

УДК 338.001.36:658.589

А. И. Руденко, к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-8541-9710
Е. А. Подлесная, к.х.н., доц., ORCID 0000-0003-2814-368X
А. М. Терех, к.т.н., с. н. с., ORCID 0000-0002-1320-8594
А. П. Нищик, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-1149-1928

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ИННОВАЦИОННОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ И АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

В статье рассмотрены проблемы, связанные с производством битума, являющегося одним из основных материалов для строительства, ремонта и реконструкции транспортной инфраструктуры Украины. Проанализировано современное состояние предприятий отечественной нефтеперерабатывающей промышленности и указаны причины, препятствующие увеличению объёмов производства битума и повышению его качества.

Авторами статьи дана оценка состояния технологического оборудования нефтеперерабатывающих и асфальтобетонных заводов и предложен один из вариантов решения существующих проблем, в основе которого лежит модернизация имеющегося на этих заводах оборудования. Суть модернизации заключается в применении новых нагревательных устройств – двухфазных термосифонов, позволяющих повысить коэффициент полезного действия битумоплавильных установок и обеспечить требуемый температурный режим нагрева битума в технологическом процессе его производства. Такой подход позволит повысить качество получаемого битума для производства асфальтобетонных смесей, применяемых как в дорожном строительстве, так и в других отраслях промышленности, а также улучшить технико-экономические показатели оборудования после предлагаемой его модернизации.

Показаны преимущества предложенного технического решения и обоснована его актуальность для решения указанных проблем в условиях острого дефицита денежных средств.

Ключевые слова: битум, модернизация, инновационное оборудование, двухфазные термосифоны, плоскоовальные трубы.

Введение

Битум, как связующий и гидроизоляционный материал, обладающий высокими адгезионными и антикоррозионными свойствами, находит широкое применение во многих отраслях промышленности и, в частности, в дорожном строительстве.

В настоящее время в Украине ощущается острая нехватка этого материала, которая компенсируется импортными поставками, что ежегодно обходится экономике нашей страны в 1,5 млрд. гривен [1], несмотря на то, что в Украине имеется шесть крупных нефтеперерабатывающих заводов (НПЗ), суммарная производственная мощность которых по первичной переработке нефти в 1997 году составляла 52,5 млн. тонн/год [2]. Как следует из данных [3], этих мощностей вполне было бы достаточно, чтобы решить проблему производства не только различных нефтепродуктов, но и битума.

К сожалению, несмотря на впечатляющую мощность отечественного нефтеперерабатывающего комплекса, основные фонды половины украинских НПЗ, сооружённых ещё в довоенное время [2, 4], даже, несмотря на их реконструкцию, к настоящему моменту времени имеют износ порядка 40% [5]. А вывод из эксплуатации Херсонского, остановка Одесского и потеря Лисичанского НПЗ [3, 4], привели к тому, что суммарная производственная мощность украинских НПЗ значительно уменьшилась.

Также необходимо отметить, что несовершенство технологических схем на отечественных НПЗ не позволяют повысить глубину переработки нефти, уровень которой не превышает 74 % [4], в то время как в Западной Европе она составляет в среднем 80%, а в США - более 90% [2].

Ко всем вышеуказанным проблемам можно добавить сложности перехода страны к рыночной экономике и связанные с ними изменения в налоговой политике, отсутствие необходимого количества отечественного сырья и импорт зарубежного, а также нестабильность цен на нефть. Все эти факторы способствовали тому, что загрузка производственных мощностей украинских НПЗ значительно сократилась (рис.1).

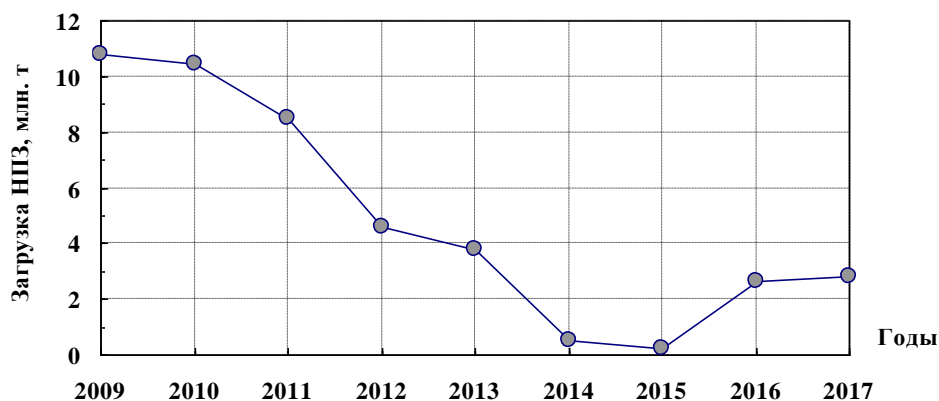


Рисунок 1 – Загрузка производственных мощностей НПЗ [4, 6-10]

На рис. 1 отсутствуют данные по временно оккупированной автономной республике Крым, городу Севастополь и части зоны проведения антитеррористической операции на Донбасе. Для 2015 года данные представлены только за период с января по июнь.

Существующее положение

К настоящему времени из всех украинских предприятий, занимавшихся переработкой нефти, газового конденсата и др. видов нефтяного сырья, работают только Кременчугский НПЗ («Укртатнафта»), Шебелинский газоперерабатывающий завод («Укргаздобыча») и нефтехимический завод «Карпатнафтохим» (г. Калуш), пуск которого после пятилетнего простоя состоялся в 2017 г. [10]. Причём, ни одно из указанных предприятий не загружено на полную мощность.

Очевидно, что все вышеуказанные проблемы способствовали уменьшению объёмов переработки нефти и сокращению ассортимента выпускаемой продукции. Данные, опубликованные в «Повідомленнях Державної служби статистики України» за 2009-2015, а также представленные в [9, 10], показывают, что за последние годы большая часть переработанной нефти приходилась, в основном, на производство энергоносителей (бензин и дизельное топливо и др.), а доля битумов была во много раз меньше (рис.2).

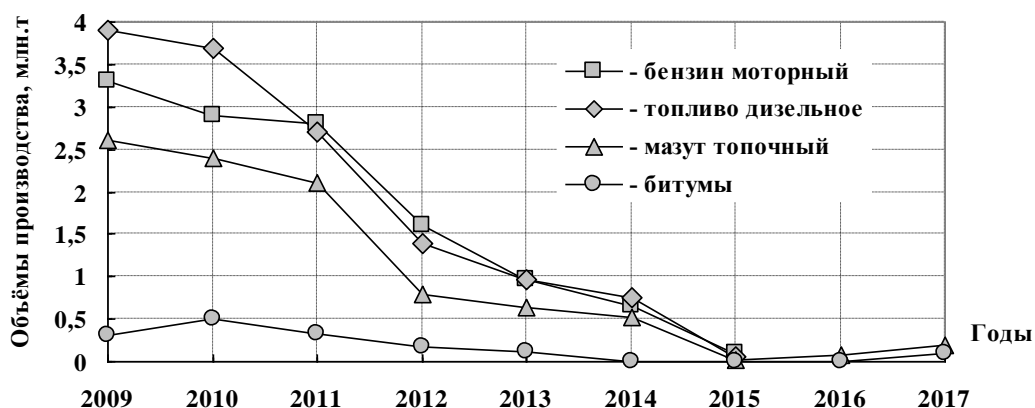


Рисунок 2 – Структура производства некоторых продуктов нефтепереработки украинскими НПЗ за период с 2009 по 2017 г.г.

На рис. 2 отсутствуют данные по временно оккупированной территории автономной республики Крым, городу Севастополь и части зоны проведения антитеррористической операции на Донбасе. Для 2015 года данные представлены только за период с января по июнь. Данные по бензину, моторному и дизельному топливу для 2015-2017 г.г. изъяты из открытого доступа в связи с военными действиями в зоне АТО.

Постановка задачи исследования

Так как страна ежегодно теряет 4 % ВВП или около 50 млрд. гривен только из-за неудовлетворительного состояния дорог [11], становится очевидным, что потребность в битуме для

развития, реконструкции и ремонта транспортной инфраструктуры Украины (дорог, магистралей, аэродромов и др.) очень высока. Причём в основном требуется битум высокого качества.

Однако существующее оборудование (подогреватели, битумоплавильные агрегаты), которое применяется на НПЗ и на предприятиях-потребителях их продукции (асфальтобетонные заводы), обладает рядом недостатков (к.п.д., не превышающий 50-60 %, большая металлоёмкость и громоздкость) и не позволяет строго выдерживать требуемый температурно-временной режим технологического процесса [12]. Такое положение является основной причиной низких показателей продуктивности оборудования и качества получаемого битума.

Для устранения причин, препятствующих увеличению объёмов производства битума с необходимыми физико-химическими характеристиками, требуется, по нашему мнению, **модернизация существующего оборудования** на НПЗ и асфальтобетонных заводах, направленная, в том числе, и на его совершенствование для создания оптимальных тепловых режимов технологических процессов.

Такой подход к решению указанных проблем потребует значительно меньших капиталовложений в условиях острого дефицита денежных средств, в отличие от полной замены устаревшего, но ещё пригодного для работы оборудования.

Решение поставленной задачи

Примером реализации предлагаемых решений является внедрение в технологический процесс подготовки битумов для производства асфальтобетонных смесей инновационного энергосберегающего оборудования с применением новых нагревательных элементов - двухфазных термосифонов (ДТС) [13]. Указанные устройства (рис. 3) представляют собой герметичные конструкции, частично заполненные теплоносителем и работающие по замкнутому испарительно-конденсационному циклу.

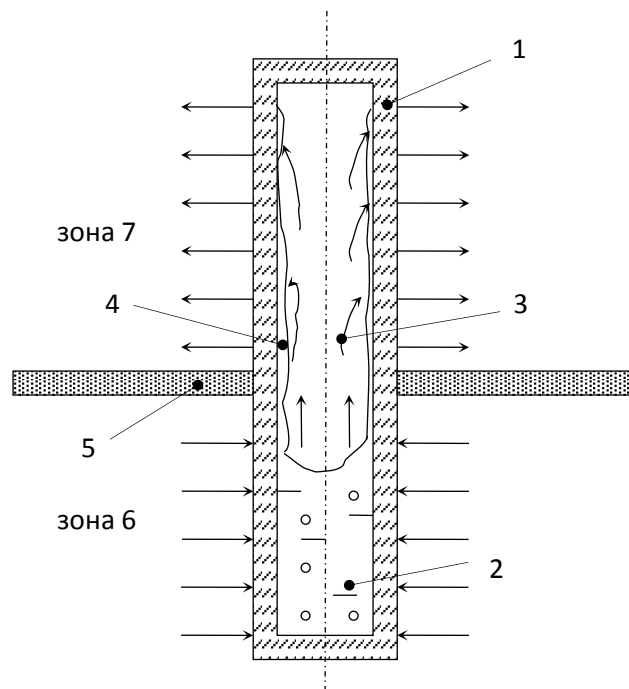


Рисунок 3 – Принципиальная схема ДТС: 1- корпус; 2- теплоноситель; 3- паровой поток; 4- плёнка стекающего конденсата; 5- разделяющая стенка

Под разделяющей стенкой 5 находится зона 6, в которой создаётся тепловой поток, подводимый к стенке корпуса 1 ДТС любым из доступных энергоносителей, например, сжигание твердого, жидкого или газообразного топлива, электрический нагрев. Над разделяющей стенкой 5 находится зона 7, в которой размещают нагреваемый продукт (например, битум).

В качестве теплоносителей ДТС могут применяться различные жидкости (например, вода, фреоны и др.), теплофизические свойства которых, в диапазоне рабочих температур технологического процесса, обеспечивают наиболее приемлемые теплотехнические характеристики ДТС. Основным достоинством ДТС при использовании их в качестве нагревательных элементов, является способность передавать большие тепловые потоки при минимальном перепаде температур между зонами подвода и отвода теплоты, создавая при этом изотермические условия для нагреваемого продукта в зоне теплоотвода.

Учитывая, что физико-химические характеристики битумов зависят от влагосодержания, времени температурного воздействия на битум [14] и температуры, поддержание последнего параметра имеет наиболее важное значение. Особенно это касается участка вторичного нагрева, в котором температура битума повышается от 90-100 °С (температура выхода из хранилища) до 150-160 °С (рабочая температура в битумоплавильном котле). Такое положение объясняется тем, что при температурах выше 160 °С происходит разложение битума с выделением твёрдых частиц (асфальтенов), отлагающихся на теплоотдающей поверхности нагревательного элемента. Это вызывает ухудшение теплоотдачи к битуму, перегрев стенок нагревательных элементов и неравномерность прогрева нижних и верхних слоёв, что в свою очередь способствует возникновению перепада температуры в слое битума, нарушению структуры и ухудшению его физико-химических характеристик.

Преимущество ДТС для подогрева битумов позволяет поддерживать равномерное температурное поле по всей длине стекающего слоя битума в отличие от существующих битумоплавильных установок с жаровыми трубами (например, в Д-506, Д-617). Как следует из [12], в указанных установках перепады температуры вдоль стенки могут достигать 100 °С и более.

На рис. 4 показан один из вариантов установки ДТС в рабочем пространстве битумного котла для вторичного подогрева битума. Его особенностью является применение в качестве корпусов ДТС труб плоскоовальной формы (рис. 5). Выбор таких труб обусловлен тем, что результаты многочисленных исследований [15-20] показали, что теплопередающие элементы, созданные из труб плоскоовального профиля обладают более высокой теплоаэродинамической эффективностью по сравнению с применяемыми в аналогичных устройствах трубами традиционно круглой формы. Кроме этого, плоскоовальная форма ДТС позволяет более компактно разместить их в рабочем пространстве подогревателя и, соответственно, уменьшить его габаритные размеры по сравнению с подогревателем с ДТС из труб круглого сечения [12] при одинаковой тепловой мощности обеих установок. А использование углеродистых (или нержавеющей) сталей в серийно изготавливаемых в настоящее время плоскоовальных трубах, также будет способствовать уменьшению стоимости ДТС и, соответственно, производственных затрат на модернизацию существующих битумоплавильных установок.

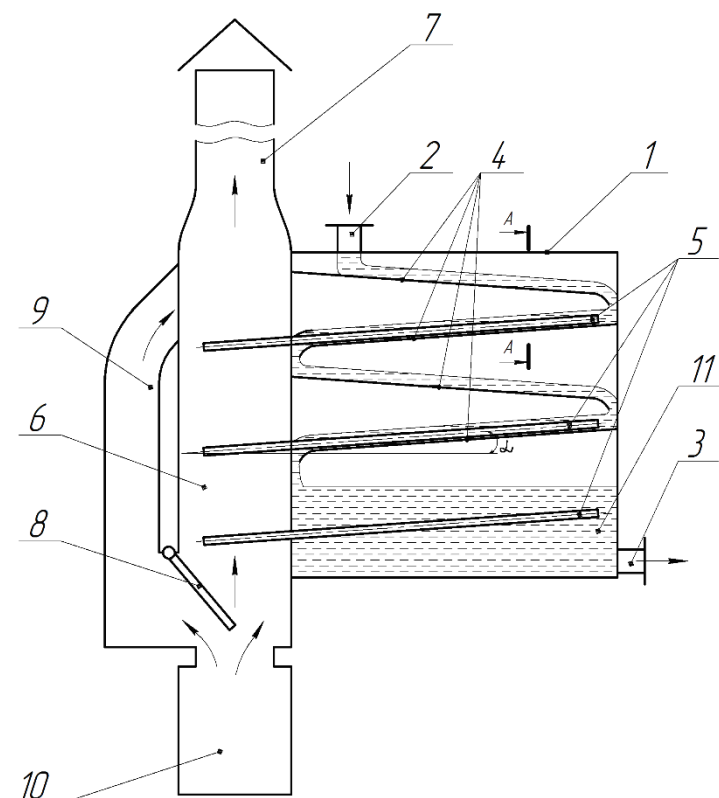


Рисунок 4 – Схема расположения ДТС в рабочем пространстве битумного котла:
 1 - корпус котла; 2 - вход битума из хранилища; 3 - выход готового битума;
 4 - направляющие лотки; 5 - ДТС; 6 - газоход; 7- выход уходящих газов;
 8 - регулирующая заслонка; 9 - байпасная линия для уходящих газов; 10 - топка



Рис. 5. Плоскоовальные трубы с различными геометрическими размерами

Многолетний опыт практического применения ДТС в качестве теплопередающих элементов для различного теплообменного оборудования показывает, что предлагаемое решение [21] имеет ряд преимуществ перед известными устройствами для нагрева битума и других вязких продуктов (жаровыми трубами, электрическими нагревателями и др.), основными из которых являются:

- равномерный нагрев и поддержание требуемой температуры битума в течение всего времени его нахождения в рабочем пространстве котла;
- безопасность и надёжность в эксплуатации.

Выводы

Простота конструкции ДТС и их монтажа на самом различном теплообменном оборудовании (например, при помощи фланцевых или сварных соединений) дают возможность осуществлять постепенную модернизацию существующих битумоплавильных установок при проведении ремонтных работ без существенных изменений их конструкции.

Такой подход к решению проблемы будет способствовать получению битума с необходимыми физико-химическими характеристиками, экономии топлива и, соответственно, улучшению технико-экономических показателей оборудования для производства битума, применяемого в настоящее время на НПЗ и асфальтобетонных заводах.

Список использованной литературы

1. В Украине могут начать производство битума - эксперт. <https://golos.ua/i/171680>.
2. Нефтяная и нефтеперерабатывающая промышленность Украины: современное состояние, основные проблемы и перспективы развития. orbook.ru/index-6444.htm.
3. Пациент скорее мертв: у украинских НПЗ перспектив нет. <http://forbes.net.ua/opinions/1409918-pacient-skoree-mertv-u-ukrainskih-npz-perspektiv-net>.
4. Нефтеперерабатывающие заводы Украины – мощности, работа, собственники. <http://zet.in.ua/statistika-2/infrastruktura/neftepererabatyvayushhie-zavody-ukrainy-moshnosti-rabota-sobstvenniki/>.
5. Нефть и нефтепереработка. Часть 1. http://pavlyuk.ucoz.ua/index/neft_i_neftepererabotkach/0-16.
6. Украинская нефтепереработка: ниже некуда. https://lb.ua/economics/2013/03/27/194249_ukrainskaya_neftepererabotka_nizhe.html.
7. Украина за год сократила первичную переработку нефти на 20%. <https://economics.unian.net/energetics/873539-ukraina-za-god-sokratila-pervichnyu-pererabotku-nefti-na-20.html>.
8. Переработка нефти в Украине выросла на 6,3%. enkor.com.ua/a/news/Pererabotka_nefti_v_Ukraine_viroslo_na_63/230937.

9. Объемы прокачки нефти украинской нефтетранспортной... - UBR. <https://ubr.ua> › Рынки › Промышленность.
10. Україна у 2017 році експортувала вдвічі більше продуктів нафтопереробки. <https://mind.ua/news/20180954-ukrayina-u-2017-goci-eksportovala-vdvichi-bilshe-produktiv-naftererobki>.
11. Азаров наладит производство битума в Украине. <http://for-ua.com/article/564156>.
12. Климкин Е. В. Исследование гидродинамики и теплообмена в пучке бесфитильных тепловых труб при их продольном обтекании ламинарным потоком битума: автореф. дис... канд. техн. наук : 05.14.04. Киев, 1975. 20 с.
13. Васильев Л. Л., Конев С. В. Теплопередающие трубки. Минск: Наука и техника, 1972. 151 с.
14. Руденская И. М. Нефтяные битумы. Москва: Росвузиздат, 1963. 41 с.
15. Письменный Е. Н., Кондратюк В. А., Жукова Ю. В., Терех А. М., Конвективный теплообмен поперечно-омываемых шахматных пакетов плоско-овальных труб. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2011. №2/8 (50). С. 4-8.
16. Письменный С. М., Кондратюк В. А., Терех О. М., Руденко О. І. Теплова ефективність шахових пакетів труб різного профілю. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2012. №5/8 (59). С. 40-42.
17. Кондратюк В. А., Терех А. М., Руденко А. И., Гайдаренко В. С. Теплообмен и аэродинамическое сопротивление малорядных пакетов плоскоовальных труб. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2014. Ч.1. № 5(24). С. 75-79.
18. Кондратюк В. А., Терех О. М., Баранюк О. В., Письменный С. М., Теплообмін шахових пакетів плоскоовальних труб в поперечному потоці. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. №1/8 (73). С. 43-48.
19. Письменный С. М., Кондратюк В. А., Терех О. М., Руденко О. І., Баранюк О. В. Аналіз експериментальних даних з аеродинамічного опору пакетів плоскоовальних труб. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2015. №6/8 (78). С. 19-24.
20. Kondratyuk V., Terekh A., Rogachev V., Baranyuk A., Rudenko A. Analysis and generalization of the experimental data on heat transfer in the staggered bundles of the flat-oval tubes. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2017. Vol. 18. No 3. P. 189-202.
21. Пристрій для нагрівання і термообробки в'язкого матеріалу: пат. UA 120616 U Україна. МПК E01C 19/08 (2006.01). № u201705146; заявл. 26.05.2017; опубл. 10.11. 2017, Бюл. № 21. 4 с.

A. Rudenko, Ph.D, associate professor, **ORCID** 0000-0002-8541-9710
E. Pidlisna, Ph.D, associate professor, **ORCID** 0000-0003-2814-368X
A. Terekh, Ph.D., senior Researcher, **ORCID** 0000-0002-1320-8594
A. Nishchik, Ph.D., senior Researcher, **ORCID** 0000-0003-1149-1928
National technical university of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

INNOVATIVE EQUIPMENT FOR OIL-REFINING AND ASPHALT-CONCRETE ENTERPRISES

The article deals with the problems associated with the production of bitumen, which is one of the main materials for the construction, repair and reconstruction of the transport infrastructure of Ukraine. The current state of the enterprises of the domestic oil refining industry has been analyzed and the reasons that prevent the increase in the volume of bitumen production and improve its quality are indicated.

The authors of the article gave an assessment of the state of the technological equipment of oil refineries and asphalt plants and proposed one of the solutions to the existing problems, which is based on the modernization of existing equipment at these plants. The essence of modernization consists in the use of new heating devices - two-phase thermosyphons, which increase the efficiency of bitumen-smelting units and provide the required temperature regime of bitumen heating in the technological process of its production. This approach will improve the quality of bitumen produced for the production of asphalt mixtures used in road construction and in other industries, as well as improve the technical and economic performance of equipment after its proposed modernization.

The advantages of the proposed technical solution are shown and its relevance is proved to solve these problems in conditions of acute shortage of funds.

Keywords: bitumen, modernization, innovative equipment, biphasе thermosyphons, flat-oval tubes.

1. In Ukraine, can begin production of bitumen - an expert. <https://golos.ua/i/171680>.
2. Oil and oil refining industry in Ukraine: current status, main problems and development prospects. <http://orbook.ru/index-6444.htm>.
3. The patient is rather dead: the Ukrainian oil-processing plants have no prospects. <http://forbes.net.ua/opinions/1409918-pacient-skoree-mertv-u-ukrainskih-npz-perspektiv-net>.
4. Oil-processing plants in Ukraine - power, work, owners. <http://zet.in.ua/statistika-2/infrastruktura/neftepererabatyvayushhie-zavody-ukrainy-moshhnosti-rabota-sobstvenniki/>.
5. Oil and oil-processing. Part 1. http://pavlyuk.ucoz.ua/index/neft_i_neftepererabotkach/0-16.
6. Ukrainian oil refining: below nowhere. https://lb.ua/economics/2013/03/27/194249_ukrainskaya_neftepererabotka_nizhe.html.
7. Ukraine for the year reduced primary processing of oil by 20%. <https://economics.unian.net/energetics/873539-ukraina-za-god-sokratila-pervichnuyu-pererabotku-nefti-na-20.html>.
8. Oil refining in Ukraine increased by 6.3%. enkor.com.ua/a/news/Pererabotka_nefti_v_Ukraine_virosla_na_63/230937.
9. The volumes of oil pumping of the Ukrainian oil transportation... - UBR. <https://ubr.ua> > Rynky > Promyshlennost.
10. Ukraine in 2017 exported twice as many oil-processing products. <https://mind.ua/news/20180954-ukrayina-u-2017-roci-eksportovala-vdvichi-bilshe-produktiv-naftopererobki/>
11. Azarov will adjust the production of bitumen in Ukraine. <http://for-ua.com/article/564156>.
12. Klimkin E. V. Investigation of hydrodynamics and heat transfer in a bundle of heat pipes without wick with their longitudinal flow past laminar flow of bitumen: abstract of thesis Ph.D. dissertation: "KPI", Kyiv, Ukraine, 1975. 20 c.
13. Vasil'ev L. L., Konev S. V. Heat pipes. Minsk USSR: Nauka i tekhnika, 1972. 151 p.
14. Rudenskaia I. M. Oil bitumens. Moscow, USSR: Rosvuzizdat, 1963. 41 p.
15. Pis'menyi E. N., Kondratyuk V. A., Zhukova Y. V., & Terekh A. M. Heat transfer of staggered bundles of flat-oval tubes in cross flow. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2011. No 2/8 (50). P. 4-8.
16. Pysmennyi E. N., Kondratyuk V. A., Terekh A. M., Rudenko A. I. Heat efficiency of staggered bundles with different forms of tubes. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2012. No 5/8(59). C. 40-42.
17. Kondratyuk V. A., Terekh A. M., Rudenko A. I., Gajdarenko V. S. Heat transfer and aerodynamic drag of few rows banks of flat-oval tubes. *International research journal*. 2014. V. 1. No 5(24). P. 75-79.
18. Kondratyuk V. A., Terekh A. M., Baranyuk A. V., Pis'mennyi E. N. Heat transfer of staggered bundles of flat oval tube in transversal flow. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. 1/8 (73). P. 43-48. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.37318.
19. Pis'mennyi E. N., Kondratyuk V. A., Terekh A. M., Rudenko A. I., Baranyuk A. V. Analysis of experimental data of aerodynamic drag for flat-oval tube bundles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. No 6/8 (78). P. 19-24. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.55529
20. Kondratyuk V., Terekh A., Rogachev V., Baranyuk A., Rudenko A. Analysis and generalization of the experimental data on heat transfer in the staggered bundles of the flat-oval tubes. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2017. Vol. 18. No 3. P. 189-202.
21. Nishchik A. P., Rudenko A. I., Terekh A. M., Pidlisna O. A., Rogachev V. A. Device for heating and heat treatment of viscous material. UA Patent 120616, Ukraine, november 10, 2017.

УДК 338.001.36:658.589

А. І. Руденко, к.т.н., доц., ORCID 0000-0002-8541-9710
О. А. Підлісна, к.х.н., доц., ORCID 0000-0003-2814-368X
О. М. Терех, к.т.н., с. н. с., ORCID 0000-0002-1320-8594
О. П. Ніщик, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-1149-1928
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»

ІННОВАЦІЙНЕ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ НАФТОПЕРЕРОБНИХ ТА АСФАЛЬТОБЕТОННИХ ПІДПРИЄМСТВ

У статті розглянуті проблеми, пов'язані з виробництвом бітуму, який є одним з основних матеріалів для будівництва, ремонту та реконструкції транспортної інфраструктури України.

Проаналізовано сучасний стан підприємств вітчизняної нафтопереробної промисловості і вказані причини, що перешкоджають збільшенню обсягів виробництва бітуму та підвищенню його якості.

Авторами статті дано оцінку стану технологічного устаткування нафтопереробних і асфальтобетонних заводів і запропонований один з варіантів вирішення існуючих проблем, в основі якого лежить модернізація наявного на цих заводах обладнання. Суть модернізації полягає в застосуванні нових нагрівальних пристроїв - двофазних термосифонів, які дозволяють підвищити коефіцієнт корисної дії бітумоплавильних установок і забезпечити необхідний температурний режим нагріву бітуму в технологічному процесі його виробництва. Такий підхід дозволить підвищити якість одержуваного бітуму для виробництва асфальтобетонних сумішей, які застосовуються як в дорожньому будівництві, так і в інших галузях промисловості, а також поліпшити техніко-економічні показники обладнання після запропонованої його модернізації.

Показано переваги запропонованого технічного рішення і обґрунтована його актуальність для вирішення зазначених проблем в умовах гострого дефіциту коштів.

Ключові слова: бітум, модернізація, інноваційне устаткування, двофазні термосифони, плоскоовальні труби.

Надійшла 27.12.2018

Received 27.12.2018

УДК 532.542

А.А. Баскова, аспірант, ORCID 0000-0003-2864-8995
Г.А. Воропаєв, д-р. физ. мат. наук, проф., ORCID 0000-0001-5615-6344
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ГОФРИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА СТРУКТУРУ ТЕЧЕНИЯ И ИНТЕНСИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБЕ

Проведено численне моделювання теплових і гідродинамічних процесів в трубах з гофрованими вставками різних геометричних параметрів. На основі двох введених безрозмірних параметрів: довжини хвилі $k_1=l/R$ і амплітуди гофрованої поверхності $k_3=2a/R$ виконаний аналіз структури вихревого течення в трубі і теплообміну на її поверхні. Показана взаємозв'язь цих параметрів з визначаючим числом Рейнольдса Re_d і довжиною початкового участка труби. Визначено необхідне кількість волн в залежності від їх довжини для утворення автомобільного режиму течення. Знайдено значення параметрів k_1, k_3 в залежності від числа Re_d , при яких значення перепаду тиску в гофрованої трубі мінімально перевищує значення перепаду тиску в гладкій трубі, а теплообмін максимален по порівнянню з гладкою трубою. Отримані значення перепаду тиску в трубі з гофрованої вставкою не перевищують значення в гладкій трубі більше, ніж на 4 %, що дозволяє визначати енергоефективність труб з незагромождаючим гофром тільки по значенням чисел Нуссельта.

Ключевые слова: течение в трубе, интенсификация теплоотдачи, гидравлическое сопротивление, структура течения, завихренность потока, незагромождающий гофр.

Вступлення

Гофрування – один из наиболее распространенных методов структурирования теплообменных поверхностей, нашедший широкое применение при разработке новых и реконструкции уже существующих теплообменных аппаратов в энергетике и промышленности. Эффективность данного метода интенсификации теплообмена определяется прежде всего геометрией развитой поверхности. Правильный подбор геометрических параметров гофрувания позволяет не только увеличить