимум функционалу

$$J(k) = \|\boldsymbol{\varepsilon}(k)\|^2 = \frac{1}{2} \|\mathbf{y}^*(k) - \hat{\mathbf{y}}(k)\|^2. \quad (7)$$

Как и в случае идентификации, для нахождения минимума функционала (7) использован алгоритм Качмажа [8], обеспечивающий максимальную скорость сходимости с учетом того, что при управлении объектом (1) используется только вектор $u(k-1)$, который может быть записан так

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}(k-1) + \nabla_u \boldsymbol{\varepsilon}(k) [\delta I + \nabla_u^T \boldsymbol{\varepsilon}(k) \nabla_u \boldsymbol{\varepsilon}(k)]^{-1} \boldsymbol{\varepsilon}(k), \quad \text{где } \delta > 0. \quad (8)$$

Параметр $\delta > 0$ является регуляризирующим и используется в алгоритме (9) для повышения его вычислительной устойчивости и достижения желаемой точности.

Построение нейросетевой модели сопла орошения. Как показано в работе [9], увеличение скорости реакции (стартовой энергии активации ТР – травильного раствора E_a) прямо пропорционально корню касательного напряжения потока ТР – $\tau_{cm}(P_t)$, создаваемого на поверхности дефекта подачей ТР с давлением P_t с расстояния l от сопла до поверхности.

В отличие от [3], где регулирование скорости травления осуществляют по спектральной частоты проявления дефектов на выходе из НТА, авторами предлагается ММО – модель нейросетевой идентификации НД (рис. 1) с формированием и выдачей сигналов управления давлением ТР в форсунке.

На рисунке Y и ΔY обозначают яркостную оценку дефектов; D^m – геометрические координаты (x, y) дефекта; P – необходимое давление подачи ТР через n -ю форсунку; $\Delta t_j(P_j)$ – длительность подачи управляющего напряжения U с определенной полярностью – $A(\Delta Y)$ на электропривод шпинделя форсунки, V – скорость движения полюсы проката в ТР, z^{-1} – звено временной задержки.

Нормированная оценка дефектов – $e_{In/Out} = f(Y, D^m)$ в момент времени $(t+1)$ на выходе из НТА, будет выражаться, как сумма скалярных произведений удельной пло-

щаді дефектов и отклонений оценок их оттенков от эталона, идентифицированных в период времени $(t, t+1]$:

$$e_{In/Out} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^N s_i * \|Y(RGB)_{et} - Y_i(RGB(t))\|, \quad t \in (t; t+1]. \quad (9)$$

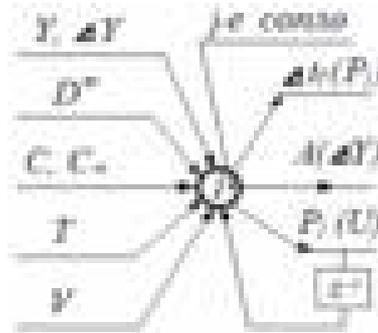


Рисунок 3 – МІМО– модель сопла орошення

Управление параметрами ТР производится по стратегии минимизации расхода серной кислоты [10] при поддержании заданной скорости травления. Для уменьшения размерности задачи влияние последующего погружного травления в НТА учитывается взвешенной интегральной оценкой, и параметром скорости движения полосы $V(t)$ в них. На Δe имеют влияние геометрические параметры: l – расстояние от поверхности полосы, φ – угол наклона к ней оси форсунки сопла, R – радиус пятна факела сопла, а также физические: ρ – плотность ТР, его технологические параметры.

Сопла располагаются поперек движения полосы и площадь пятна ТР, подаваемого на поверхность полосы, перекрывается пятном от соседнего сопла (рис. 4-а) как в статике, так и при движении полосы. Это позволяет применить РБС с фиксированными центрами и радиусами базисных функций для аппроксимации рельефа дефекта и последующей генерацией управляющих воздействий.

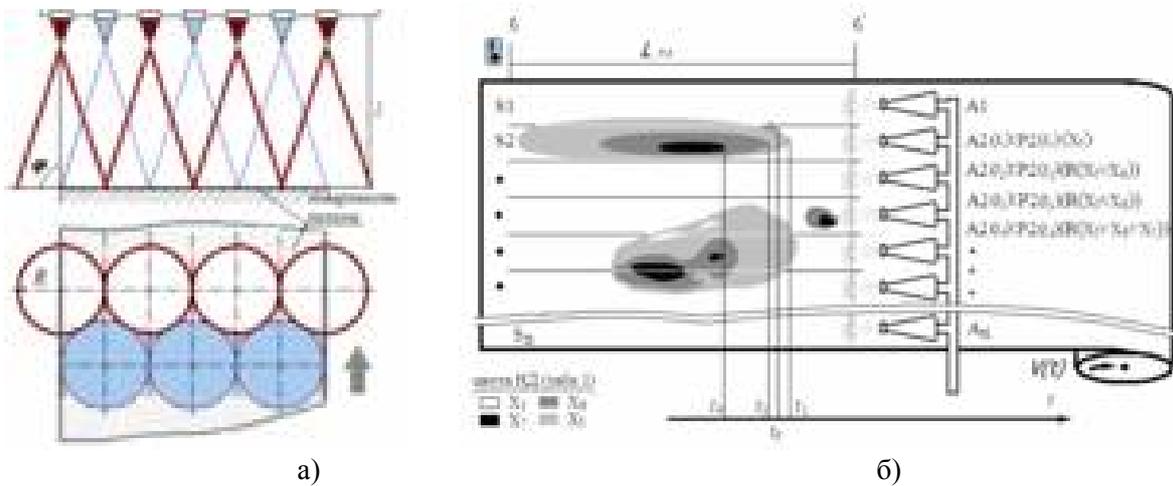


Рисунок 4 – а) рабочие зоны форсунок на поверхности полосы; б) входная сегментация несистемных дефектов полосы проката

Оптимальные значения параметров ТР в каждый момент времени отрабатываются по гиперповерхности состояния травильного раствора $t(C, C_n, C_{2n}, T)$, построенной с помощью РБС [11]. Это дает возможность построить упрощенную МІМО – модель сопла, как векторно-независимую аддитивную составляющую процесса управления меньшей размерности. При моделировании ТП приняты допущения: действие ТР с оптимальными параметрами на поверхность полосы постоянно; изменение площади НД на выходе из НТА зависит от изменения давления подачи раствора через сопла.

Учитывая концентрично-эллиптическую форму НД на поверхности полосы, обусловленную физической природой их образования, возможно применение упреждающего прогнозирования управляющих воздействий по горизонтам смены оттенка по площади НД, и аналогично, системных дефектов (рис. 5(а), (б)).

На рис. 5 представлен экспериментальный пример «окна» обработки систематических дефектов по краю полосы в масштабе М1:50 (а, б) и НД в масштабе М10:1 до травления в НТА (в) и после (г) при настройке системы.

Параметр P является аргументом непрерывной функции $t_f(P_i)$ длительности подачи рабочего давления на область дефекта, которая кусочно линеаризуется с разбиением на n неравных классов на области определения $P_i = (0; 6)$, реализуя адаптивный нечеткий регулятор (АНР).



Рисунок 5 – Пример «окна» обработки дефектов в НТА

На рис. 6(а) представлено изображение оригинала гиперповерхности дефекта в системе координат (x, y, Y) , и на рис. 6(б), – поверхность дефекта, восстановленная РБ сетью в системе координат (x, y, P) .

Время включения Δt_f электропривода (ЭП) с целью изменения давления на выходе ТР из сопла на величину ΔP_t изменяется по пропорциональному закону с адаптируемым внутри n -го класса коэффициентом k_n :

$$k_n(t_i) = \frac{t_{f_n} - t_{f_{n-1}}}{P_{t_n} - P_{t_{n-1}}}, \text{ таким что } P_{t_{n-1}} \leq P_t(t_i) \leq P_{t_n}. \quad (10)$$

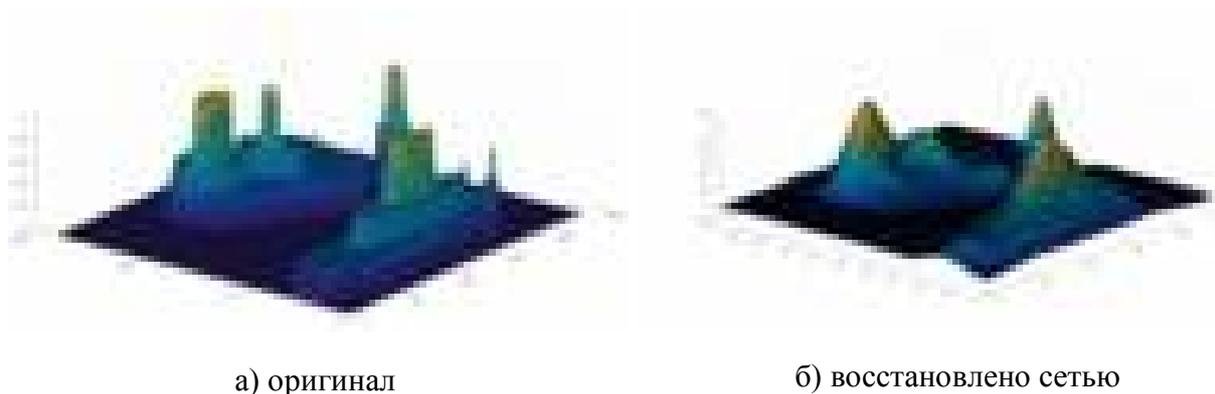


Рисунок 6 – Представление гиперповерхности обработки дефекта

Зная значение предыдущей итерации $t_j(i-1)$ несложно определить длительность задержки по управлению для изменения площади проходного сечения сопла $\tau_{on} = t_f(i) - t_f(i+1)$ и требуемый маркер $t'_i = t_i - \tau_{on} + (L_{7-3}/V(t))$ реального момента включения сопла (рис. 4-б). Длительность подачи управляющего напряжения U определена как $\Delta t_j = (y_2^m - y_1^m)/V(t)$, знак отклонения оценки $\Delta P_i(\Delta t_j)$ от значения в предыдущий момент задает полярность U .

Выводы. ИНС на основе радиально-базисных сетей, обученных с использованием рекуррентного одношагового градиентного алгоритма Качмажа, адекватно замещают традиционные методы и модели теории управления при решении задач идентификации и управления в реальном режиме времени с заданной точностью.

Литература

1. Капустенко П.А., Кузин А.К., Макаровский Е.Л., Товажнянский Л.Л., Ульев Л.М., Черная Е.Б. (2004). Альтернативная энергетика и энергосбережение: современное состояние и перспективы. ООО Издательский дом “Вокруг цвета”.
2. Мешалкин В.П., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А. (2006). Основы теории ресурсосберегающих интегрированных химико-технологических систем. Харьков: НТУ“ХПИ”.
3. Wielfried Schlechter. PROCESS AND EQUIPMENT FOR A METAL STRIP PICKLING. US Patent № 6,419,756 B08B 1/02; B08B 7/04, Jul. 4,2002, бр., <www.freepatentsonline.com>
4. Илюнин О.О. Система нечеткого управления травлением стали с компараторной идентификацией дефектов проката / О.О Илюнин, С.Г. Удовенко, А.А. Шамраев, А.И. Лазарев // Дніпропетровськ: Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2013. – № 3 (86), с. 151–159.
5. Narendra K.S. Neural Networks for control: Theory and practice // Proc. of the IEEE, 1996. – v. 84. – 10. – P. 1385–1406.

6. Narendra K.S., Parthasarathy K. Identification and control of dynamical systems using neural networks // IEEE Trans. Neural Networks. – 1990. – V. 1. – №1. – P. 4–26.
7. Nelles O. Nonlinear system identification.– Berlin: Springer – Verlag, 2000.– 785 p.
8. Руденко О.Г. Адаптивное управление многомерными нелинейными объектами на основе радиально-базисных сетей / О.Г. Руденко, А.А. Бессонов // Кибернетика и системный анализ, 2005. – №2. – С. 168–176.
9. Товажнянский Л.Л. К вопросу о загрязнениях поверхности теплопередачи пластинчатых теплообменников / Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А.// Энергетика. – Минск: БПИ, Известия ВУЗов МВССО СССР. – 1984.– №6, с.101–102.
10. Ілюнін О.О. До питання автоматизації процесу безперервного травління листової вуглецевої сталі за умов невизначенності / О.О. Ілюнін, П.А.Капустенко, А.Ю. Перевертайленко, Самер Лага // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. Міжвузівський збірник.– Луцьк: ЛНТУ.– 2011. – №5. – с. 100–107.
11. Ilyunin O.O., Gakhov R.P., Shamraev A.A. Neuro-fuzzy control of continuous steel strip pickling // Net journal «Research result». INFORMATION TECHNOLOGIES Series. – v.1, № 2, 2016, p. 52–59. Available at: < <http://rr.bsu.edu.ru/media/information/2016/2/it7.pdf> > DOI 10.18413/2518-1092-2016-1-2-52-59.

Bibliography (transliterated)

1. Kapustenko P.O., Kusun A.K., Makarovskiy E.L., Tovazhnyanskyy L.L., Ulyev L.M., Chernaya E.B., (2004). Alternativnaya energetika i energosberegennye: sovremennoye sostoyaniye i perspektivy. OOO Izdatelskiy dom "Vokrug sveta"
2. Meshalkin V.P., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O. (2006). Osnovy teorii resursosberegayustchih integrirovanih khimiko-technologicheskikh system. Kharkov: NTU "KhPI".
3. Wielfried Schlechter. PROCESS AND EQUIPMENT FOR A METAL STRIP PICKLING. US Patent № 6,419,756 B08B 1/02; B08B 7/04, Jul. 4,2002, 6p., <www.freepatentsonline.com>
4. O.O. Iyunin. Systema netchetkogo upravleniya travleniyem stali s comparatornoj identifikatsiej defectov procata / O.O Iyunin, S.G. Udovenko, A.A. Shamraev, A.I. Lacariev // Dnipropetrovsk: Systemni tehnologiji. Regionalnij migvuzivskij zbirnik naukovikh prac. – 2013. – № 3 (86), p. 151–159.
5. Narendra K.S. Neural Networks for control: Theory and practice // Proc. of the IEEE, 1996. – v. 84. – 10. – P. 1385–1406.
6. Narendra K.S., Parthasarathy K. Identification and control of dynamical systems using neural networks // IEEE Trans. Neural Networks. – 1990. – V. 1. – №1. – P. 4–26.
7. Nelles O. Nonlinear system identification.– Berlin: Springer – Verlag, 2000.– 785 p.
8. Rudenko O.G. Adaptivnoye upravleniye mnogomernymi nelineynimi objectami na osnove radialno-bazisnih setey / O.G. Rudenko, O.O. Bezsonov // Khybernetyka i systemnij analiz, 2005. – №2. – p. 168–176.

9. Tovazhnyanskyy L.L. K voprosu o zaghyaznenijakh poverkhnosti teploperedachi plastintchatykh teploobmennikov / Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.A.// Energetica. - Minsk: BPI, Izvestija VUZov MVSSO SSSR. – 1984.– №6, p.101–102.

10. Iyunin O.O. Do pytannya avtomatizaciji procesu bezperernogo travlinnya listovoy vugletsevoy stali za umov nevyznatchennosti / O.O. Iyunin, P.A. Kapustenko, A.Yu. Pervertaylenko, Samer Laga // Computerno-integrovany tehnologii: osvita, nauka,vyrobnitstvo. Migvuzivskij zbirnik.– Lutsk: LNTU.– 2011. – №5. – p. 100–107.

11. Ilyunin O.O., Gakhov R.P., Shamraev A.A. Neuro-fuzzy control of continuous steel strip pickling // Net journal «Research result». INFORMATION TECHNOLOGIES Series. – v.1, № 2, 2016, p. 52–59. Available at: < <http://rr.bsu.edu.ru/media/information/2016/2/it7.pdf> > DOI 10.18413/2518-1092-2016-1-2-52-59.

УДК 004.897

Безсонов О.О., Ілюнін О.О., Руденко О.Г.

НЕЙРОМЕРЕЖЕ КЕРУВАННЯ ТРАВЛІННЯМ НЕСИСТЕМНИХ ДЕФЕКТІВ СТАЛЬНОГО ПРОКАТУ

У статті запропоновано радіально-базисну нейронну мережу для ідентифікації випадкових дефектів смуги прокату за компонентами яскравості Y та геометричним координатами (x, y) , що підлягають травленню. Необхідний тиск P подачі травильного розчину крізь n -ю форсунку досягається подачею керуючої напруги U певної тривалості Δt і полярності A (ΔY) на електропривод шпінделя форсунки.

Bezsonov O.O., Ilyunin O.O., Rudenko O.G.

NEURAL NETWORK CONTROL OF NON-SYSTEM DEFECTS OF ROLLED STEEL PICKLING

The article suggests a radial-basis neural network to identify random defect band rolled on luminance component Y and geometric coordinates (x, y) to be pickled. Required feed pressure P pickling solution through the n -th nozzle is achieved by a control voltage U a certain duration Δt and polarity A (ΔY) on the motor of nozzle's spindle.

УДК 622.276.3

Братах М.І., Усіченко Д.В., Романова В.В., Дженіффер Джонас

ВІДПОВІДНІСТЬ ЯКОСТІ ПРИРОДНОГО ГАЗУ, ЩО ВИДОБУВАЄТЬСЯ В УКРАЇНІ, ВИМОГАМ ЄВРОПЕЙСЬКИХ НОРМ

Актуальність проблеми. Відповідно до звіту British Petroleum за 2014 р. [1] глобальне споживання газу в Європі, за виключенням країн-постачальників, таких як Російська Федерація, зросло до 490,8 млрд. м³. Об'єм газу, що видобувається на території Європейського Союзу, становить 260,9 млрд. м³, при доведених запасах 4,1 трлн. м³. З цього обсягу запасів природного газу частка, що припадає на українські газовидобувні компанії становить 600 млрд. м³ або 14,6 % частка у видобутку природного газу становить 10,2 % або 18,6 млрд. м³. Найменша частка – це споживання природного газу Україною на рівні 38,4 млрд. м³ або 7,8 % від загальноєвропейського показника. Якщо тенденція у зниженні споживання природного газу в період 2014–2015 р. на рівні 15,6 % збережеться за рахунок впровадження заходів по енергоефективності, то вже в 2020 р. споживання природного газу Україною становитиме лише 16 млрд. м³. За такого сценарію розвитку подій Україна може відмовитись від поставок газу з Словаччини, Польщі та Угорщини. Крім того, можливість зниження залежності від закордонних поставок газу передбачено у програмі енергозбереження, яка, як показує вище приведений аналіз, досить успішно імплементується українським урядом. На відміну від України, в якій є резерви щодо зниження обсягів споживання газу, такі резерви у Європейських країн оцінюються як вкрай малі, отже і залежність цих країн від поставок газу з Росії та азійських країн буде простежуватись і надалі.

Формулювання мети (проектної пропозиції). Україна має досить важливі складові, щоб стати повноцінним учасником ринку природного газу в Європі не лише за рахунок розгалуженої системи транзитних трубопроводів, але й за рахунок використання своїх ресурсів природного газу, адже в умовах зменшення споживання природного газу державою газовидобувні компанії сформулюють надлишок у видобутку газу, який можливо реалізувати на ринку природного газу, якщо його якість буде відповідати вимогам Європейських норм.

Розкриття суті проектної пропозиції (реалізація проекту). Задекларованою програмою «20/20» найбільшої газовидобувної компанії України «Укргазвидобування» передбачено зростання обсягів видобутку газу до 20 млрд. м³ в 2020 році, що більш ніж на чверть переважає наявний на сьогоднішній день видобуток на рівні 14,5 млрд. м³ (фактично таке зростання формуватиме тенденцію у 1,5 млрд. м³/рік). Слід зауважити, що ПАТ «Укргазвидобування» є не єдиною газовидобувною компанією України і видобуток газу іншими державними і приватними компаніями «Укрнафта», Burisma, DTEC може сягнути величини у 6 млрд. м³, сформувавши загальноукраїнських видобуток природного газу в 2020 р. на рівні 26 млрд. м³, використовуючи підтвержені запаси газу по родовищам.

Отже зберігаючи тенденцію до зменшення споживання природного газу в 2020 р. Україна буде в змозі експортувати до 10 млрд. м³. Більш того, використання доведених, але не підтверджених запасів газу, введення в експлуатацію нових компресорних станцій та оптимізація газових потоків по українським і сусіднім газотранспортним

мережам щонайменше призведе до зменшення виробничо-технологічних витрат в процесі транспортування газу, щонайбільше – позитивно вплине обсяги видобутку і відповідно перспективного експорту природного газу.

Впровадження проекту передбачає:

- оцінку важко видобувних запасів газу, оцінку нових розвідувальних робіт, що проводяться українськими на закордонними газовидобувними компаніями;
- впровадження досвіду розробки виснажених родовищ ПАТ «Укргазвидобування» шляхом встановлення оптимального компресорного обладнання;
- оцінку можливості зменшення споживання газу Україною та східноєвропейськими державами;
- планування газових потоків по трубопровідним системам з метою зменшення енерговитрат;
- планування потоків газу Україною для приймання газу з Азербайджану, Ірану, Казахстану, Туркменістану використовуючи діючу газотранспортну мережу та акваторію Чорного моря;
- розподіл потоків газу в Східній та Центральній Європі.

Викладення основних аспектів реалізації проекту. Основним результатом проекту є привертання уваги до української газовидобувної системи, нарощування підтверджених запасів газу, можливість використання української газотранспортної мережі для зменшення енерговитрат на процес транспортування газу, можливість залучення інвесторів у газовидобувну галузь України. Для Європи – це можливість отримати дешевий газ за рахунок зменшення витрат на його транспортування.

В цій статті автори висвітлюють основні аспекти, що стосуються саме якості природного газу, що видобувається в Україні та транспортується через її внутрішні та транзитні трубопроводи, з метою оцінки готовності відповідати показникам якості, задекларованим в Європейських нормативних документах.

Фінальна версія Європейського стандарту EN 16726:2015 [2] встановлює вимоги до якості газу для створення вільного потоку газу між Державами – Членами Європейського комітету зі стандартизації (CEN) і для надійного енергопостачання з урахуванням впливу на загальний ланцюжок нарахування вартості від видобутку і постачання газу до кінцевих користувачів. Якщо даний проект стає Європейським стандартом, члени CEN зобов'язані дотримуватись Внутрішнього регламенту CEN/CENELEC, який визначає умови надання даному Європейському стандарту статусу національного стандарту без внесення в нього будь-яких змін. Члени CEN – це національні органи зі стандартизації Австрії, Бельгії, Болгарії, Хорватії, Кіпру, Чеської Республіки, Данії, Естонії, Фінляндії, Колишньої Югославської Республіки Македонії, Франції, Німеччини, Греції, Угорщини, Ісландії, Ірландії, Італії, Латвії, Литви, Люксембургу, Мальти, Нідерландів, Норвегії, Польщі, Португалії, Румунії, Словаччини, Словенії, Іспанії, Швеції, Швейцарії, Туреччини і Сполученого Королівства. Якщо Україну розглядати як одного з майбутніх учасників ринку природного газу в Європі, видобутий газ на території держави в точці його входу до сусідніх газотранспортних систем має відповідати вимогам цих норм, що будуть затверджені до кінця 2015 року.

Але для українських газовидобувних компаній деякі з переліку вимог у Європейських нормах можуть викликати труднощі, адже вони не регулювались дещо застарілими нормами колишнього Радянського Союзу, які і досі діють на території держави. Саме тому основною проблемою, яка постає є гармонізація діючих в Україні норм, із

вимогами європейських, що і визначає другий аспект необхідності сфокусуватись саме на якості видобутого в Україні газу.

Першим етапом гармонізації є визначення до якої із груп відповідно класифікації EN 437:1993 “Test gases – Test pressures – Appliance categories” [3] належить український газ. Фінальний проект EN 16726 визначає характеристики якості газу, параметри і їхні межі для газів, що класифікуються як гази групи Н, які мають транспортуватись, закачуватись у сховища і викачуватись із них, розподілятись і використовуватись. В свою чергу EN 437 встановлює вимоги до складу тестових (випробувальних) газів, тестових тисків та категорії приладів залежно від газоподібного палива першої, другої та третьої родин газів. Саме цей стандарт виступає в якості документа, на який посилаються в інших стандартах по приладах, на які розповсюджується область Директиви Ради по зближенню законодавства в плані газовитратних установок (90/396/ЕЕС).

Склад тестових газів та тестові тиски, що встановлюються EN 437, застосовуються для випробування всіх приладів для забезпечення узгодження із вимогами відповідних стандартів.

Тестові гази класифікуються на 3 основних родини, кожна з яких розбивається на групи відповідно до діапазону вищого Числа Воббе, представленому в таблиці 1.

Таблиця 1 – Класифікація газів на родини та групи відповідно до числа Воббе

Газова родина або група	Вище Число Воббе при 15 °С та 1 013,25 мбар•МДж/м ³	
	мінімум	максимум
Родина I Група А	22,4	24,8
Родина II Група Н	39,1	54,7
Група L	45,7	54,7
Група E	39,1	44,8
Родина III Група В/Р	40,9	54,7
Група Р	72,9	87,3
Група В	72,9	76,8
	81,8	87,3

Число Воббе – це основний показник якості газу, що використовується в побутових газових пальниках. Він визначає режим горіння газу в побутових приладах, взаємозаміну газу змінного складу для забезпечення нормального режиму горіння. Число Воббе враховує взаємозв'язок теплоти згорання і відносної густини за повітрям.

Другим етапом гармонізації є забезпечення відповідності енергетичним вимогам EN 16726 для газу що видобувається, закачується і відбирається з газових сховищ та транспортується в точку виходу з газотранспортної системи України в системи інших держав. Газ має відповідати вимогам, зведеним до таблиці 2 і має бути прийнятним для транспортування.

За певних кліматичних умов на державному рівні може бути прийнята вища температура точки роси за водою і точки роси за вуглеводнями.

Метанове число є важливим параметром для двигуна. Метанове число являє собою міру антидетонаційних властивостей газу в тій самій мірі, як і октанове число для бензину. Детонаційне згорання може призвести до пошкодження або руйнування дви-

гуна. Згідно з визначенням водень володіє метановим числом 0, а метан – метановим числом 100, Метанове число природного газу визначається розміром частки компонентів газу і метановим числом відповідних компонентів. Природний газ газових і газоко-нденсатних родовищ може містити велику частину інертних газів, а кількість метану може коливатись в досить широких межах. Це може призвести до зменшення метанового числа до неприпустимо низького значення, внаслідок чого може бути пошкоджен-ний двигун.

Таблиця 2 — Енергетичні вимоги проекту нормативного документа EN 16726

Параметр	Оди-ниця вимі-рю-вання	Межі коливань, визначені на основі стан-дартних розра-хункових умов 15/15		Межі коливань, визначені на основі нор-мальних розра-хункових умов 25/0 (для довідки)		Стандарти для методів ви-значення (для довідки)
		Min	Max	Min	Max	
Відносна густина за повітрям	без-роз-мірна	0,555	0,700	0,555	0,700	EN ISO 6976, EN ISO 15970
Точка роси за вуглеводнями ^{b,c} за будь-якого тиску від 0,1 до 7 МПа (70 бар) абсолют-ного тиску	С°	не но-рму-ється	-2	не но-рму-ється	-2	ISO 23874, ISO/TR 12148
Точка роси за водою ^{b,c} за 7 МПа (70 бар) або, якщо менше, ніж 7 МПа (70 бар), за максимального операційного тиску системи, в якій тече газ	С°	не но-рму-ється	-8	не но-рму-ється	-8	EN ISO 6327, EN ISO 18453, EN ISO 10101 част. 1 - 3
Метанове число ^b	без-роз-мірне	65	не но-рму-ється	65	не но-рму-ється	див. розраху-нок нижче

У технічному відношенні, температуру точки роси за водою можна виміряти шляхом використання конденсаційного гігрометра з охолоджуваною поверхнею. Більш детально даний метод вимірювання описано в стандарті EN ISO 6327 [4]. Вміст води – це масова концентрація загальної кількості води, яка міститься в газі. Вміст води виражається в міліграмах на кубічний метр. У технічному відношенні, вміст води можна виміряти методом Карла Фішера.

Точку роси за вуглеводнями вимірюють безпосередньо (наприклад, використо-вуючи прилади відповідно до стандарту ISO/TR 12148 [5]) або розраховують на основі детального складу газу відповідно до процедури, описаної в стандарті ISO 23874 [6]. Слід зазначити, що залежність між точкою роси за вуглеводнями і потенційним кон-

денсатом вуглеводневої рідини є менш вираженою, ніж залежність між точкою роси за водою і вмістом води.

В частині постійного моніторингу і контролю температур точок роси за вуглеводнями і водою українські стандарти повністю гармонізовані з європейськими, тож в подальшому увагу приділено двом новим параметрам якості природного газу: відносній густині за повітрям та метановому числу.

Використовуючи компонентний склад природного газу з різних точок входу в газотранспортну систему від газовидобувних підприємств та точок виходу з газотранспортної системи (всі дані отримано на сайті ПАТ «Укртрансгаз» [7]), проведено класифікацію газів, що видобуваються, транспортуються, закачуються і відбираються з підземних сховищ газу на території України. Класифікацію, результати якої представлено в таблиці 3, проведено за наступними параметрами:

- за родиною і групою газів відповідно EN 437;
- вищою теплотою згоряння;
- відносною густиною за повітрям;
- вищим числом Воббе;
- метановим числом.

Таблиця 3 – Параметри якості газу, що видобувається і транспортується територією України

Точка входу в єдину газотранспортну систему України	Відносна густина газу	Вища теплота згоряння, МДж/м ³	Нижча теплота згоряння, МДж/м ³	Число Воббе, МДж/м ³	година	група	Метанове число
Східний газовидобувний регіон							
Донецька ДКС	0,605	39,0	35,2	50,2	друга	Н	73
Єфремівська УКПГ	0,600	38,7	34,9	49,9	друга	Н	77
Соснівська УКПГ	0,606	38,8	35,0	49,8	друга	Н	74
Юліївська УКПГ	0,622	39,0	35,3	49,5	друга	Н	76
Західний газовидобувний регіон							
ПГРС Пасічна	0,608	39,5	35,7	50,7	друга	Н	74
ПГРС Пукеничі	0,560	37,0	33,3	49,4	друга	Н	97
УКПГ Локачі (H ₂ S)	0,594	37,0	33,3	48,0	друга	Н	85
Полтавський газовидобувний регіон							
Машівська УКПГ	0,610	37,7	34,0	48,3	друга	Н	79
Абазівська УКПГ	0,653	40,4	36,5	50,0	друга	Н	69
Байрацька УКПГ	0,658	40,5	36,6	49,9	друга	Н	69
Комишнянська УКПГ (CO ₂)	0,642	37,7	34,0	47,0	друга	Н	82
Коломацька УКПГ	0,635	37,8	34,2	47,5	друга	Н	81
Степова УКПГ	0,635	39,5	35,7	49,5	друга	Н	72
Типове приватне газоконденсатне родовище							
Семеренківська УКПГ	0,604979	36,91	33,29	47,5	друга	Н	90
Типовий експортний трубопровід з точкою виходу з ГТС України							
МГ Комарно-Держкордон	0,578423	37,92	34,21	49,9	друга	Н	87

Таблиця представляє перелік енергетичних параметрів природного газу, видобутого з українських родовищ

Результати цього простого аналізу енергетичних параметрів природного газу, розрахункові значення яких отримано за відомими формулами і алгоритмами, представленими в новому EN 16726, свідчать про повну відповідність його вимогам цього нормативного документу, оскільки як видобутий, так і відтранспортований територією України газ відноситься до Н (другої родини) відповідно до EN 437 з достатнім значенням метанового числа і відносною густиною газу за повітрям.

Деякі відхилення у діючих нормативних документах в державі мають бути прийняті з метою гармонізації українських та європейських стандартів, що передбачає виконання 3-х кроків:

1) адаптація правил безпеки для видобутого газу, на території України, що фактично передбачає розробку та впровадження в дію технічного регламенту для таких газів;

2) гармонізація внутрішніх стандартів до якості природного газу групи Н відповідно до вимог EN 16726;

3) корекція вимог якості до газу, що транспортується територією України, що закладені в Кодексі газотранспортної системи [7].

В минулому, норми і правила до якості газу та принципи балансування газу регулювались лише на території країн-видобувників газу і транспортерів. Але із зростанням міцності взаємовідносин між різними європейськими державами, збільшенням обсягу ринку газу між різними країнами як частини зовнішнього енергетичного ринку, норми EU стають надзвичайно необхідними для ефективного контролю газових потоків. Беручи до уваги доведену якість природного газу, що видобувається з родовищ України, з точки зору енергетичних показників, три вищепераховані кроки допоможуть компаніям-видобувникам стати повноправним членами енергетичного ринку Європи у найближчі роки.

Література

1. Сайт компанії British Petroleum [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.bp.com/en/global/corporate/sustainability/reporting/verified-site-reports.html>.
2. EN 16726:2015. Gas infrastructure – Quality of gas – Group H. – Brussels: CSN, 2015.
3. EN 437:1993. Test gases – Test pressures – Appliance categories. – Brussels: CEN, 2015.
4. EN ISO 6327 Gas analysis – Determination of the water dew point of natural gas - Cooled surface condensation hygrometers. – Berlin: DIN, 1981.
5. ISO/TR 12148 Natural gas – Calibration of chilled mirror type instruments for hydrocarbon dewpoint (liquid formation). – British. 2009.
6. ISO 23874 Natural gas – Gas chromatographic requirements for hydrocarbon dewpoint calculation – British. 2006.
7. Сайт компанії УКПТРАНСГАЗ [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://utg.ua/>

Bibliography (transliterated)

1. Sayt kompaniyi «British Petroleum» [«British Petroleum» web-site] *www.bp.com*. Retrieved from <http://www.bp.com/en/global/corporate/sustainability/reporting/verified-site-reports.htm>. [EN]
2. EN 16726:2015. Gas infrastructure – Quality of gas – Group H. – Brussels: CSN, 2015. [EN]
3. EN 437:1993. Test gases – Test pressures – Appliance categories. – Brussels: CEN, 2015. [EN]
4. EN ISO 6327 Gas analysis – Determination of the water dew point of natural gas - Cooled surface condensation hygrometers. – Berlin: DIN, 1981. [EN]
5. ISO/TR 12148 Natural gas – Calibration of chilled mirror type instruments for hydrocarbon dewpoint (liquid formation). – British. 2009. [EN]
6. ISO 23874 Natural gas – Gas chromatographic requirements for hydrocarbon dew-point calculation – British. 2006. [EN]
7. Sayt kompaniyi «Ukrtransgaz» [«Ukrtransgaz» web-site] *utg.ua*. Retrieved from <http://utg.ua/>[in Ukrainian].

УДК 622.276.3

Братах М.И., Усиченко Д.В., Романова В.В., Джонас Д.Ч.

**СООТВЕТСТВИЕ КАЧЕСТВА ДОБЫТОГО УКРАИНОЙ ПРИРОДНОГО ГАЗА
ЕВРОПЕЙСКИМ НОРМАМ**

Используя официальную информацию с сайтов крупнейших украинских газотранспортных и газодобывающих компаний, авторы статьи оценивают возможность использования газа, добытого из украинских месторождений, для обеспечения поставок в Восточную Европу. В статье проверено соответствие качественных показателей газа как на границе с Европой, непосредственно добытого из украинских месторождений. Представлена характеристика качественных показателей природного газа, транспортируемого по транзитным газопроводам Украины, и добываемого из нефтегазовых месторождений.

Bratakh M.I., Usichenko D.V., Romanova V.V., Jeniffer Jonas

**ASSESSMENT OF THE PRODUCED BY UKRAINE NATURAL GAS QUALITY
WITH EUROPEAN REGULATIONS**

Using information from the official websites of the largest Ukrainian gas transportation and gas production companies the authors evaluated the possibility of the use of the natural gas extracted from Ukrainian fields to ensure supplies in Eastern Europe. The quality of both transported up to Eastern Europe border and produced from Ukrainian field natural is tested by the authors in the article in compliance to the requirements of European regulatory documents. The results of the testing are presented in the tables and assessment of the compliance to the Transmission lines code and EN documents is made.

УДК 544.4:66.021.3

Ведь В.Е., Зебешев Т.З., Краснокутский Е.В., Гаевой М.А.

ПАРАМЕТРЫ ОЧИСТКИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЯ ВАЗ-2108i КАТАЛИТИЧЕСКИМИ НЕЙТРАЛИЗАТОРАМИ РАЗРАБОТКИ НТУ «ХПИ» И BOSAL 099-886

Проблема повышения эффективности очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в каталитических нейтрализаторах. Современные системы очистки отработавших газов двигателей внутреннего сгорания обеспечивают высокий уровень нейтрализации вредных веществ, таких как монооксид углерода, углеводороды, оксиды азота, но требования к эффективности и полноте обезвреживания имеют тенденцию к постоянному ужесточению [1]. Известно [2–7], что на эффективность каталитической нейтрализации отработавших газов двигателей внутреннего сгорания и теплоэнергетических установок влияют интенсивные и экстенсивные факторы. К экстенсивным факторам можно отнести концентрацию каталитически активных компонентов на поверхности каталитического преобразователя, применение более дорогостоящих веществ, таких как соединения платины и родия, вместо соединений палладия и кобальта. К экстенсивным факторам относят оптимизацию гидродинамических параметров и теплофизических свойств потока отработавших газов, поступающих в блок каталитической нейтрализации; совершенствование методики синтеза каталитических преобразователей; выбор оптимального по пространственной геометрической структуре и химическому составу носителя катализатора. При работе двигателя внутреннего сгорания, как и теплоэнергетических установок, существует ряд труднорегулируемых факторов, зависящих исключительно от выбранного типа топлива, наличия в топливе присадок, режима работы двигателя и настроек карбюраторной системы. Такие факторы определяют температуру газового потока, его скорость, а также качественный и количественный состав отработавших газов. Таким образом, блок каталитической нейтрализации, удовлетворяющий современным требованиям об очистке газовых выбросов, должен эффективно функционировать в широком диапазоне вышеуказанных параметров.

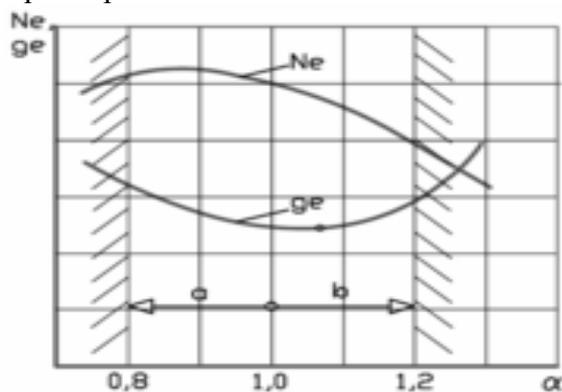


Рисунок 1 – Регулирующая характеристика бензинового двигателя внутреннего сгорания по составу смеси

Одним из главных параметров, определяющих качественный и количественный состав отработавших газов двигателей внутреннего сгорания, является коэффициент избытка воздуха (α). На рис. 1 показана классическая регуливающая характеристика бензинового двигателя по составу смеси (избытку или недостатку воздуха). Независимо от типа двигателя, приведенные данные на рис. 1 свидетельствуют, что максимальная мощность достигается при некотором дефиците окислителя ($\alpha = 0,85 \dots 0,95$), а минимальные удельные затраты топлива – в обедненных смесях ($\alpha = 1,05 \dots 1,15$).

Широко известной [8] является зависимость рис. 2 содержания монооксида углерода, углеводородов, а также оксидов азота в отработавших газах двигателя внутреннего сгорания в зависимости от избытка или недостатка окислителя.

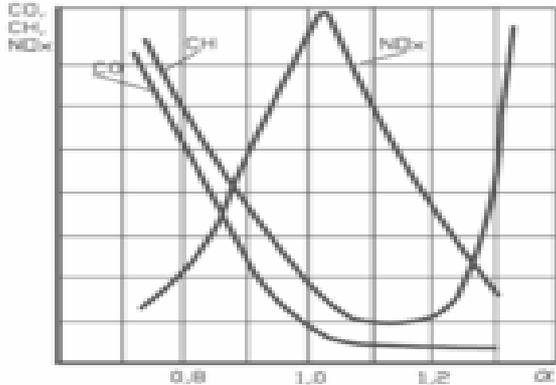


Рисунок 2 – Характеристическая зависимость состава отработавших газов от коэффициента избытка воздуха α

Из рис. 1 видно, что оптимальным диапазоном значений коэффициента избытка воздуха α для бензинового двигателя с позиции экономичности расхода топлива и высоких значений развиваемой мощности является диапазон $\alpha = 0,9 \dots 1,1$.

Из рис. 2 видно, что при увеличении значения коэффициента избытка воздуха наблюдается снижение концентрации монооксида углерода и углеводородов.

Такое поведение системы связано с повышением содержания окислителя (кислорода воздуха) в реакционном потоке в блоке каталитической нейтрализации и увеличении скорости их окисления в соответствии с законом действующих масс: $\text{CO} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ и $\text{C}_m\text{H}_n + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

Повышение содержания оксидов азота при повышении коэффициента избытка воздуха α от 0,75 до 1,05 связано также с повышением содержания окислителя кислорода воздуха в отработавших газах, что приводит в соответствии с законом действующих масс ($\text{N}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_x$) к увеличению скорости окисления азота воздуха в двигателе внутреннего сгорания. На поверхности катализатора же должен обеспечиваться эффективный обратный процесс: $\text{NO}_x \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2$.

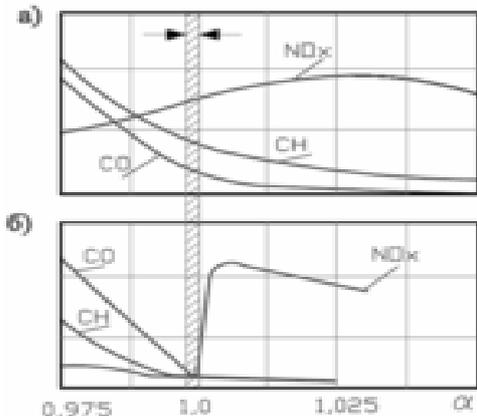


Рисунок 3 – Характеристические зависимости количественного составов отработавших газов от коэффициента избытка воздуха α в отсутствие катализатора (а) и наличии катализатора (б)

Дальнейшее повышение величины α ($\alpha > 1$) не приводит к существенному снижению концентраций монооксида углерода и углеводородов. Наблюдается даже значительное повышение содержание углеводородов в отработавших газах при достижении ($\alpha \geq 1,1$), что связано с плохим зажиганием гомогенных смесей при приближении из состава к нижней границе воспламенения.

Очевидно также, что для эффективного функционирования каталитического нейтрализатора в условиях обедненных смесей необходима дополнительная подача воздуха внутрь блока катализатора. Такие меры связаны с усложнением конструкции и эксплуатации катализатора, а также с его удорожанием.

Фундаментальной сложностью, возникающей в процессах окисления отработавших газов, является необходимость обеспечения на поверхности катализатора высоких скоростей химических реакций, противоположных по своей природе: окислительных (уравнения 1 и 2) и восстановительной (уравнение 4). В случае применения одно-

ступенчатой системы каталитической очистки, эту сложность обходят использованием стехиометрических гомогенных горючих смесей ($\alpha = 1,0$), составы которых показаны штриховкой на рис. 3. В этих случаях смесеобразование необходимо регулировать с помощью лямбда-зондов.

Экспериментальная установка, параметры ее функционирования. Экспериментальная установка оснащена двигателем ВАЗ-21081. Двигатель ВАЗ-21081 в штатном исполнении является четырехтактным, бензиновым, карбюраторным с рабочим объемом 1100 см^3 , степень сжатия 9.0. Номинальная мощность двигателя 40 кВт при частоте вращения коленчатого вала $n=5600 \text{ мин}^{-1}$. Максимальный крутящий момент $77.9 \text{ Н}\cdot\text{м}$ при $n=3400 \text{ мин}^{-1}$. В качестве топлива использовался бензин А-95. Экспериментальные исследования конверсии газовых выбросов двигателя ВАЗ-21081 было проведено на базе исследовательского моторного стенда кафедры двигателей внутреннего сгорания Национального технического университета «Харьковский политехнический институт».

Расход топлива и температура отработавших газов линейно растут в зависимости от развиваемой мощности двигателем. Так, например, при частоте вращения коленчатого вала 3600 мин^{-1} температура отработавших газов линейно возрастает от 490 до $725 \text{ }^\circ\text{C}$ при повышении нагрузки от 0 (режим холостого хода) до 30 кВт. Расход топлива же при данных условиях также линейно возрастает $0,9 \times 10^{-6}$ до $3 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. При частоте вращения коленчатого вала 2500 мин^{-1} температура отработавших газов линейно возрастает от 400 до $600 \text{ }^\circ\text{C}$ при повышении нагрузки от 0 (режим холостого хода) до 18 кВт. Расход топлива же при данных условиях также линейно возрастает $0,6 \times 10^{-6}$ до $1,8 \times 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$.

Результаты испытаний каталитических нейтрализаторов

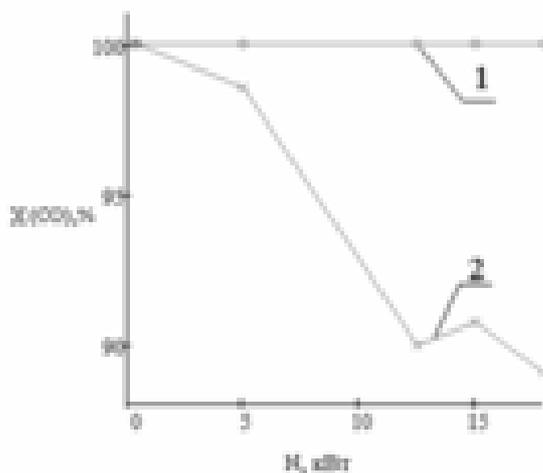


Рисунок 7 – Степень конверсии CO, %, при использовании разработанного нами (1) каталитического нейтрализатора и нейтрализатора марки Bosal 099-886 (2) в зависимости от мощности двигателя при частоте вращения коленчатого вала $n=2500 \text{ мин}^{-1}$

Тестовые сравнительные испытания разработанного нами блока каталитической нейтрализации и его промышленного аналога – нейтрализатора марки Bosal 099-886 – свидетельствуют о полной очистке отработавших газов от монооксида углерода разработанным нами блоком на всем диапазоне варьирования мощности двигателя при частоте вращения коленчатого вала 2500 мин^{-1} (рис. 7). Нейтрализатор марки Bosal 099-886 в аналогичных условиях демонстрирует последовательное снижение степени очистки отработавших газов от 100% на холостом ходу до 89 % в режиме максимальной нагрузки, соответствующей 20 кВт.

Выводы. Экспериментальная установка, оснащенная двигателем внутреннего сгорания ВАЗ-21081i, позволяет варьировать параметры гетерогенно-каталитического процесса обезвреживания газовых выбросов, а именно: скорость газового потока, температуру газового потока, коэффициент избытка воздуха с помощью лямбда-зонда, нагрузку на двигатель, частоту вращения коленчатого вала двигателя в необходимых пределах. Проведен сравнительный анализ конструкций разработанного и промышленного образцов блоков каталитической нейтрализации, показаны преимущества разработанного нами катализатора. Указанные факты являются необходимым условием объективной оценки эффективности каталитической очистки и как следствие научно обоснованному сравнению блоков каталитической нейтрализации. Проведенные тестовые испытания активности в процессах очистки отработавших газов от монооксида углерода экспериментальной каталитической нейтрализации и его промышленного аналога указывают на целесообразность применения в системах очистки разработанного нами блока.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность финансовой поддержке Комитета Науки при Министерстве образования и науки Республики Казахстан. Работа выполнена благодаря грандовому соглашению №98.

Литература

1. Commission Regulation (EC) No 692/2008 of 18 July 2008 implementing and amending Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2008/692/oj>. (accessed 07.11.2016).
2. Краснокутский Е.В. Нейтрализатор отходящих газов ДВС с катализатором на металлическом носителе / Е.В. Краснокутский, В.Е. Ведь, Петар Варбанов, М.И. Сатаев // Интегровані технології та енергозбереження. – 2015. - № 3. – С. 26–30.
3. Ved V. Modelling of hydrocarbons catalytic conversion process / Valeriy Ved', Leonid Tovazhnyanskiy, Yevgeniy Krasnokutskiy, Vadim Koshchii // Chemistry & Chemical Technology. – 2015. – Vol. 9. – No. 1. – P. 101–106.
4. Leonid L. Tovazhnyanskii. Mobile Thermocatalytic Waste Processing Complex / Leonid L. Tovazhnyanskii, Valery E. Ved', Vadim A. Koshchii, Alexandr I. Rovenskii, Evgeny V. Krasnokutskii // Chemical Engineering Transactions. – 2013. - Vol. 35. - Part 2. - P. 907–912. DOI: 10.3303 / CET 1335151.
5. Krasnokutskii E.V. Substantiating Reaction Mechanism Of Thermocatalytic Benzene Conversion / E.V. Krasnokutskii, Ved V.E. // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2013. - Vol. 47. - No. 1. - P. 60–65. doi:10.1134/S004057951301003.
6. Krasnokutskiy E.V. Universal multi-functional secondary catalyst carriers for purification of gas emission of thermal power equipments / E.V. Krasnokutskiy, B.B. Makhanov, V.E. Ved', M.I. Satayev, A.V. Ponomarenko, A.A. Saipov // Chemical Engineering Transactions. – 2016. – Vol. 52 – P. 277–282. DOI:10.3303/CET1652047.

7. Ved' V.E. Calculation of the operation parameters of the catalytic converters of the harmful gas impurities / V.E. Ved', E.V. Krasnokutskiy, M.I. Satayev, A.V. Ved', A.A. Saipov // *Chemical Engineering Transactions*. – 2016. – Vol. 52. – P. 91–96. DOI:10.3303/CET1652016.

8. Двигуни внутрішнього згоряння : серія підручників: у 6 т. / [Марченко А.П., Парсаданов І.В., ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л.Л., ШЕХОВЦОВ А.Ф.]; під ред. А.П. Марченка, А.Ф. Шеховцова. – Х.: Препор, 2004. – Т.5: Екологізація ДВЗ. – 360 с.

9. Makhanov B. New type of harmful gas emissions catalytic converter / B. Makhanov, M. Satayev, E. Krasnokutskii, V. Ved, A. Saipov // *Industrial Technology and Engineering*. – 2015. – No. 4 (17). – P. 5–18.

Bibliography (transliterated)

1. Commission Regulation (EC) No 692/2008 of 18 July 2008 implementing and amending Regulation (EC) No 715/2007 of the European Parliament and of the Council on type-approval of motor vehicles with respect to emissions from light passenger and commercial vehicles (Euro 5 and Euro 6) and on access to vehicle repair and maintenance information. Available at: <http://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2008/692/oj>. (accessed 07.11.2016).

2. Krasnokutskiy Ye.V. Neytralizator otkhodyashchikh gazov DVS s katalizatorom na metallicheskom nositele / Ye.V. Krasnokutskiy, V.Ye. Ved', Petar Varbanov, M.I. Satayev // *Integrovani tekhnologii ta energozberezhennya*. – 2015. № 3. – P. 26–30.

3. Ved V. Modelling of hydrocarbons catalytic conversion process / Valeriy Ved', Leonid Tovazhnyanskiy, Yevgeniy Krasnokutskiy, Vadim Koshchii // *Chemistry & Chemical Technology*. – 2015. – Vol. 9. – No. 1. – P. 101–106.

4. Leonid L. Tovazhnyanskii. Mobile Thermocatalytic Waste Processing Complex / Leonid L. Tovazhnyanskii, Valery E. Ved', Vadim A. Koshchii, Alexandr I. Rovenskii, Evgeny V. Krasnokutskii // *Chemical Engineering Transactions*. – 2013. - Vol. 35. - Part 2. - P. 907–912. DOI: 10.3303 / CET 1335151.

5. Krasnokutskii E.V. Substantiating Reaction Mechanism Of Thermocatalytic Benzene Conversion / E.V. Krasnokutskii, Ved V.E. // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. – 2013. - Vol. 47. - No. 1. - P. 60–65. doi:10.1134/S004057951301003.

6. Krasnokutskiy E.V. Universal multi-functional secondary catalyst carriers for purification of gas emission of thermal power equipments / E.V. Krasnokutskiy, B.B. Makhanov, V.E. Ved', M.I. Satayev, A.V. Ponomarenko, A.A. Saipov // *Chemical Engineering Transactions*. – 2016. – Vol. 52 – P. 277–282. DOI:10.3303/CET1652047.

7. Ved' V. E. Calculation of the operation parameters of the catalytic converters of the harmful gas impurities / V.E. Ved', E.V. Krasnokutskiy, M.I. Satayev, A.V. Ved', A.A. Saipov // *Chemical Engineering Transactions*. – 2016. – Vol. 52. – P. 91–96. DOI:10.3303/CET1652016.

8. Dviguni vnutrishnogo zgoryannya : seriya pidruchnikov: u 6 t. / [Marchenko A.P., Parsadanov I.V., Tovazhnyanskiy L.L., Shekhovtsov A.F.]; pid red. A.P. Marchenka, A.F. Shekhovtsova. – Kh.: Prapor, 2004. – Т.5: Ekologizatsiya DVZ. – 360 p.

9. Makhanov B. New type of harmful gas emissions catalytic converter / B. Makhanov, M. Satayev, E. Krasnokutskii, V. Ved, A. Saipov // Industrial Technology and Engineering. – 2015. – No. 4 (17). – P. 5–18.

УДК 544.4:66.021.3

Ведь В.Є., Зебешев Т.З., Краснокутський Є.В., Гайовий М.О.

**ПАРАМЕТРИ ОЧИСТКИ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ГАЗІВ ДВИГУНА ВАЗ-21081і
КАТАЛІТИЧНИМИ НЕЙТРАЛІЗАТОРАМИ РОЗРОБКИ НТУ «ХПІ»
ТА BOSAL 099-886**

У роботі проведено порівняльний аналіз конструкцій розробленого блоку каталітичного перетворення та його промислового аналога марки Bosal 099-886. Показані основні напрямки підвищення експлуатаційних характеристик розробленого експериментального блоку каталітичного перетворення в умовах нестабільності якісного, кількісного складу відпрацьованих газів та їх теплофізичних та газодинамічних властивостей. Проведений аналіз засвідчує, що використання експериментального дослідного стенду, оснащеного двигуном марки ВАЗ-21081і, дозволяє проводити науково обгрунтований порівняльний аналіз блоків каталітичного перетворення та отримувати достовірні експериментальні дані.

Ved V.E., Zebeshev T.Z., Krasnokutsky Ye.V., Haiovyi M.O.

**PARAMETERS OF EXHAUST GAS CLEANING OF VAZ-21081i ENGINE BY
CATALYTIC CONVERTERS OF NTU "KPI" DEVELOPMENT
AND BOSAL 099-886**

The comparative analysis of designs of developed by us catalytic conversion unit and its industrial counterpart brand Bosal 099-886 has been carried out. The main directions of improving performance characteristics of the developed by us experimental unit of catalytic conversion in conditions of qualitative and quantitative instability of the exhaust gases composition and their thermal and gas-dynamic properties have been described. The above analysis shows that the use of experimental research stand equipped with engine VAZ-21081 makes it possible to carry out science-based comparative analysis of the catalytic conversion units and to obtain reliable experimental data.

УДК 66.045.1:662.749.2

Данилов Ю.Б., Перцев Л.П., Коломиец В.Н., Гавриличенко И.Г.

ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ ИЗ ФТОРОПЛАСТА ДЛЯ ХИМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Введение. В процессе интенсивного развития промышленности постоянно возникает необходимость в создании и организации выпуска теплообменной аппаратуры с высокой коррозионной стойкостью, способной конкурировать по работоспособности, энергозатратам и стоимости с аппаратами из высоколегированных нержавеющей сталей и других дефицитных дорогостоящих материалов.

Решение этой проблемы оказалось возможным, благодаря созданию в мировой технике и в Украине фторопластовых теплообменных аппаратов. Универсальная химическая стойкость политетрафторэтилена (фторопласта), как конструкционного материала позволяет использовать эти теплообменники как для процессов теплообмена в высокоагрессивных средах, так и при производстве особо чистых веществ. Материал теплообменника не оказывает каталитического влияния на кинетику химических процессов. Гидрофобные свойства фторопласта способствуют снижению скорости зарастания рабочих поверхностей теплообмена, что обеспечивает неизменность коэффициента теплопередачи на весь период эксплуатации аппарата, а также уменьшению гидравлического сопротивления, обеспечивающего значительное сокращение энергозатрат.

Теория и расчеты теплообменных фторопластовых аппаратов. Созданы и испытаны трубчатые теплообменные аппараты из отечественного политетрафторэтилена (фторопласта – 4). Основным узлом теплообменного аппарата является теплообменный элемент, представляющий собой пучок труб из политетрафторэтилена. Пучок состоит из большого количества труб наружным диаметром от 2,6 до 6,2 мм при толщине стенки 10÷15 % от внутреннего диаметра. Концы пучка труб соединены между собой и образуют головку теплообменного элемента, которая служит для закрепления пучка и для его соединения с внешними коммуникациями.

Применение труб малого диаметра значительно повышает компактность теплообменных аппаратов, обеспечивает их необходимую прочность и приемлемое (для практических целей) термическое сопротивление стенки.

Гибкость труб из политетрафторэтилена позволяет формировать межтрубное пространство переплетением труб между собой. Получается относительно жесткий пучок труб, в котором трубы меняют свое положение, переходя из периферии в центр и обратно. В таком пучке все трубы по условиям теплообмена находятся примерно в равных условиях, а межтрубное пространство составляет 50÷70 % от полного объема пучка (такое соотношение является достаточно оптимальным).

В настоящее время создано новое поколение фторопластовой теплообменной аппаратуры и организовано промышленное производство. На рис. 1,2. представлены некоторые виды разработанных теплообменных аппаратов

Теплообменный аппарат на рис. 1 может работать как погружной теплообменник, а также обеспечивать проведение процессов, например, абсорбции в изотермическом режиме, отвод избытка жидкой фазы из области контакта фаз в колонных аппара-

тах, а также уменьшает до минимума в них брызгоунос. В зоне расположения теплообменных трубок под воздействием жидкой и парогазовой фаз образуется развитый пенный слой контакта рабочих фаз, что способствует интенсификации процессов теплообмена и массообмена. Кроме этого аппарат на рис. 1 может использоваться как конденсатор или испаритель.



Рисунок 1 – Теплообменный аппарат объёмного переплетения из фторопласта

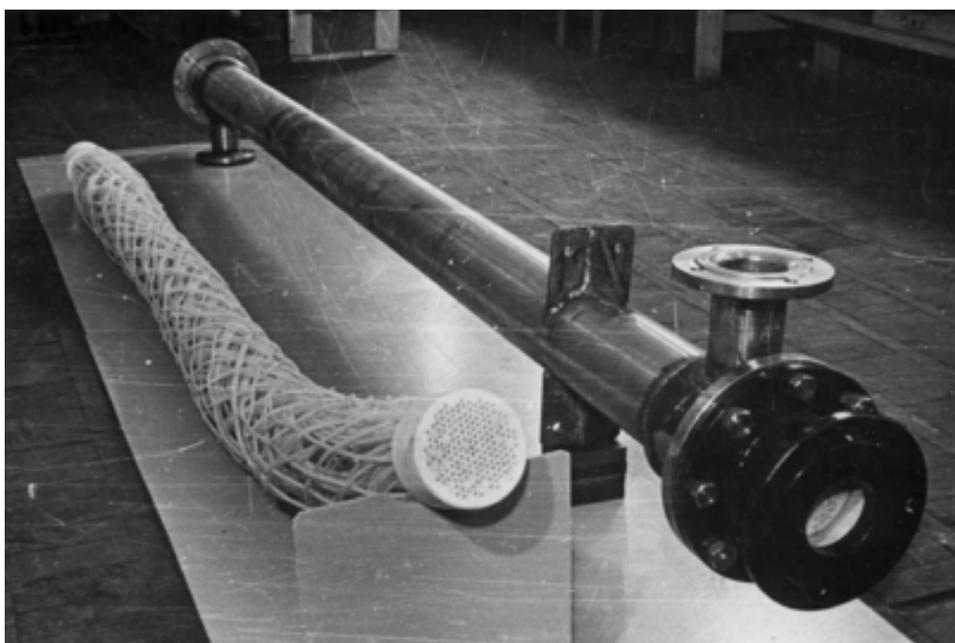


Рисунок 2 – Кожухотрубный теплообменник из фторопласта

На рис. 2 показан кожухотрубний теплообмінник из фторопласта. Теплообменный элемент помещается в обычный металлический кожух из углеродистой или нержавеющей стали. Внутренняя поверхность кожуха имеет при необходимости защитное полимерное покрытие.

Политетрафторэтилен (фторопласт), теплопроводность которого почти в 100 раз ниже, чем теплопроводность нержавеющей стали, и, более чем в 1000 раз ниже, чем теплопроводность меди, представлялся малопригодным материалом для теплообменных аппаратов. Однако, при эксплуатации на жидких средах, термическое сопротивление жидкостной пленки, образующейся от загрязнений и коррозия теплопередающей поверхности теплообменных аппаратов значительно снижают расчетные показатели. При теплообмене с газовой средой общий коэффициент теплопередачи определяется, в основном, сопротивлением газовой пленки, поэтому, термическое сопротивление политетрафторэтилена не является определяющим.

Таблица 1

Материалы греющей поверхности	Теплопроводность, Вт/м·градК	Общий коэффициент теплопередачи в Вт/м·градК, при различной толщине загрязняющего слоя			
		0	0,025	0,075	0,125
Политетрафторэтилен	0,326	557,46	557,46	557,46	557,46
Нержавеющая сталь	22,82	1242,0	1072,0	844,3	700,0
Никель	91,28	1336,6	1293,0	890,0	724,0

Влияние загрязнений, полученное экспериментально, показано в табл. 1. Из табл. 1 видно, что при толщине загрязняющего слоя всего 0,125 мм коэффициент теплопередачи медного теплообменника только в 1,3 раза больше коэффициента теплопередачи политетрафторэтиленового теплообменника. При использовании для охлаждения речной или оборотной воды слой загрязнения может достигнуть 0,5÷1,5 мм; при этом высокий начальный коэффициент теплопередачи металлов практически не имеет решающего значения.

Свойства политетрафторэтилена позволяют применять изделия из него при температуре рабочей среды до 250 °С. Приведенная на рис. 4 расчетная зависимость рабочего давления от температуры хорошо совпадает с аналогичной зависимостью, полученной опытным путем.

При сравнительных испытаниях труб из нержавеющей стали и политетрафторэтилена (по ним со скоростью 0,09÷0,52 м/с пропускали насыщенный раствор сернистого натрия), трубы из нержавеющей стали уже через 1 час работы полностью покрылись кристаллами. Трубы из политетрафторэтилена за этот же промежуток времени оставались чистыми. Указанные свойства, а также гибкость и высокий коэффициент тер-

мического расширения труб из политетрафторэтилена препятствуют образованию накипи.

Характер образующейся накипи также совершенно различный. Металлические трубы полностью покрыты твердой прочно сцепленной с трубами накипью, удаление которой требует значительных механических усилий. Накипь на трубах из политетрафторэтилена рыхлая, легко удаляемая. Полного «зарастания» труб из политетрафторэтилена не происходит, так как при увеличении толщины слоя он скалывается с труб и уносится потоком.

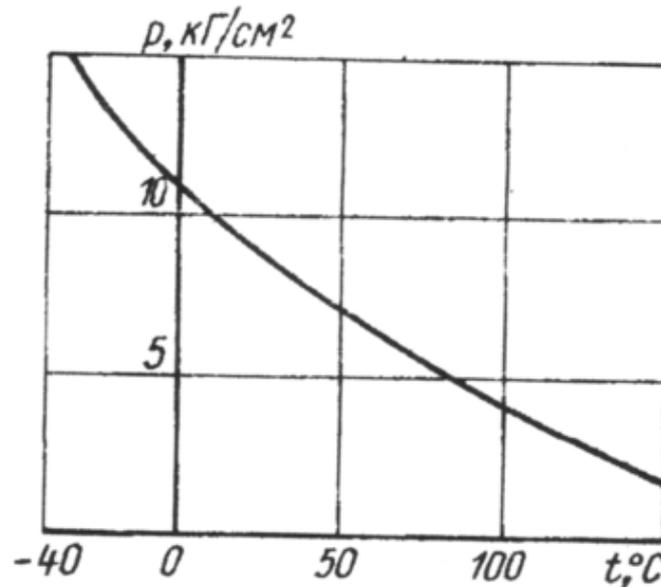


Рисунок 4 – Зависимость рабочего давления p от температуры t для труб с внутренним диаметром 2 мм

По удельной стоимости теплообменные аппараты из политетрафторэтилена и его сополимеров оказались (с учетом срока службы) конкурентноспособными теплообменникам из высоколегированных и никелесодержащих сталей в виду их полной толерантности (т.к. они практически, не изнашиваются) к воздействию коррозионноагрессивных рабочих сред, в которых нормативный срок службы изделия, по степени коррозионного износа, из указанных сталей и сплавов в среднем не превышает 1÷3 лет (при сроках эксплуатации производств 25÷30 лет). Таким образом, энергоемкость комплекта теплообменного оборудования из фторопласта оказываются в 10÷15 раз ниже, чем традиционного.

Исследования показали, что расчет гидравлических сопротивлений возможно производить по формуле

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho w^2}{2}, \text{ Н/м.} \quad (1)$$

При расчете коэффициента гидравлического сопротивления трению λ по зависимостям:

$$\text{– для ламинарного течения – } \lambda = 62 \cdot \text{Re}^{-0,98}, \quad (2)$$

$$\text{– для переходного – } \lambda = 0,47 \cdot \text{Re}^{-0,26}. \quad (3)$$

Тепловой расчет рекомендуется вести по формулам:

$$\text{– при } \text{Re} \leq 1800 \quad \text{Nu} = 0,2 \cdot \text{Re}^{0,46}, \quad (4)$$

$$\text{– при } \text{Re} \geq 1800 \quad \text{Nu} = 2,3 \cdot \text{Re}^{0,125}. \quad (5)$$

Резерв энергосбережения при движении теплоносителей определяется, по существу, соотношением значений гидросопротивлений при $\lambda_{\text{ф}}$ – фторопластовых труб и $\lambda_{\text{т}}$ – металлических труб с высокой шероховатостью и смачиваемостью. По табличным данным $\lambda_{\text{т}}$ при сопоставимых диаметрах металлических труб (шероховатостью $n = 0,014$) коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda_{\text{т}} = 0,06$. Для фторопластовых труб, при $\text{Re} = 10^4$ (диапазона рекомендуемой эксплуатации) $\lambda_{\text{ф}} = 0,03$, т.е. при использовании фторопластовых труб кинетические энергозатраты сокращаются не менее чем в два раза.

Литература

1. Данилов Ю.Б., Перцев Л.П., Коломиец В.Н. Оптимизация технологического процесса отбелики концентрированной азотной кислоты путём применения фторопластовых теплообменников // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», – 2010. – №114. – С. 15–20.
2. Данилов Ю.Б., Сулима А.М., Коломиец В.М., Харченко М.А. Контактное теплообменное устройство из фторопласта для колонных аппаратов // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2005. – №11 – С. 59–64.
3. Перцев Л.П., Ефременко И.П. Трубочатые теплообменные аппараты из пластмасс / Москва: Цинтихимнефтемаш, 1980. – 200 с.
4. Данилов Ю.Б. Математические и экспериментальные исследования модели оросительного теплообменника из фторопластовых трубок / Ю.Б. Данилов, В.Н. Коломиец, С.А. Ладченко // Інтегровані технології та енергосбереження. – Харків : НТУ «ХПІ». – 2008. – № 3. – С. 3–9.
5. Данилов Ю.Б. Реактор отримання діетилового ефіру. Нові конструктивно-матеріальні розробки / Ю.Б. Данилов, А.М. Суліма, В.А. Качанов, В.М. Коломієць, О.К. Гвоздікова, Л.С. Молодцова, Н.Г. Ситник // Хімічна промисловість України. – Київ. – 2007. – № 3 – С. 7–10.

Bibliography (transliterated)

1. Danilov Yu.B., Pertsev L.P., Kolomiets V.N. Optimizatsiya tehnologicheskogo protsessa otbelki kontsentririvannoy azotnoy kislotyі putyom primeneniya ftoroplastovyih teplomossoobmennyih apparatov // Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI». – Harkiv: NTU «HPI», – 2010. – #114. – P. 15–20.

2. Danilov Yu.B., Sulima A.M., Kolomiets V.M., Harchenko M.A. Kontaktnoe teplo-massoobmennoe ustroystvo iz fluoroplasta dlya kolonnyih apparatov // Vestnik natsionalnogo tehniceskogo universiteta «HPI». – 2005. – #11 – P. 59–64.

3. Pertsev L.P., Efremenko I.P. Trubchatye teploobmennyye apparaty iz plastmass / Moskva: Tsintihimneftemash, 1980. – 200 p.

4. Danilov Yu.B. Matematicheskie i eksperimentalnyie issledovaniya modeli orositelnogo teploobmennika iz fluoroplastovyih trubok / Yu.B. Danilov, V.N. Kolomiets, S.A. Ladchenko // Integrovani tehnologiyi ta energosberezheniya. – Harkov : NTU «HPI». – 2008. – # 3. – P. 3–9.

5. Danilov Yu.B. Reaktor otrimannya dietilovogo efiru. Novi konstruktivno-materialni rozrobki / Yu.B. Danilov, A.M. Sullma, V.A. Kachanov, V.M. Kolomiets, O.K. GvozdIkova, L.S. Molodtsova, N.G. Sitnik // Himichna promislovist Ukrayini. – Kiyiv. – 2007. – # 3 – P. 7–10.

УДК 66.045. 1:662.749.2

Данилов Ю.Б., Перцев Л.П., Коломієц В.М., Гавриличенко І.Г.

ТЕПЛООБМІННІ АПАРАТИ З ФТОРОПЛАСТУ ДЛЯ ХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Проведено аналіз розробок, а також промислової експлуатації фторопластових теплообмінників, які дозволяють працювати в високо агресивних середовищах, мають достатньо високі коефіцієнти теплопередачі. Аналіз даних промислової експлуатації теплообмінників дозволив визначити оптимальну щільність теплового потоку від 400÷1000 Вт/м²К. Такі значення коефіцієнтів теплопередачі обумовлені гідрофобними властивостями фторопласту, товщиною та гнучкістю теплообмінних трубок.

Danilov Yu.B., Peppers L.P., Kolomiets V.N., Gavrilchenko I.G.

HEAT EXCHANGERS MADE OF PTFE FOR CHEMICAL INDUSTRY

The analysis of the development and industrial exploitation of fluoroplastic heat exchangers that allow you to work in highly corrosive environments, have a sufficiently high heat transfer coefficients. Analysis of data of industrial use of heat exchangers allowed us to determine the optimal heat flux density from 400÷1000 W/m²·K. These values of heat transfer coefficients due to the hydrophobic properties of PTFE, thickness and flexibility heat exchange tubes.

УДК 621.184.004

Редько А.А., Павловская А.А., Давиденко А.В., Куликова Н.В., Редько И.А.

АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ТОПКЕ ВОДОТРУБНОГО КОТЛА ДЕ-10/14 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ПАРАМЕТРАХ ЗАКРУЧЕННОГО ПОТОКА

Аннотация. Приведены результаты численного моделирования процесса сжигания газа, распределений скорости и давления топочных газов в зависимости от конструктивных параметров вихревой горелки. Показано влияние характеристик закрученного потока газов на структуру факела и процессы сжигания газа, распределение температуры и теплообмен в топочном объёме.

Введение. Опыт эксплуатации водотрубных паровых котлов ДЕ-10/14 показал недостаточную эффективность горелочных устройств типа ГМГ-7. Газомазутные горелки ГМГ-7 не обеспечивают высокие скорости газов в топке котла и эффективность теплообмена с тепловоспринимающими экранными поверхностями [1, 2]. Реконструкция газогорелочного устройства позволяет произвести малозатратную реконструкцию котлов ДЕ-10/14. Поэтому исследование аэродинамических процессов в топке котла является актуальной задачей.

Состояние и постановка проблемы. Решение задач модернизации горелочных устройств, анализ и выбор оптимальных режимов эксплуатации топок и котлоагрегатов требуют применения современных методов математического моделирования. Процессы смесеобразования, горения, рециркуляции продуктов сгорания и габариты факела, существенно зависят от конструкции горелочных устройств, конфигурации топочного объёма и кинетики реакции горения. Нормативный метод не всегда приемлем для решения этих задач, так как требует использования эмпирических поправок при расчёте температур газов и других характеристик параметра топки. Неравномерное и неустойчивое течение топочных газов при изменении тепловой нагрузки котла вызывает образование зон с низкими скоростями течений, зон с обратными течениями, с повышенными температурами, высокими плотностями радиационных тепловых потоков. Аэродинамические процессы в топках котлов исследовались в работах [1–4, 7, 8, 10–12]. Применение вихревых горелок обеспечивает устойчивость факела и эффективного сжигания топлива.

Вихревые горелки характеризуются сильнозакрученным факелом, и устойчивость горения обеспечивается образованием в приосевой зоне сильноразвитых возвратных течений. Конструктивные параметры горелочного устройства: угол наклона лопаток завихрителей по первичному и вторичному воздуху и параметр крутки характеризуют крупномасштабное влияние на аэродинамические процессы, структуру, размеры, форму пламени. Увеличение угла наклона выходной части лопатки горелки приводит к тому, что угол раскрытия факела увеличивается, и сжигание газа происходит вблизи фронта топки. Зона максимального тепловыделения и температур газов приближается к срезу горелки, увеличивается локальная плотность тепловых потоков на экранные поверхности. Закрутка потока интенсифицирует смешение газа и воздуха, что ускоряет процессы горения газа [1, 2, 12]. Однако, с увеличением угла наклона лопаток регистра вторичного воздуха более $\varphi_2=45^\circ$ возможно настиление факела на днище топочной камеры и наброс на боковые теплообменные поверхности. Углы наклона лопаток регист-

ров первичного и вторичного воздуха газогорелочного устройства существенно влияют на процессы сжигания газа и теплообмен продуктов сгорания в топке котла.

Результаты выполненных исследований указывают на сложность течений газов в топочном объеме и их зависимость от распределений температуры газов, на наличие обратных потоков рециркуляции газов, на вихревой характер течений в поперечных сечениях топки. При этом визуализация результатов моделирования в двух- и трёхмерном вариантах в любом сечении топки позволяет проанализировать структуру топочной среды. Аэродинамическое сопротивление при движении топочных газов зависит от структуры факела, распределений температуры и скорости газов в объеме топки. Конвективный теплообмен газов с экранными трубными пучками также определяется интенсивностью аэродинамических процессов при вихревом движении газов. Поэтому требуется дальнейшее изучение процессов сжигания газа в закрученном потоке с учётом конструктивных параметров вихревых горелочных устройств.

Целью работы является численное исследование влияния конструктивных параметров вихревого газогорелочного устройства на аэродинамические процессы и эффективность сжигания газа в топке котла ДЕ-10/14.

Объект и методика исследования. Исследован вертикально-водотрубный газомазутный котел ДЕ-10-14ГМ с горелочным устройством ГМГ-7, предназначенный для производства насыщенного и слабо перегретого пара с температурой 225 °С с абсолютным давлением 14 кгс/см², номинальной производительностью 10 т/ч.

Математическая модель радиационно-конвективного теплообмена в газовом тракте котла сформирована на основе усреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса с учётом гравитации и с пренебрежением сжимаемостью [13–24]. Модель составляют уравнение неразрывности, переноса импульса, энергии и химических компонентов газовой смеси, записанные в стационарной форме. Уравнения замкнуты законом Ньютона для тензора давления, законом Фурье для теплового потока, законом Фика для потока массы, законом Клайперона–Менделеева для термодинамического состояния смеси газов, уравнениями модели турбулентности k - ϵ Лаундера–Сполдинга и модели турбулентного горения Магнусена–Хертагера. Моделирование выполнено методом контрольного объема [27].

Основные результаты и их обсуждение. Результаты численного исследования позволили определить средние и локальные значения скорости газов и распределение давления в топочном объеме. На рис. 1а, б показаны в трёхмерном представлении течения газов при различных значениях угла установки лопаток в регистрах первичного и вторичного воздуха горелки ГМГ-7. Характер течений существенно отличается.

При значении углов установки лопаток $\varphi_1=45^\circ$ и $\varphi_2=60^\circ$ наблюдается сильное V-образное раскрытие факела под углом 60° и приближение зоны горения к фронту топочной камеры и боковым теплообменным поверхностям. Скорость струй составляет $30 \div 42$ м/с на расстоянии $0,5 \div 0,6$ м от среза горелки, затем скорость снижается до $25 \div 17$ м/с. В центре ядра на оси топки скорость газов $13 \div 16$ м/с, ближе к периферии скорость снижается до $4 \div 6$ м/с. На расстоянии $2 \div 2,5$ м скорость газов низкая, и составляет от $4 \div 2$ м/с до 1 м/с в отдельных зонах. На оси топки на расстоянии 1,5–2 м образуется мало-подвижная область, где происходит дожигание горючего газа. Для варианта $\varphi_1=60^\circ$, $\varphi_2=45^\circ$ результаты численного исследования показали, что на выходе из вихревой горелки профиль скорости имеет W-образную форму с провалом в приосевой зоне. На-

блюдается снижение максимума скорости к периферии факела и образование зоны рециркуляции. Сложные траектории движения рециркулирующих газов приводят к увеличению аэродинамического сопротивления, возможности соприкосновения с низкотемпературными теплообменными поверхностями. Распределение скорости газового потока в объеме топки показано на рис. 2 и 3.

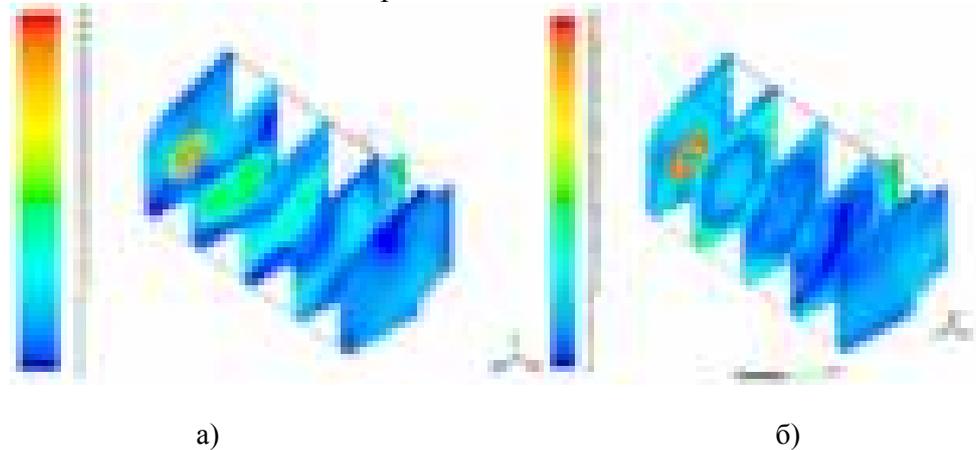


Рисунок 1 – Течения газов при различных значениях угла установки лопаток в регистрах первичного и вторичного воздуха: а) – $\varphi_1=60^\circ$ и $\varphi_2=45^\circ$; б) – $\varphi_1=45^\circ$ и $\varphi_2=60^\circ$

Средние значения скорости газов изменяются от 25 м/с до 5 м/с на выходе из топки. В продольно-горизонтальном сечении значение скорости на оси топки составляет 10,3 м/с, а вблизи боковых трубчатых поверхностей 2,5 м/с. В продольно-вертикальном сечении значения скорости вблизи верхнего барабана составляет 3 м/с, а вблизи нижнего барабана 3,2 м/с.

Давление газов в топке изменяется от 154,7 Па на выходе из горелки до 73,0 Па на выходе из топки. Перепад давления газов по глубине топки составляет 87 Па. Статическое давление повышается от 50 Па до 69,4 Па на выходе из топки. На расстоянии 1,5÷2 м и дальше статическое давление газов практически постоянное (61,9÷69,4 Па), как показано на рис. 4.

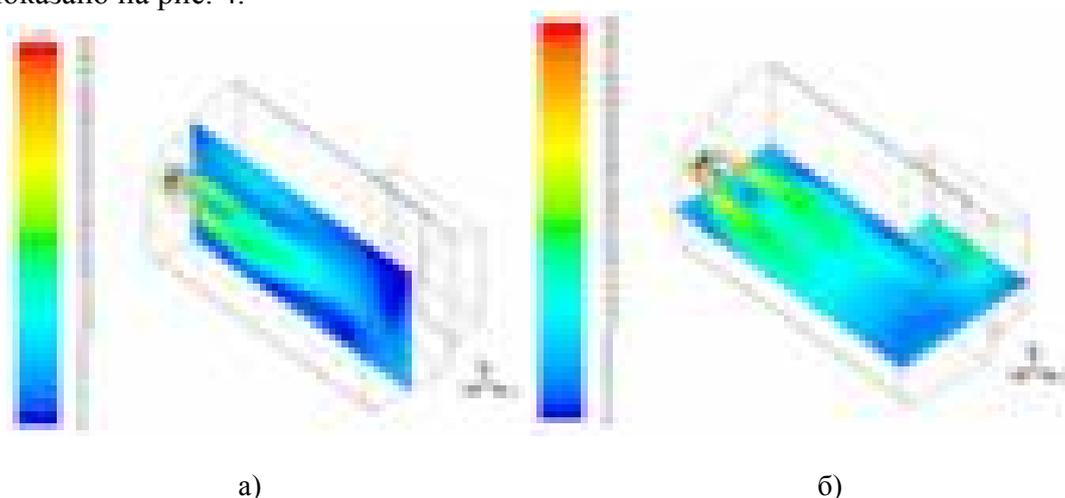


Рисунок 2 – Скорость течения газов при $\varphi_1=60^\circ$ и $\varphi_2=45^\circ$: а) в вертикальном разрезе; б) – в горизонтальном разрезе

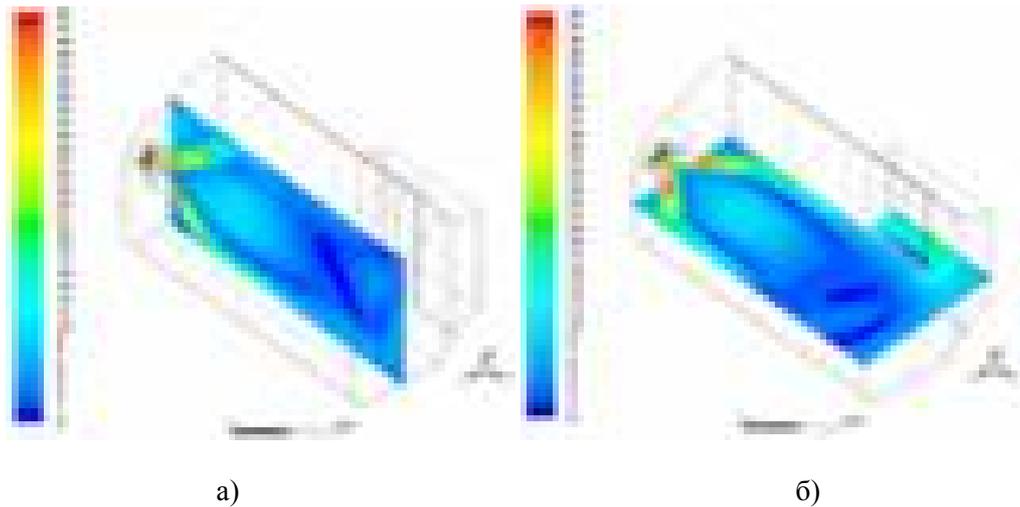


Рисунок 3 – Скорость течения газов при $\varphi_1=45^\circ$ и $\varphi_2=60^\circ$:
а) в вертикальном разрезе; б) – в горизонтальном разрезе

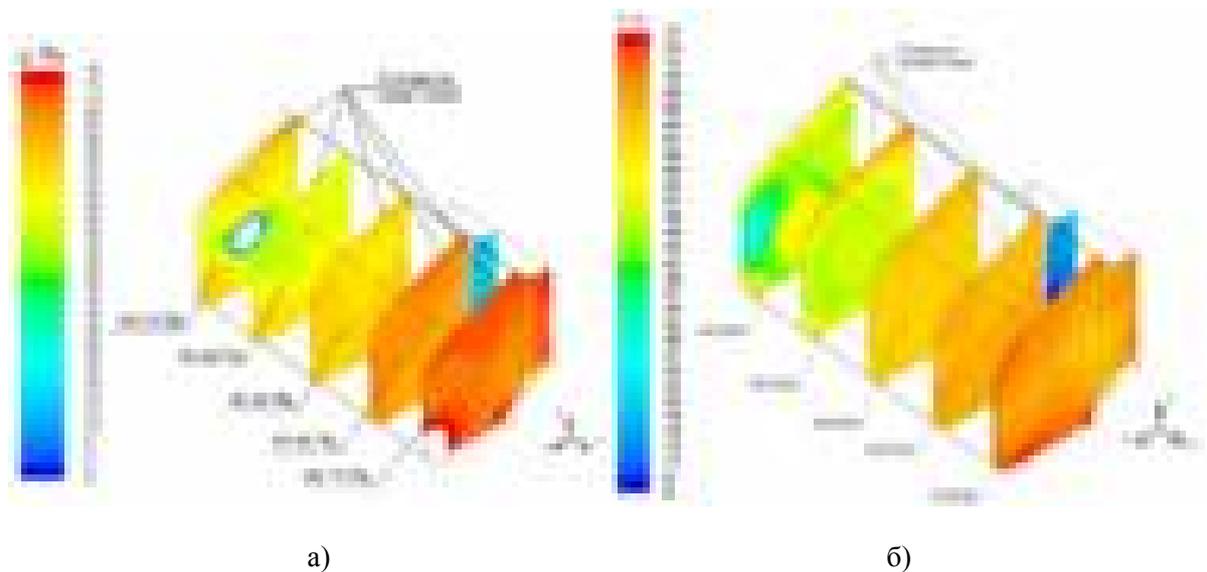


Рисунок 4 – Статическое давление газов по длине топки:
а) – $\varphi_1=60^\circ$ и $\varphi_2=45^\circ$; б) – $\varphi_1=45^\circ$ и $\varphi_2=60^\circ$

Для варианта с – $\varphi_1=60^\circ$ и $\varphi_2=45^\circ$ изолинии полного избыточного давления указывают на его снижение по длине топки. Общее падение давления по длине топки составляет 65 Па. На периферии факела давление потока газов снижается от 60 Па до 5 Па. Статическое давление газов по длине топки возрастает. Пониженное давление вблизи горелки вызывает образование возвратных течений к фронту топки и неустойчивость структуры короткого факела.

При значениях углов установки лопаток $\varphi_1=60^\circ$ и $\varphi_2=45^\circ$ структура факела более устойчивая, факел осесимметричный длиной 2÷2,5 м. Однако, при этом снижаются скорости газов до 10 м/с.

Особенности аэродинамических процессов определяют различные температурные распределения газов в топочном объеме. Для варианта $\varphi_1=45^\circ$ и $\varphi_2=60^\circ$ температура газов в V-образных струях составляет 1500÷1700 °С, а вблизи боковых поверхностей

1000÷1100 °С. Для варианта $\varphi_1=60^\circ$ и $\varphi_2=45^\circ$ температура газов в W-образном факеле также составляет 1500÷1700 °С, а вблизи боковых экранных поверхностей 800÷900 °С, что и определяет различие в распределении плотности теплового потока в топочном объеме [27].

Выводы. Результаты численного исследования показали, что угол установки лопаток регистра существенно влияет на процесс сжигания газа и теплообмен в топке котла ДЕ-10/14. При установке лопаток в регистре первичного воздуха $\alpha_b=0,15$, $\varphi_1=60^\circ$ и параметре крутки $n_1=2,4$, а в регистре вторичного воздуха $\varphi_2=45^\circ$ и $n_2=1,6$ при общем коэффициенте избытка воздуха $\alpha_b=1,10$ образуется устойчивый осесимметричный факел небольшого объема длиной 1,5÷2 м, температура газа в ядре факела составляет 1500–1700 °С, а вблизи экранных поверхностей 800–900 °С, локальная плотность тепловых потоков изменяется по глубине топки от 52 кВт/м² до 43 кВт/м². При параметрах вихревой горелки $\varphi_1=45^\circ$ и $n_1=1,6$, $\varphi_2=60^\circ$ и $n_2=2,4$ наблюдается раскрытие факела под углом 60°, образование возвратных течений. Факел неустойчивый, короткий длиной 0,6÷1,2 м. Горение происходит вблизи фронта топки. Температура газов на оси топки ниже, чем вблизи боковых стенок.

Результаты численного исследования показали, что угол установки лопаток в регистре вторичного воздуха должен не превышать $\varphi_2=60^\circ$ ($\alpha_b=0,15$) при двухступенчатом сжигании газа, кроме того, аэродинамическое сопротивление при движении топочных газов в случае $\varphi_2=60^\circ$ выше ($\Delta p=87$ Па), чем при значении угла установки лопаток $\varphi_2=45^\circ$ ($\Delta p=65$ Па).

Литература

1. Акопьянц Б.Е. Недостатки конструкции промышленных котлов ДКВР-20-13 / Б.Е. Акопьянц // Новости теплоснабжения. 2000. – №4. – С. 10–11.
2. Тайлашева Т. С. Анализ опыта эксплуатации котлов типа ДКВР / Т.С. Тайлашева // Вестник науки Сибири. 2014. – №3(13). – С. 11–15.
3. Найдёнов Г.Ф. Газогорелочные устройства с регулируемыми характеристиками факела / Г.Ф. Найдёнов. – К.: Техніка. 1974. – 112 с.
4. Найденов Г.Ф. Вихревые газовые горелки / Г.Ф. Найдёнов. – К.: Техніка. 1966. – 121 с.
5. Щукин В.К., Халатов А.А. Теплообмен, массообмен и гидродинамика закрученных потоков в осесимметричных каналах / В.К. Щукин, А.А. Халатов. – М.: Машиностроение. 1982. – 200 с.
6. Ахмедов Р.Б. Дутьевые газогорелочные устройства / Р.Б. Ахмедов. – М. Недра. 1970.
7. Винтовкин А.А., Ладыгичев М.Г., Гусовский В.Л., Усачев А.Б. Современные горелочные устройства. Конструкции и технические характеристики. Справочник / А.А. Винтовкин, М.Г. Ладыгичев, В.Л. Гусовский, А.Б. Усачев. – М.: Машиностроение. 1. 2001. – 497 с.
8. Халатов А.А., Кобзарь С.Г. Компьютерные технологии в модернизации котлов и камер сгорания / А.А. Халатов, С.Г. Кобзарь // Аква-терм. 2007. – №1. – С. 12–15.
9. Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках / С.С. Кутателадзе, Э.П. Волчков, В.И. Терехов. – Новосибирск: Ин-т теплофизики. 1987. – 282 с.

10. Халатов А.А. Теория и практика закрученных потоков / А.А. Халатов. – К.: Наукова думка, 1989. – 180 с.
11. Долинский А.А., Халатов А.А., Кобзарь С.Г., Назаренко О.А., Мещеряков А.А. Использование компьютерного моделирования при малозатратной модернизации котла НИИСТУ-5 / А.А. Долинский, А.А. Халатов, С.Г. О.А. Кобзарь, Назаренко, А.А. Мещеряков // Пром. Теплотехника. 2007. – Т. 29, №5. – С. 80–91.
12. Басок Б.И., Демченко В.Г., Мартыненко М.П. Численное моделирование процессов аэродинамики в топке водогрейного котла со вторичным излучателем / Б.И. Басок, В.Г. Демченко, М.П. Мартыненко // Пром. Теплотехника. 2006. – Т. 28, №1. – С. 17–22.
13. Хаустов С.А., Заворин А.С. Численное исследование аэродинамики жаротрубной топки с реверсивным факелом / С.А. Хаустов, А.С. Заворин // Изв. Томского политехнического университета. 2013. Т. 323, – №4. – С. 5–9.
14. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки: пер. с англ. / А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред. – М.: Мир. 1987. – 588 с.
15. Ассад М. С., Пенязьков О. Г. Продукты сгорания жидких и газообразных топлив: образование, расчет, эксперимент / М. С. Ассад, О. Г. Пенязьков. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 305 с.
16. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен : в 2 т. / Д. Андерсон, Дж. Таннехилл, Р. Плетчер. – М. : Мир, 1990. – Т. 1. – 384 с.
17. Jakobsen H. A. Chemical Reactor Modeling / H. A. Jakobsen. – Springer, 2008. – P. 1244.
18. Peters N. Turbulent combustion / N. Peters. – Cambridge University Press. 2000. – P. 304.
19. Суржиков С.Т. Тепловое излучение газов и плазмы / С.Т. Суржиков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 544 с.
20. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B.E. Launder, D.B. Spalding. – London : Academic Press, 1972. – P. 169.
21. Magnussen B.F., Hjertager B.H. On Mathematical Models of Turbulent Combustion With Special Emphasis on Soot Formation and Combustion / B.F. Magnussen, B.H. Hjertager // Sixteenth Symp. (Intern.) on Combustion. – Pittsburg, PA : The Combustion Inst., 1976. – P. 747–775.
22. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкости / К. Флетчер. – М.: Мир. 1991. – Т. 1. – 502 с.
23. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат. 1984. – 152 с.
24. Murthy J.Y. Finite Volume Method for Radiative Heat Transfer Using Unstructured Meshes / J. Y. Murthy, S. R. Mathur // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 1998. – Vol. 12(3), No. 1. – P. 313–321.
25. Chai J.C. Discrete-Ordinates and Finite-Volume Methods for Radiative Heat Transfer / J. C. Chai, S. V. Patankar // Handbook of Numerical Heat Transfer. – Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2009. – P. 310–373.
26. Басс Л.П. Методы дискретных ординат в задачах о переносе излучения / Л.П. Басс, А.М. Волощенко, Т.А. Гермогенова. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 1986. – 231 с.
27. Редько А.О., Давіденко А.В., Павловский С.В. та інш. Моделювання процесів теплообміну в топках водотрубних котлів ДКВР(ДЕ)-10/14 / А.О. Редько, А.В. Давіденко, С.В. Павловський, В.Є. Костюк // Вісник НУ «Львівська політехніка». Серія: Теорія та практика будівництва. – 2016. – №844. – С. 180–187.

Bibliography (transliterated)

1. Akopyants B.E. Nedostatki konstruksii promyshlennyih kotlov DKVR-20-13 /B.E. Akopyants // *Novosti teplosnabzheniya*. 2000. – #4. – P. 10–11.
2. Taylasheva T. S. Analiz opyita ekspluatatsii kotlov tipa DKVR / T.S. Taylasheva // *Vestnik nauki Sibiri*. 2014. – #3(13). – P. 11–15.
3. Naydyonov G.F. Gazogorelochnyye ustroystva s reguliruemymi harakteristikami fakela / G.F. Naydyonov. – K.: Tehnika. 1974. – 112 p.
4. Naydenov G.F. Vihrevyye gazovyye gorelki / G.F. Naydyonov. – K.: Tehnika. 1966. – 121 p.
5. Schukin V.K., Halatov A.A. Teploobmen, massoobmen i gidrodinamika zakruchennyih potokov v osesimmetrichnyih kanalah / V.K. Schukin, A.A. Halatov. – M.: Mashinostroenie. 1982. – 200 p.
6. Ahmedov R.B. Dutevyye gazogorelochnyye ustroystva / R.B. Ahmedov. – M. Nedra. 1970.
7. Vintovkin A.A., Ladyigichev M.G., Gusovskiy V.L., Usachev A.B. Sovremennyye gorelochnyye ustroystva. Konstruksii i tehicheskie harakteristiki. Spravochnik / A.A. Vintovkin, M.G. Ladyigichev, V.L. Gusovskiy, A.B. Usachev. – M.: Mashinostroenie. 1. 2001. – 497 p.
8. Halatov A.A., Kobzar S.G. Kompyuternyye tehnologii v modernizatsii kotlov i kamer sgoraniya / A.A. Halatov, S.G. Kobzar // *Akva-term*. 2007. – #1. – P. 12–15.
9. Kutateladze S.S., Volchkov E.P., Terehov V.I. Aerodinamika i teplomassoobmen v ogranichennyih vihrevyih potokah / S.S. Kutateladze, E.P. Volchkov, V.I. Terehov. – Novosibirsk: In-t teplofiziki. 1987. – 282 p.
10. Halatov A.A. Teoriya i praktika zakruchennyih potokov / A.A. Halatov. – K.: Naukova dumka, 1989. – 180 p.
11. Dolinskiy A.A., Halatov A.A., Kobzar S.G., Nazarenko O.A., Mescheryakov A.A. Ispolzovanie kompyuternogo modelirovaniya pri malozatratnoy modernizatsii kotla NIISTU-5 / A.A. Dolinskiy, A.A. Halatov, S.G. O.A. Kobzar, Nazarenko, A.A. Mescheryakov // *Prom. Teplotehnika*. 2007. – T. 29, #5. – P. 80–91.
12. Basok B.I., Demchenko V.G., Martynenko M.P. Chislennoe modelirovanie protsessov aerodinamiki v topke vodogreynogo kotla so vtorichnyim izluchaetelem / B.I. Basok, V.G. Demchenko, M.P. Martynenko // *Prom. Teplotehnika*. 2006. – T. 28, #1. – P. 17–22.
13. Haustov S.A., Zavorin A.S. Chislennoe issledovanie aerodinamiki zharotrubnoy topki s reversivnyim fakelom / S.A. Haustov, A.S. Zavorin // *Izv. Tomskogo politehnicheskogo universiteta*. 2013. T. 323, – #4. – P. 5–9.
14. Gupta A., Lilli D., Sayred N. Zakruchennyie potoki: per. s angl. / A. Gupta, D. Lilli, N. Sayred. – M.: Mir. 1987. – 588 p.
15. Assad M. S., Penyazkov O. G. Produktyi sgoraniya zhidkih i gazoobraznyih topliv: obrazovanie, raschet, eksperiment / M. S. Assad, O. G. Penyazkov. – Minsk: Belarus. navuka, 2010. – 305 p.
16. Anderson D. Vyichislitel'naya gidromekhanika i teploobmen : v 2 t. / D. Anderson, Dzh. Tannehill, R. Pletcher. – M. : Mir, 1990. – T. 1. – 384 p.
17. Jakobsen H. A. Chemical Reactor Modeling / H. A. Jakobsen. – Springer, 2008. – R. 1244.
18. Peters N. Turbulent combustion / N. Peters. – Cambridge University Press. 2000. – R. 304.

19. Surzhikov S.T. Teplovoe izluchenie gazov i plazmy / S.T. Surzhikov. – M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2004. – 544 p.
20. Launder B.E., Spalding D.B. Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B.E. Launder, D.B. Spalding. – London : Academic Press, 1972. – P. 169.
21. Magnussen B.F., Hjertager B.H. On Mathematical Models of Turbulent Combustion With Special Emphasis on Soot Formation and Combustion / B.F. Magnussen, B.H. Hjertager // Sixteenth Symp. (Intern.) on Combustion. – Pittsburg, PA : The Combustion Inst., 1976. – P. 747–775.
22. Fletcher K. Vyichislitelnyie metodyi v dinamike zhidkosti / K. Fletcher. – M.: Mir. 1991. – T. 1. – 502 p.
23. Patankar S. Chislennyye metodyi resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti / S. Patankar. – M.: Energoatomizdat. 1984. – 152 p.
24. Murthy J.Y. Finite Volume Method for Radiative Heat Transfer Using Unstructured Meshes / J.Y. Murthy, S.R. Mathur // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 1998. – Vol. 12(3), No. 1. – P. 313–321.
25. Chai J.C. Discrete-Ordinates and Finite-Volume Methods for Radiative Heat Transfer / J.C. Chai, S.V. Patankar // Handbook of Numerical Heat Transfer. – Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2009. – P. 310–373.
26. Bass L.P. Metodyi diskretnyih ordinat v zadachah o perenose izlucheniya / L.P. Bass, A.M. Voloschenko, T.A. Germogenova. – M: IPM im. M.V. Keldyisha, 1986. – 231 p.
27. Redko A.O., Davidenko A.V., Pavlovskiy S.V. ta insh. Modelyuvannya protsesiv teploobminu v topkakh vodotrubnih kotliv DKVR(DE)-10/14 / A.O. Redko, A.V. Davidenko, S.V. Pavlovskiy, V.E. Kostyuk // Visnik NU «Lvivska politehnika». Seriya: Teoriya ta praktyka budivnitstva. – 2016. – #844. – P. 180–187.

УДК 621.184.004

Редько А.О., Павловська А.О., Давіденко А.В., Кулікова Н.В., Редько І.О.

АЕРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ТОПЦІ ВОДОТРУБНОГО КОТЛА ДЕ-10/14 ПРИ РІЗНИХ ПАРАМЕТРАХ ЗАКРУЧЕНОГО ПОТОКУ

Наведено результати чисельного моделювання процесу спалювання газу, розподілів швидкості і тиску топкових газів в залежності від конструктивних параметрів вихрового пальника. Показано вплив характеристик закрученого потоку газів на структуру факела і процеси спалювання газу, розподіл температури і теплообмін в топковому об'ємі.

Redko A.O., Pavlovskaya A.O., Davidenko A.V., Kulikova N.V., Redko I.O.

AERODYNAMIC PROCESSES IN THE FURNACE WATER-TUBE BOILERS DE-10/14 AT VARIOUS PARAMETERS SWIRLING FLOW

The results of numerical modeling of gas combustion, distribution of speed and pressure of the flue gases depending on the design parameters of the vortex burner. The influence of swirling gas flow characteristics to the flame structure and the processes of gas combustion, heat transfer and temperature distribution in the furnace volume.

Борисенко В.С., Приймак А.В.

УПРАВЛІННЯ ФАКТОРАМИ РИЗИКУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ БЕЗПЕКИ ПОЛЬОТІВ

Вступ

Однією з найгостріших проблем авіації з моменту її зародження і до сьогоднішнього дня була і, на жаль, залишається проблема забезпечення безпеки польотів (БзП). Її актуальність диктується ступенем тяжкості наслідків авіаційних подій, які характеризуються: можливістю одночасної загибелі великої кількості людей, як таких, що знаходяться на борту повітряних суден, так і таких, що безпосередньо стали жертвами авіаційних подій (АП); значними екологічними наслідками; можливістю втрати дорогої авіаційної техніки і не менш дорогого (у плані професійної підготовки) льотного складу.

Звичайно, простими попереджувальними заходами, які є пріоритетними для сучасної системи управління безпекою польотів, вирішити вказану проблему неможливо передусім у зв'язку із її багатогранністю. Однак, застосовуючи системний підхід щодо її вивчення, досліджуючи найбільш проблемні питання БзП вдається безпосередньо вплинути на рівень аварійності в державній та комерційній авіації постійно зменшуючи його.

Важливим аспектом роботи із забезпечення БзП є безпосереднє дослідження небезпечних факторів та можливих джерел їх виникнення, яке має стати основою сучасної системи управління БзП, як на державному рівні, так і на рівні суб'єктів авіаційної діяльності.

Мета роботи

Розробка елементів алгоритму оцінки факторів ризику, що має стати основою сучасної системи управління БзП як на рівні держави (SSP), так і суб'єктів авіаційної діяльності (SMS), а також розробка і реалізація ефективних і адекватних заходів щодо їх зменшення.

Основна частина

До теперішнього часу в основі попередження авіаційних подій і інцидентів лежить ідеологія забезпечення БзП, яка побудована на реагуючому підході, який базується на суворому дотриманні нормативних вимог та реагуванні на наслідки дії небезпечних факторів, виявлених переважно за результатами розслідування АП або інцидентів [5]. Постійної попереджувальної роботи, націленої на своєчасне виявлення джерел небезпечних факторів до того, як вони приведуть до негативних наслідків, цей підхід не припускає. В той же час світовий досвід показує, що сучасна система забезпечення БзП повинна будуватися на принципах проактивного управління БзП, в основу яких має бути покладений достовірний прогноз небезпечних факторів, а вжиття превентивних, попереджувальних заходів повинне знаходитися у кореляційному зв'язку із критичністю небезпечного фактору.

Виходячи із цього Міжнародною організацією цивільної авіації ІКАО [4] запропоновано здійснити поступовий перехід до 2027 року від існуючих практик до перспективної системи забезпечення БзП, включаючи упереджуюче керування ризиками. На

відміну від існуючої системи управління БзП [1, 2, 4] перспективна система має базуватися на постійному виявленні небезпечних факторів в авіаційній системі, в тому числі й прихованих, які ще не проявилися, але можуть стати причиною інцидентів, аварій або катастроф у майбутньому.

Таким чином, БзП розглядається як "стан системи, при якому фактори ризику знижені до прийняттого рівня і підтримуються або на цьому, або на нижчому рівні за допомогою безперервного процесу виявлення джерел небезпеки і контролю факторів ризику" [1, 2].

Проте з огляду на ряд обставин оперативно виявити небезпечні фактори та виконати їх оцінку у повному обсязі не є можливим. Тому деякі із них все-таки стають причинами АП. У зв'язку з цим розроблена методика "управління ризиками" [3, 4], яка також носить проактивний характер і включає:

- визначення небезпечних факторів;
- оцінка і зменшення ризику для безпеки польотів.

Виявлення небезпечних факторів є неодмінною умовою управління факторами ризику для БзП. Ясне уявлення про те, що безпосередньо є небезпечним фактором і наслідком дії небезпечного фактору є обов'язковим при дослідженні питань створення системи управління БзП.

При розгляді питань управління під небезпечним фактором слід розуміти подію або сукупність подій, прояв яких у польоті може призвести до виникнення і розвитку особливої ситуації та, зрештою, до АП.

Для виявлення небезпечних факторів слід використовувати наступні методики [3, 4]:

а) реагуючий підхід – ця методика передбачає аналіз результатів або подій, що мали місце у минулому. Небезпечні фактори виявляються в процесі розслідування подій, пов'язаних з БП. Інциденти і АП є чіткими показниками недоліків в системі і завдяки цьому можуть використовуватися для визначення небезпечних факторів, які або сприяють такій події, або мають прихований (латентний) характер;

б) проактивний підхід – ця методика передбачає аналіз існуючих або реально виникаючих ситуацій. Такий підхід означає активний пошук небезпечних факторів в існуючих процесах;

в) прогнозний підхід – ця методика передбачає збір даних з метою виявлення можливих негативних результатів або подій в майбутньому, аналіз системних процесів і середовища, що дозволяє виявляти потенційні небезпечні фактори в майбутньому і розробляти заходи по їх зменшенню.

Управління факторами ризику для безпеки польотів – ще один ключовий компонент системи управління БзП.

Фактор ризику для БзП є прогнозованою вірогідністю і серйозністю наслідків або результатів, які викликані існуючим небезпечним чинником.

Метою управління факторами ризику для БзП є оцінка ризиків, пов'язаних з виявленими небезпечними чинниками, а також розробка і реалізація ефективних і адекватних заходів щодо їх зменшенню.

Алгоритм проведення аналізу ризиків наведений на рисунку 1.

Фактор ризику для безпеки польотів концептуально оцінюються як прийнятні, допустимі або неприпустимі [4].

Фактори ризику, що оцінені як ті що зразу потрапляють в зону прийнятних ризиків, є прийнятними, оскільки існують і не вимагають ніяких дій для того, щоб поста-

вити під організаційний контроль і контролювати вірогідність та/або серйозність наслідків небезпечних чинників [4].

Фактори ризику, що оцінені в зоні допустимих ризиків, прийнятні за умови, що в процесі експлуатації ПС реалізуються адекватні компенсаційні заходи [4].

Фактори ризику, що оцінені як ті що спочатку потрапляють в зону неприпустимих ризиків, неприйнятні ні за яких умов. Вірогідність та/або серйозність наслідків небезпечних факторів носять такий масштаб, а небезпечний потенціал цих факторів представляє таку загрозу для безпеки польотів, що потрібно негайні заходи по зменшенню ризиків.

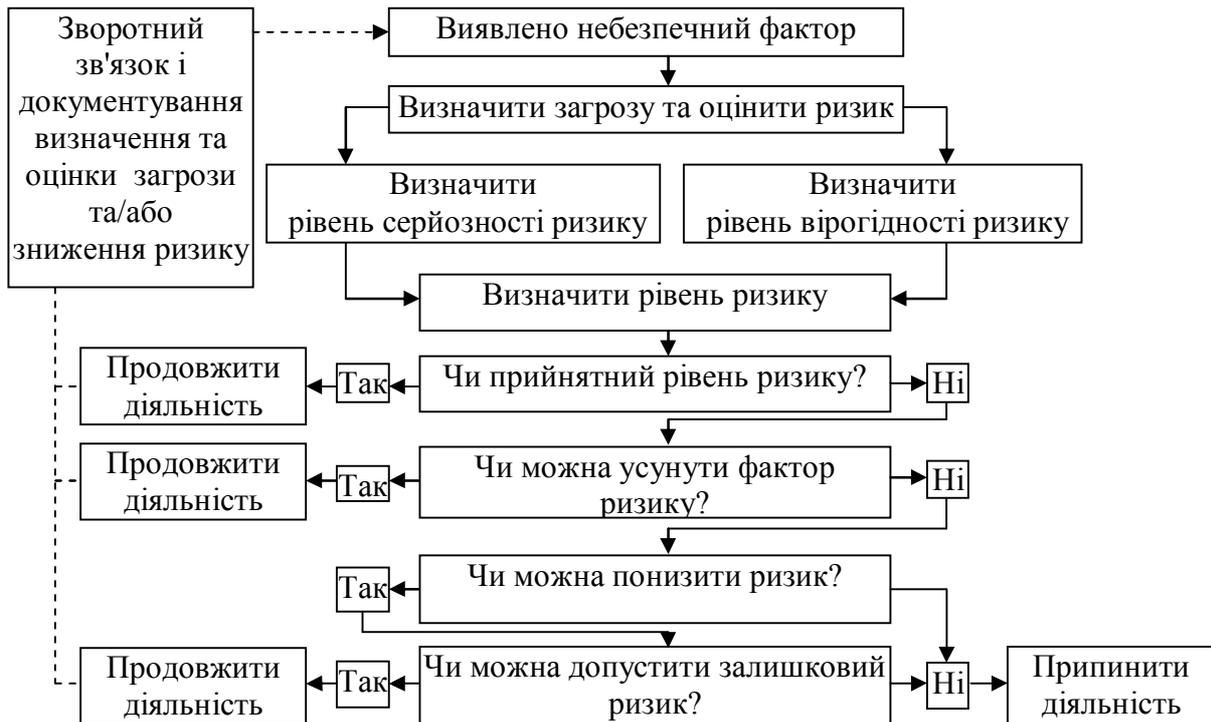


Рисунок 1 – Алгоритм проведення аналізу ризиків

При цьому фактори ризику для БП, оцінені спочатку як неприпустимі, можуть бути понижені і згодом переміщені в зону допустимих ризиків за умови, що такі ризики контролюватимуться адекватними компенсаційними заходами.

Для зниження ризику слід застосовувати наступні стратегії [3]:

Уникнення/ухилення – діяльність відмінюється оскільки ризик перевищує вигоду від продовження цієї діяльності.

Скорочення – скорочується частота діяльності, або приймаються заходи для зменшення масштабу наслідків допустимого/прийняттого ризику.

Ізолювання ризику – приймаються заходи до того, щоб локалізувати наслідки ризику або забезпечити резервування для захисту від нього.

Профілактика авіаційних подій забезпечується розробкою і виконанням попереджувальних заходів на основі аналізу рівня ризику щодо виявлених небезпечних факторів (відхиленням) і їх наслідках.

Аналіз ризиків повинен проводитися планово при проведенні періодичного аналізу стану безпеки польотів і негайно при виявленні нового ризику (загрозливого фактора).

Розробка попереджувальних заходів має бути спрямована на отримання відповідних рекомендацій щодо усунення небезпечних факторів або зведенню до мінімуму вірогідності їх прояву.

При цьому повинна передбачатися:

- розробка приватних рекомендацій;
- оцінка заходів, що коригують;
- розробка інформаційного матеріалу.

Висновок

В результаті досліджень розкрита суть концепції управління безпекою польотів, яка націлена на проведення профілактичної роботи на рівні виявлення і усунення джерел небезпеки для того, щоб організувати попередження негативної події до моменту її зародження з сукупності усіх небезпечних факторів.

Показано, що важливим інструментом в рішенні цієї задачі є методика управління ризиками, яка дозволяє розробити профілактичні заходи за результатами оцінки рівня небезпеки конкретної події до того, як вона принесе серйозні негативні наслідки.

Практичне використання запропонованого алгоритму може бути реалізоване при розробці попереджувальних заходів, спрямованих на отримання відповідних рекомендацій по усуненню небезпечних факторів або зведенню до мінімуму вірогідності їх прояву.

Впровадження запропонованого алгоритму сприятиме підвищенню рівня безпеки польотів військової авіації Повітряних Сил Збройних Сил України.

Література

1. Наказ 25.11.2005 N 895 Про затвердження Положення про систему управління безпекою польотів на авіаційному транспорті С. 1–3.
2. Наказ 26.07.2012 № 528 Про затвердження Методичних рекомендацій з впровадження систем управління безпекою польотів С. 25–35.
3. Козлов В.В. Управление безопасностью полетов: что это такое? – М. 2008. С. 2–9.
4. Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП). Doc.9859.
5. 2014–2016. Глобальный план обеспечения безопасности полетов. Doc.10004.

Bibliography (transliterated)

1. Nakaz 25.11.2005 N 895 Pro zatverdzhennya Polozhennya pro sistemu upravlinnya bezpekoyu polotiv na aviatsiynomu transporti P. 1–3.
2. Nakaz 26.07.2012 # 528 Pro zatverdzhennya Metodichnih rekomendatsiy z vprovadzheniya sistem upravlinnya bezpekoyu polotiv P. 25–35.
3. Kozlov V.V. Upravlenie bezopasnostyu poletov: chto eto takoe? – M. 2008. P. 2–9.
4. Rukovodstvo po upravleniyu bezopasnostyu poletov (RUBP). Doc.9859.
5. 2014–2016. Globalnyiy plan obespecheniya bezopasnosti poletov. Doc.10004.

УДК 342.922

Борисенко В.С., Приймак А.В.

**УПРАВЛЕНИЕ ФАКТОРАМИ РИСКА
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ**

В результате исследований раскрыта суть концепции управления безопасностью полетов, которая нацелена на проведение профилактической работы на уровне выявления и устранения источников опасности для того, чтобы организовать предупреждение негативного события до момента его зарождения из совокупности всех опасных факторов.

Показано, что важным инструментом в решении этой задачи служит методика управления рисками, которая позволяет разработать профилактические мероприятия по результатам оценки уровня опасности конкретного события до того, как оно принесет серьезные негативные последствия.

Практическое использование предложенного алгоритма может быть реализовано при разработке предупредительных мероприятий, направленных на получение соответствующих рекомендаций по устранению опасных факторов или сведению к минимуму вероятности их проявления.

Внедрение предложенного алгоритма будет способствовать повышению уровня безопасности полетов военной авиации Воздушных Сил Вооруженных Сил Украины.

Boricenko V.S., Priymak A.V.

**MANAGEMENT BY RISK FOR INCREASE OF LEVEL OF SAFETY OF FLIGHTS
FACTORS**

As a result of researches essence of management conception is exposed by safety of flights, that is aimed at realization of prophylactic work at the level of exposure and removal of sources of danger in an order to organize warning of negative event to the moment of his origin from totality of all dangerous factors.

It is shown that an important instrument in the decision of this task management methodology serves as risks, that allows to work out prophylactic measures on results the estimation of level of danger of concrete event till it will bring serious negative consequences.

The practical use of the offered algorithm can be realized at development of the preventive measures sent to the receipt of corresponding recommendations on the removal of dangerous factors or taking to a minimum of probability of their display.

Introduction of the offered algorithm will assist the increase of strength of flights of air force of Aircrafts of the Armed Forces of Ukraine security.

«ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Ежеквартальный научно-практический журнал

Редколлегией к опубликованию принимаются статьи по следующим научным направлениям:

- ✓ *энергетика и энергосбережение; энерготехнология энергоемких отраслей промышленности; нетрадиционная энергетика; ресурсосбережение; энергетика и окружающая среда;*
 - ✓ *теплоиспользующие установки; моделирование процессов промышленного оборудования; процессы и аппараты различных отраслей промышленности (химической, пищевой, мед. оборудования и проч.);*
 - ✓ *применение ЭВМ в технологических процессах; автоматизированные системы управления и обработки информации;*
 - ✓ *тепло- и массообменные процессы и оборудование специальной техники; тепловые процессы и криогенное оборудование медицинского назначения;*
 - ✓ *электроэнергетика; оборудование электростанций и передача электроэнергии;*
 - ✓ *экономические аспекты энергетики и промышленной экологии; коммерческий инжиниринг, реинжиниринг и технологический менеджмент,*
- а также другим направлениям, на стыке различных отраслей знаний.*

Материалы к опубликованию в каждый последующий номер принимаются до 20 числа последнего месяца предыдущего квартала. Рукописи авторам не возвращаются.

Материал должен быть подготовлен на IBM-совместимом компьютере и распечатан в 2-х экземплярах. К материалам должен прилагаться CD-диск со статьей, набранной в редакторе текстов MS Word for Windows версий 97, XP, 2000 или 2003.

К статье необходимо приложить экспертное заключение о возможности опубликования материалов в открытой печати и рецензию доктора наук по профилю подаваемой статьи.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ:

Размер бумаги А4 (210x297 мм); левое и правое поля – 25 мм, верхнее и нижнее – 30 мм; рекомендуемый шрифт Times New Roman Суг; размер шрифта – 12; межстрочный интервал – 1.

ПОРЯДОК РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА:

- непосредственно под верхней границей слева БОЛЬШИМИ БУКВАМИ печатается УДК статьи;
- пропустив одну строку, по центру печатаются инициалы и фамилии авторов;

- пропустив одну строку, по центру полужирным шрифтом **БОЛЬШИМИ БУКВАМИ** печатается название статьи;
- пропускается одна строка и с абзаца (1,25 см) печатается основной текст, отформатированный по ширине страницы;
- перед и после формул и уравнений должно быть расстояние в одну пустую строку до текста с интервалом 1;
- формулы и уравнения должны быть выровнены по центру;
- номера формул и уравнений выровнены по правому краю;
- размер шрифта формул и уравнений для основного текста – 12 пт.;
- рисунки, схемы и графики должны быть выполнены в черно-белом изображении;
- пропустив одну строку, следует список литературы, оформленный в соответствии с требованиями ДСТУ;
- дальше размещается транслитерация списка литературы;
- в конце статьи на украинском (русском – для статьи на украинском языке), русском и английском языках должны быть напечатаны УДК, авторы, название и аннотация.

Статьи, рекомендуемые к опубликованию членами редколлегии, не проходят рецензирования. Остальные статьи рецензируются.

АДРЕС РЕДКОЛЛЕГИИ

Украина, 61002,
Харьков-2, ул. Фрунзе, 21,
НТУ «ХПИ», редколлегия журнала
«Интегрированные технологии и энергосбережение»,
секретарю редколлегии Горбунову К.А.

Тел. (057) 707-69-58.

Факс (057) 720-22-95.

Email: gor.kona2016@gmail.com

**СТАТЬИ, ОФОРМЛЕННЫЕ НЕ В СООТВЕТСТВИИ С ПРАВИЛАМИ,
РЕДКОЛЛЕГИЕЙ НЕ РАССМАТРИВАЮТСЯ**

**НА ЖУРНАЛ ОТКРЫТА ПОДПИСКА
В ПОЧТОВЫХ ОТДЕЛЕНИЯХ УКРАИНЫ**

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

4'2016

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення
та радіомовлення України: Серія КВ № 5212 від 18.06.2001 р.

Підп. до друку 19.09.2016 р. Формат 60 × 84 1/8. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 5,2. Наклад 300 прим. 1-й з-д 1–80.
Зам. № 165. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХП»,
вул. Фрунзе, 21, м. Харків-2, 61002.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.