

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-94-101

Коленчуков О.А., Петровский Э.А.Сибирский федеральный университет***E-mail: okolenchukov@sfu-kras.ru*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ТЕРМОКОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИНТЕНСИФИКАТОРОВ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Аннотация. Развитие научно-технического прогресса последних десятилетий привело к увеличению потребления природных энергоносителей, что, в свою очередь, сказывается на месторождениях полезных ископаемых – они истощаются. С целью снижения потребления энергоресурсов актуальным является вопрос энергосбережения. Одним из способов решения данной задачи является проведение исследований в области повышения эффективности энерготехнологического оборудования с последующей разработкой универсальной технологии и оборудования интенсификации теплообменных процессов. В данной статье представлены наиболее применяемые в настоящее время способы интенсификации теплообменных процессов, их преимущества и недостатки, определен наиболее перспективный способ. Описана технология формирования термоконтантной (дискретно-шероховатой) поверхности на металлическом листе, определены выражения для определения усилия, необходимого для изготовления данной поверхности при различных условиях. Представлена методика экспериментальных исследований и инструмент для изготовления термоконтантной поверхности. В результате экспериментальных исследований установлено, что в зависимости от условий формирования термоконтантной поверхности аналитическое решение отличается от экспериментальных значений на 5,3–13,4 %. Другим важным фактором, влияющим на формообразование, является скорость подачи металлического листа, оптимальное значение которого составляет 1000–2000 мм/мин.

Ключевые слова: энергосберегающие технологии, термоконтантная поверхность, интенсификация теплообмена, энерготехнологическое оборудование, повышение эффективности.

Введение. Последнее время современное общество ведет огромную добычу и использование невозобновляемых ресурсов, что ведет к глобальному кризису мировых запасов топлива и значительному ухудшению экологической обстановки. В связи с сложившейся ситуацией мировому сообществу необходимо уделить особое внимание разработкам и исследованиям в области энергосбережения. Так, правительством РФ был принят Федеральный закон от 21.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности» во исполнение которого необходима разработка программ, нацеленных на повышение энергетической эффективности и энергосбережения [1]. Разрабатываемые программы затрагивают все сферы народного хозяйства. Особое внимание уделяется предприятиям топливно-энергетического комплекса, а именно нефтехимического, который является одним из наиболее энергоемких.

Энергосбережение представляет собой совокупность мер, целью которых является повышение эффективности использования энергии и сырья на предприятии для производства как того же ассортимента продукции, так и нового [2]. Только полный анализ промышленного энергопотребления, степени полезного использования

энергии и ее потерь на том или ином технологическом участке, определение наиболее эффективных способов снижения энергоресурсов для конкретного предприятия может привести к достижению положительных результатов в данном вопросе [3].

В настоящее время одним из способов повышения экономичности энерготехнологических установок является модернизация теплообменного оборудования за счет внедрения эффективных методов интенсификации теплообмена. Интенсификация теплообмена характеризуется увеличением количества тепла, передаваемым через единицу теплообменной поверхности, а также уменьшением массогабаритных показателей теплообменного аппарата. От технического качества интенсифицированного теплообменника на прямую зависят характеристики энерготехнологических установок.

Существует множество способов интенсификации теплообмена. Классифицируют их, как правило, на две категории [4–6]:

1. Активные методы подразумевают под собой механическое воздействие на поверхность теплообмена (вращение, вибрации поверхности, перемешивание среды); использование разного вида поля, таких как электрическое, магнитное или акустическое, с целью воздействия на поток

пульсациями давления; вдув или отсасывание рабочей среды через пористую поверхность.

2. Пассивные методы представляют собой воздействие типа теплообменной поверхности на поток (винтовые, локальные, пластинчатые интенсификаторы, оребрение и и др.).

Наиболее сложными в реализации являются активные методы интенсификации. Также их применение ограничено на практике из-за особенностей конкретного технологического процесса или конструкции производственного оборудования. Несмотря на это, данные методы имеют большой потенциал и активно изучаются многими исследователями [7–11].

Конвективный теплообмен интенсифицируют, как правило, с помощью пассивных методов интенсификации, которые, в свою очередь, можно разделить на две группы:

1. Методы, придающие жидкостному потоку вращательно-поступательные движения с помощью ленточных, шнековых и пластинчатых завихрителей.

2. Методы, разрушающие пристенные слои жидкости за счет искусственной шероховатости в виде различного типа накаток на внутренней стенке труб, проволочных спиралей и др.

Пассивные методы интенсификации теплообмена широко используются в нефтехимической промышленности. Очевидно, что выбор конкретного варианта осуществления способа интенсификации будет зависеть от решаемой задачи, особенностей оборудования, его расположения на площадке и взаимосвязи с другими элементами химической установки.

В работе [12] проведено сравнение энергетической эффективности различных методов интенсификации теплообмена. По результатам исследований ясно, что самыми эффективными методами интенсификации являются методы, которые основаны на использовании дискретно-шероховатых поверхностей (термоконтактных поверхностей). В связи с этим создание универсальных технологий для изготовления теплообменных устройств-интенсификаторов является актуальной практической задачей.

Целью данной статьи является исследование этапа формирования термоконтактных поверхностей комбинированных теплообменных элементов с помощью разработанного технологического инструмента.

Описание технологии формирования термоконтактной поверхности. Известна технология изготовления комбинированного теплообменного элемента [13], одним из этапов которого является формирование термоконтактной по-

верхности на листовом материале, осуществляемое за счет поверхностно-пластического деформирования листового материала.

Формирование термоконтактной поверхности осуществляется с помощью профильного инструмента, представленного на рисунке 1. В упрощенном виде данный инструмент состоит из секционного барабана 1, установленного на валу, профильных плашек 2, расположенных внутри секций барабана 1, П-образной державки с перекладиной 3 и вала, расположенного в перекладине П-образной державки 4, служащего для передачи силового воздействия на профильный инструмент. Принцип работы данного профильного инструмента заключается в следующем (рисунок 1). Силовое воздействие через вал 4 равномерно передается на вал, на котором расположен секционный барабан 1, который, в свою очередь, передает силовое воздействие на профильные плашки 2, в результате чего осуществляется внедрение профильных плашек 2 в листовую металл 5. Металлический лист при этом расположен на упругом основании 6, которое, в свою очередь, расположено в лотке 7, расположенный на столе станка. Вместе с силовым воздействием на профильный инструмент также происходит движение стола с лотком 7 с упругим основанием 6 и металлическим листом 5, ввиду чего происходит формирование термоконтактной поверхности.

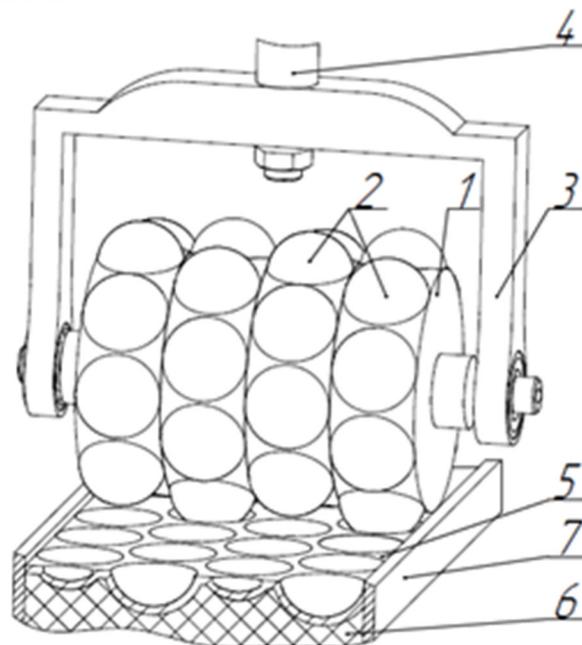


Рис. 1. Инструмент для образования термоконтактной поверхности

С целью определения силового воздействия, необходимого для формообразования термоконтактной поверхности, рассмотрим металлический лист под действием одиночной профильной плашки с полусферическим выступом (рисунок

2). Контакт полусферического выступа с металлическим листом происходит с образованием плоско – напряженного состояния.

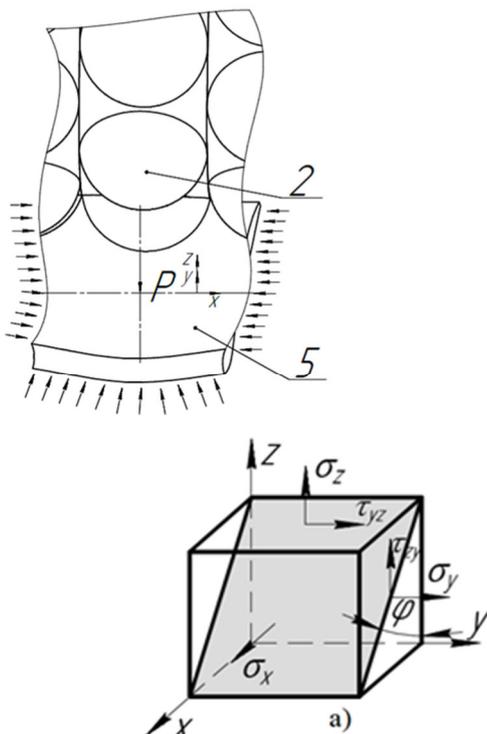


Рис. 3. Материальная частица под действием сил: а – расположение наклонной площадки на частице в виде параллелепипеда, б – разрез материальной частицы

Принимая во внимание совпадение вектора напряжения S с направлением нормали N на наклонной площадке (рисунок 3, а), можно сделать вывод, что возникающее касательное напряжение примет значение, равное 0. Вместе с тем направление нормали станет главным направлением, а напряжение S станет равным σ_n [14]. Исходя из всего выше сказанного, можно найти главные нормальные напряжения (σ_1 и σ_3) и среднее напряжение:

$$\begin{cases} \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + 4\tau_{xz}^2}, \\ \sigma_{cp} = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{3}. \end{cases} \quad (2)$$

Учитывая условие неразрывности, равенство $\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$, а также взаимосвязь между деформациями и напряжениями ($\epsilon_y = 0$) получим следующее выражение:

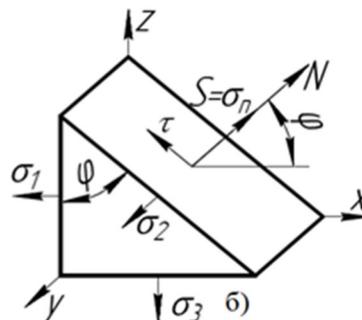
$$\sigma_y = \sigma_{cp} = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = const. \quad (3)$$

Находя решение данного выражения через σ_y имеем следующее:

Рис. 2. Образование плоско–напряженного состояния при воздействии единичного профильного инструмента

Рассматривая материальную частицу тела с напряжениями, представленными на рисунке 3, а-б. При $\sigma_y = 0$ и $\tau_{xy} = \tau_{yz} = 0$ ось y главной, на основании этого получаем следующие выражения в главных нормальном и касательном напряжении:

$$\begin{cases} \sigma_n = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} + \cos 2\varphi \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2}, \\ \tau = \pm \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\varphi. \end{cases} \quad (1)$$



$$\sigma_y = \frac{(\sigma_x + \sigma_z)}{2}. \quad (4)$$

Следовательно, при равенстве нулю деформации по той или иной оси напряжение вдоль выбранной оси будет равно полусумме двух других возникающих напряжений. В этом случае ось y будет являться главной, а касательные напряжения τ_{xy} и τ_{yz} равны 0 [14].

Ввиду того, что напряженное состояние в различных точках тела не зависит от координаты y , наклонную площадку тетраэдра можно заменить площадкой параллельной оси y . Вследствие этого процесс формирования термоконтактной поверхности можно рассматривать как «плоскую» задачу, что значительно упрощает расчёты.

При этом главное нормальное напряжение σ_2 можно определить следующим образом:

$$\sigma_2 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2}. \quad (5)$$

Определить усилие, необходимое для формирования термоконтактной поверхности, можно с помощью следующего выражения:

$$P = \sigma_B F k_{cm}, \quad (6)$$

где σ_B – предел прочности листового металла, МПа; F – площадь, образуемая при контакте формообразующего инструмента с листовым материалом, мм²; $k_{см}$ – понижающий коэффициент, учитывающий наличие смазочного материала, безразмерная величина.

Для расчет минимально усилия формообразования, а также прогиба части металлического

$$\Delta\Delta\omega = \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2}{d\theta^2} \right) \left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} + \frac{1}{r^2} \frac{d^2}{d\theta^2} \right) \omega = \frac{q}{D}, \quad (7)$$

где ω – прогиб пластины, мм; θ, r – полярные координаты участка пластины; q – действующая поперечная нагрузка, Н/мм²; D – цилиндрическая жесткость.

Решая уравнение (7) при условии действия сосредоточенной силы P , получим:

$$\omega = \frac{Pa^2}{16\pi D} (1 - \beta^2)^2, \quad (8)$$

где P – сосредоточенная сила, Н; $\beta = b/a$ отношение, учитывающее расстояние b от центра участка формообразования до точки приложения сосредоточенной силы и расстояние a от центра пластины до опорных краев (рисунок 4).

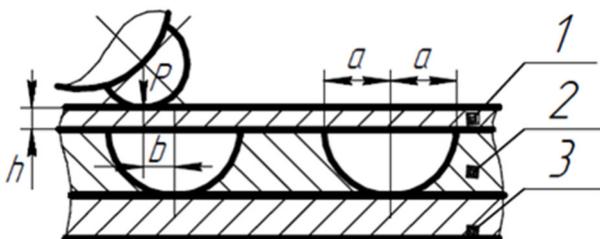


Рис. 4. Оснастка для образования термоконтактной поверхности с параметрами, определяющими силовое воздействие:
1 – металлический лист, 2 – матрица, 3 – опорный стол

Выражение (6) целесообразно использовать для определения усилия образования термоконтактной поверхности при контролируемом формообразовании, т.е. когда пространство за выступом листа ограничено какой-либо опорой. В случае отсутствия опоры постоянно возникающее усилие приведет к разрушению материала листа. С помощью выражения (8) возможно определить минимальное усилие при неконтролируемом образовании термоконтактной поверхности, т.е. выдавливание в неограниченное пространство.

Экспериментальный стенд и методика экспериментальных исследований. Целью экспериментальных исследований являлось определение усилия, необходимого для образования термоконтактной поверхности, и проверка полученных значений с представленными ранее математическими выражениями.

листа можно предположить, что возникает несимметричный изгиб ввиду того, что профильная плашка в различный момент времени изменяет свое положение при формообразовании, т.е. имеет место динамический процесс. Уравнение равновесия элемента листа при несимметричном изгибе примет следующий вид [15]:

Для достижения поставленной цели был разработан экспериментальный инструмент, натурное исполнение которого представлено на рисунке 5. Разработанный инструмент состоит из металлической трубки 1, расположенными друг за другом радиально-упорные подшипники качения 2, поверх которых расположены кольца 3. На кольцах 3 равномерно по окружности распределены формообразующие вставки 4 в виде полушфер, которые в основании равны 10 мм. Экспериментальный инструмент имеет также стопорные кольца 5, рамку 6 и пластину 7, через которую осуществляется передача усилия для формообразования.

В качестве металлического листа, на котором будет происходить образование термоконтактной поверхности, использовался жести марки ЖКТ толщиной 0,36 мм. Предел прочности, согласно ГОСТ Р 52204–2004 составляет (375 ± 40) МПа, модуль упругости равен $203 \cdot 10^3$ МПа, коэффициент Пуассона – 0,29.

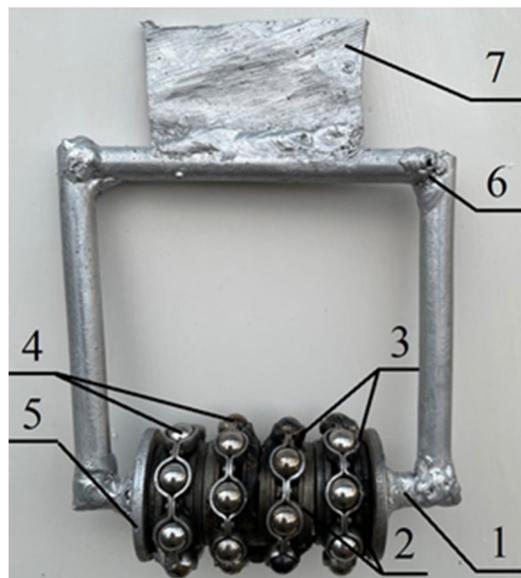


Рис. 5. Формообразующий инструмент

В процессе образования термоконтактной поверхности металлический лист 1 располагался на матрице (плите) 2, которая, в свою очередь, была расположена на опорном столе 3 (рисунок

4). Опорный стол 3 при этом выполнен с возможность закрепления его на станке (например, продольно–строгальном) для возможности его передвижения в процессе формообразования.

Результаты экспериментальных исследований. Экспериментальные и рассчитанные по уравнению (6) данные усилия формообразования представлены на рисунке 6. Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что значения показателя P , полученные в ходе эксперимента, отличаются от аналитического решения

на 12,9–13,4% в меньшую сторону. Ввиду этого можно говорить об гарантированном формообразовании при определении усилия формообразования по уравнению (6). Но не стоит забывать об контроле за высотой образуемых выступов, так как бесконтрольное формообразование может привести к деформации материала. Значения показателя P определялись исходя из воздействия единичной формообразующей вставки на металлический лист.

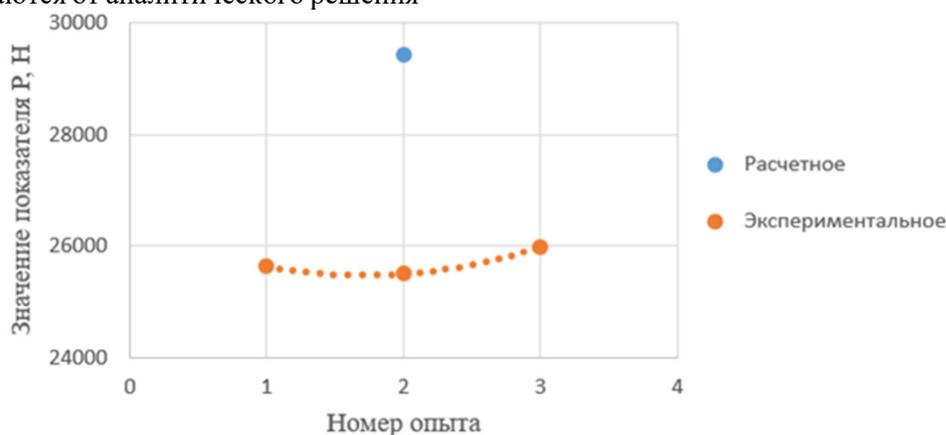


Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований по формированию термоконтактной поверхности, расчет усилия по формуле (6)

Как отмечалось ранее, для определения минимального усилия формообразования можно использовать выражение прогиба части металлического листа (8). Для проверки сходимости экспериментальных данных с аналитическим решением производилось плавное увеличение значения показателя P , начиная с 250Н и заканчивая 750Н с шагом 250Н. В результате экспериментальных исследований (рисунок 7) установлено, что фактический прогиб пластины отличается от

аналитического решения в зависимости от условия на 5,3–7,9% в большую сторону. Контроль за высотой выступов в данном случае не требуется, так как при достижении требуемого усилия не происходит дальнейшего увеличения высоты выступов. При этом показатель b принимался равным 0 и $a/2$, $a=15$ мм. Как и в предыдущем случае, значения показателя P определялись исходя из воздействия единичной формообразующей вставки на металлический лист.

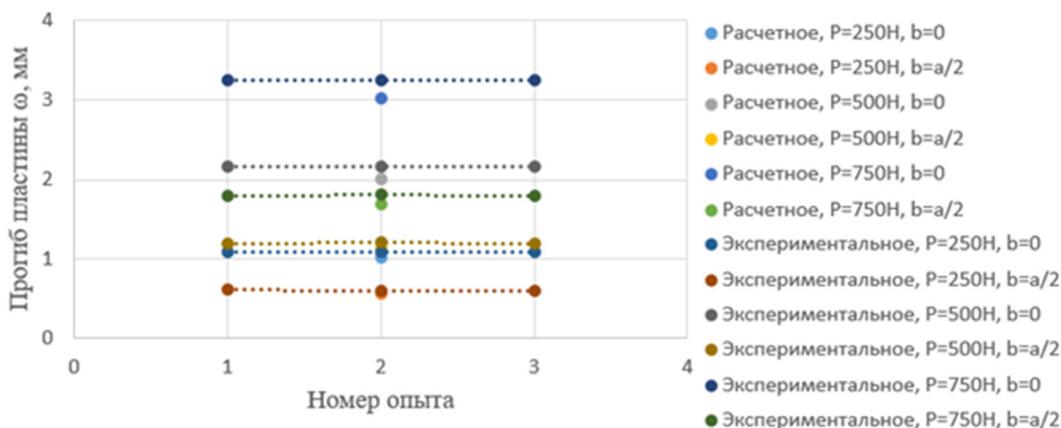


Рис. 7. Результаты экспериментальных исследований по формированию термоконтактной поверхности, расчет усилия по формуле (8)

Особое внимание стоит уделить скорости подачи стола при формообразовании. Увеличение скорости подачи приводит к отклонению

формы термоконтактной поверхности ее элементов от формообразующих вставок. При скоростях подачи стола 3000 мм/мин и выше наблюда-

ются раскатывания при внедрении на входе и выходе формообразующего инструмента в матрицу (рисунок 8). Ввиду этого оптимальные значения скоростей лежат в диапазоне 1000–2000 мм/мин.



Рис. 8. Часть листа после образования термоконтактной поверхности, подача 3000 мм/мин

Выводы

1. Машиностроительная промышленность на современном этапе развития характеризуется тенденцией, направленной на повышение эффективности работы энерготехнологического оборудования. Актуальным способом повышения эффективности является использование устройств интенсификации тепломасообменных процессов. Наиболее востребованными на данный момент являются пассивные методы интенсификации, так как активные методы являются наиболее сложными в реализации в виду особенности самих методов и особенностей технологических процессов и оборудования. Ввиду этого разработка эффективных устройств интенсификации тепломасообменных процессов и технологий их изготовления является актуальной задачей.

2. В качестве решения задачи повышения эффективности энерготехнологического оборудования предложены способ изготовления термоконтактной поверхности и конструкция для его осуществления. Сущность заявленного способа заключается в плоском параллельном деформировании листового материала путем внедрения профильных вставок, установленных в секционном барабане формообразующего инструмента.

3. При рассмотрении процесса изготовления термоконтактной поверхности были установлены выражения для определения силового воздействия, необходимого для формообразования. Вместе с этим было предложено использовать выражения для определения усилия при контролируемом формообразовании (ограниченное пространство) и при неконтролируемом формообразовании (неограниченное пространство) соответственно.

4. Результаты экспериментальных исследований при контролируемом формообразовании показывают, что экспериментальные данные отличаются от аналитического решения на 12,9–13,4 %. В случае использования выражения для неконтролируемого формообразования данное различие составляет 5,3–7,9 %. Помимо этого, также установлено, что качество образуемой термоконтактной поверхности зависит от величины подачи стола, на котором расположен металлический лист. Так, наименьшее отклонение формы термоконтактной поверхности от формы формообразующих вставок наблюдается при скоростях подачи 1000–2000 мм/мин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности: Федеральный закон от 21 ноября 2009 г. № 261-ФЗ.
2. Тимонина В.И. Энергосбережение и энергоэффективность как показатели достижения энергобезопасности в стране // Теоретическая экономика. 2022. № 1. С. 111–119.
3. Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Niyozov N.N., Kurbonov N.N., Mamutov M. Energy saving in industry // Energy Systems Research. 2021. Vol. 289. No. 07014. Pp. 1–4. DOI: 10.1051/e3sconf/202128907014
4. Пушнов А.С., Соколов А.С., Бутрин М.М. Методы интенсификации процесса тепло и массообмена в колонных аппаратах с контактными устройствами // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2013. № 1-4. С. 237–242.
5. Khurmamatov A., Rakhimov G., Murtazayev F. Intensifications of heat exchange processes in pipe heat exchangers // Conference: 2021 Asia-pacific conference on applied mathematics and statistics. 2022. Vol. 2432. No. 1. Pp. 1–5. DOI: 10.1063/5.0096336
6. Горшенин А.С. Методы интенсификации теплообмена: учеб. Пособие. Самара: Изд-во Самарского государственного технического университета, 2009. 82 с.
7. Artemyev D., Zaitsev A. Analysis of increase in efficiency of air-cooled heat exchangers due to intensification of heat exchange // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. Vol. 866. No. 012020. Pp. 1–6. DOI:10.1088/1755-1315/866/1/012020
8. Misbakhov R. S, Gureev V. M, Moskalenko N. I, Ermakov A. M, Bagautdinov I. Z. Simulation of Surface Intensification of Heat Exchange in Shell-and-Pipe and Heat Exchanging Devices // Biosci Biotech Res Asia. 2015. Vol. 12. No. 2. Pp. 517–525.
9. Белозерцев В.Н., Бирюк В.В., Довгялло А.И., Некрасова С.О., Угланов Д.А, Сармин Д.В. Интенсификация теплообмена: учеб. пособие.

Самара: Изд-во Самарского университета, 2018. 208 с.

10. Egorov M.Yu. Methods of Heat-Exchange Intensification in NPP Equipment // Atomic Energy. 2018. No. 124. Pp. 403–407.

11. Rulik S., Wróblewski W. A Numerical Study of The Heat Transfer Intensification Using High Amplitude Acoustic Waves // Archives of Acoustics. 2018. Vol. 43. No. 1. Pp. 31–47.

12. Мигай В.К. Повышение эффективности современных теплообменников. Л.: Энергия, 1980. 144 с.

13. Пат. RU 2759309, Российская Федерация, МПК F28F 1/40 (2006.01). Теплообменный элемент, способ его изготовления и устройство для его осуществления / О.А. Коленчуков, Э.А. Петровский; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО СФУ. № 2021105124; заявл. 25.02.2021; опубл. 11.11.2021, Бюл. № 32. 16 с.

14. Реут Л.Е. Теория напряженного и деформированного состояния с примерами и задачами: учебно-методическое пособие. Минск: БНТУ, 2008. 107 с.

15. Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.Д. Расчет пластин. Киев: Будивельник, 1970. 436 с.

Информация об авторах

Коленчуков Олег Александрович, ассистент кафедры технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса, института нефти и газа. E-mail: okolenchukov@sfu-kras.ru. Сибирский федеральный университет. Россия, 660041, Красноярск, Свободный пр., 82А.

Петровский Эдуард Аркадьевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологических машин и оборудования нефтегазового комплекса, института нефти и газа. E-mail: petrovsky_quality@mail.ru. Сибирский федеральный университет. Россия, 660041, Красноярск, Свободный пр., 82А.

Поступила 27.09.2022 г.

© Коленчуков О.А., Петровский Э.А., 2023

***Kolenchukov O.A., Petrovsky E.A.**

Siberian Federal University

*E-mail: okolenchukov@sfu-kras.ru

STUDY OF THE TECHNOLOGY FOR FORMATION OF THERMAL CONTACT SURFACES OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESS INTENSIFIERS

Abstract. The development of scientific and technological progress in recent decades has led to an increase in the consumption of natural energy carriers. This in turn affects mineral deposits – they are being depleted. In order to reduce energy consumption, the issue of energy conservation is relevant. One of the ways to solve this problem is to conduct research in the field of improving the efficiency of energy technology equipment with the subsequent development of universal technology and equipment for the intensification of heat and mass transfer processes. This article presents the most currently used methods of intensification of heat exchange processes, their advantages and disadvantages. In addition, the most promising method is determined. The technology of forming a thermocontact (discretely rough) surface on a metal sheet is described. Expressions for determining the effort required to produce this surface under various conditions are defined. A method of experimental research and a tool for manufacturing a thermocontact surface are presented. As a result of experimental studies, it is found that, depending on the conditions of formation of the thermal contact surface, the analytical solution differs from the experimental values by 5.3–13.4 %. Another important factor affecting the shaping is the feed rate of the metal sheet, its optimal value is 1000–2000 mm/min.

Keywords: energy-saving technologies, thermal contact surface, intensification of heat exchange, energy technology equipment, efficiency improvement.

REFERENCES

1. On Energy Saving and Energy Efficiency Improvement [Ob energosberezhenii i povyshenii energeticheskoy effektivnosti]: Federal Law No. 261-FZ of November 21, 2009. (rus)

2. Timonina V. I. Energy saving and energy efficiency as indicators of achieving energy security in the country [Energosberezhenie i energoeffektivnost' kak pokazateli dostizheniya energobezопасnosti v

strane]. Theoretical economics. 2022. No. 1. Pp. 111–119. (rus)

3. Rakhmonov I.U., Ushakov V.Ya., Niyozov N.N., Kurbonov N.N., Mamutov M. Energy saving in industry. Energy Systems Research. 2021. Vol. 289. No. 07014. Pp. 1–4. DOI: 10.1051/e3sconf/202128907014

4. Pushnov A.S., Sokolov A.S., Butrin M.M. Methods of intensification of the process of heat and

mass transfer in column apparatuses with contact devices [Metody intensivatsii processa teplo i mas-soobmena v kolonnykh apparatah s kontaktnymi ustroystvami]. Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI. 2013. No. 1–4. Pp. 237–242. (rus)

5. Khurmamatov A., Rakhimov G., Murtazayev F. Intensifications of heat exchange processes in pipe heat exchangers. Conference: 2021 Asia-pacific conference on applied mathematics and statistics. 2022. Vol. 2432. No. 1. Pp. 1–5. DOI: 10.1063/5.0096336

6. Gorshenin A.S. Methods of heat transfer intensification: textbook. Stipend [Metody intensivatsii teploobmena: ucheb. Posobie]. Samara: SamGTU, 2009. 82 p. (rus)

7. Artemyev D., Zaitsev A. Analysis of increase in efficiency of air-cooled heat exchangers due to intensification of heat exchange. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. Vol. 866. No. 012020. Pp. 1–6. DOI:10.1088/1755-1315/866/1/012020

8. Misbakhov R.S., Gureev V.M., Moskalenko N.I., Ermakov A.M., Bagautdinov I.Z. Simulation of Surface Intensification of Heat Exchange in Shell-and-Pipe and Heat Exchanging Devices. Biosci Biotech Res Asia. 2015. Vol. 12. No. 2. Pp. 517–525.

9. Belozertsev V.N., Biryuk V.V., Dovgyallo A.I., Nekrasova S.O., Uglanov D.A., Sarmin D.V.

Intensification of heat exchange: textbook. Stipend [Intensifikatsiya teploobmena: ucheb. Posobie]. Samara: Samara University, 2018. 208 p. (rus)

10. Egorov M. Yu. Methods of Heat-Exchange Intensification in NPP Equipment. Atomic Energy. 2018. No. 124. Pp. 403–407.

11. Rulik S., Wróblewski W. A Numerical Study of The Heat Transfer Intensification Using High Amplitude Acoustic Waves. Archives of Acoustics. 2018. Vol. 43. No. 1. Pp. 31–47.

12. Migay V.K. Improving the efficiency of modern heat exchangers [Povyshenie effektivnosti sovremennykh teploobmennikov]. L.: Energiya, 1980. 144 p. (rus)

13. Kolenchukov O.A., Petrovsky E.A. Heat exchange element, method of its manufacture and device for its implementation. Patent RF, no. 2759309, 2021.

14. Reut L.E. Theory of stressed and deformed state with examples and tasks: an educational and methodical manual [Teoriya napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya s primerami i zadachami: uchebno-metodicheskoe posobie]. Minsk: BNTU, 2008. 107 p. (rus)

15. Weinberg D.V., Weinberg E.D. Calculation of plates [Raschet plastin]. Kiev: Budivel'nik, 1970. 436 p.

Information about the authors

Kolenchukov, Oleg A. Assistant. E-mail: okolenchukov@sfu-kras.ru. Siberian Federal University. Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny Ave., 82A.

Petrovsky, Eduard A. Professor. E-mail: petrovsky_quality@mail.ru. Siberian Federal University. Russia, 660041, Krasnoyarsk, Svobodny Ave., 82A.

Received 27.09.2022

Для цитирования:

Коленчуков О.А., Петровский Э.А. Исследование технологии формирования термоконтактных поверхностей интенсификаторов тепломассообменных процессов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. № 2. С. 94–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-94-101

For citation:

Kolenchukov O.A., Petrovsky E.A. Study of the technology for formation of thermal contact surfaces of heat and mass transfer process intensifiers. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 2. Pp. 94–101. DOI: 10.34031/2071-7318-2022-8-2-94-101