

УДК 665.622.43

А. Р. Галимова, В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев,
В. В. Харьков

СЕПАРАЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО С СООСНО РАСПОЛОЖЕННЫМИ ТРУБАМИ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОДОНЕФТЯНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

Ключевые слова: сепаратор, водонефтяная эмульсия, эффективность, деэмульсация, мелкодисперсные капли.

В работе рассмотрена актуальная задача по сепарированию дисперсных капель нефтепродуктов из устойчивой водонефтяной эмульсии на нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятиях. Была разработана новая модель сепарационного устройства с соосно расположенными трубами. Важными особенностями сепаратора являются простота конструкции и высокая эффективность деэмульсации водонефтяной эмульсии вследствие устойчивой вихревой структуры потока. Сепаратор представляет собой устройство из соосно расположенных труб, где расположен ряд прямоугольных щелей и диск с отверстиями, что позволяет создавать равномерные вихревые потоки. Улавливание дисперсных капель нефтепродуктов внутри сепарационного устройства обеспечивается преимущественно за счет возникновения множества точек вихреобразования вследствие силы, возникающей из-за перепада давления, вызванной градиентом скорости. Описан принцип процесса деэмульсации устойчивой водонефтяной эмульсии в сепараторе. Проведено численное исследование сепаратора для создания методики расчета необходимой высоты сепарационного пространства устройства для эффективного разделения водонефтяных эмульсий. В ходе расчетов учитывались следующие параметры: степень крутки вихревого потока, диаметр отверстия диска и высота сепарационного пространства. Было установлено, что применение сепарационного устройства с соосно расположенными трубами позволяет производить улавливание дисперсных капель нефтепродуктов диаметром от 25 до 300 мкм при значении параметра отношения высоты сепарационного пространства устройства и диаметра вихрей от степени крутки меньше 7. При этом результаты показали, что на эффективность улавливания легкой фазы в сепарационном устройстве также существенный вклад вносят аэродинамические силы, значения которых увеличиваются при росте диаметра капель жидкости.

A. R. Galimova, V. E. Zinurov, A. V. Dmitriev,
V. V. Kharkov

CALCULATION OF OIL-WATER EMULSION SEPARATOR WITH COAXIALLY LOCATED PIPES

Keywords: separator, oil-water emulsion, efficiency, demulsification, fine droplets.

The article considers a pressing issue of dispersed droplet separation of oil products from stable water-oil emulsion at petrochemical and oil refineries plants. A new design of a separation device with coaxially arranged pipes was developed. The simplicity of the design and high demulsification efficiency of the water-oil emulsion due to the stable vortex flow pattern are essential features of the separator. The separator is the device with coaxially arranged pipes, with many rectangular slots and a perforated disk, creating uniform vortex flows. The separation of dispersed droplets of oil products inside the separation device occurs by forming a plurality of eddy points due to the force generated by the pressure drop caused by the velocity gradient. The operating principle of the demulsification process of stable water-oil emulsion in the separator is described. A numerical study of the separator was performed to create a method for calculating the required height of the separation area of the device for the effective separation of water-oil emulsions. During the calculations, the following parameters were taken into account: the degree of twist of the vortex flow, the diameter of the disk hole, and the separation area's height. It has been found that the use of a separation device with coaxially arranged pipes allows the separation of dispersed droplets of oil products with a diameter of 25 to 300 μm under the ratio of the height of the separation area of the device and the diameter of the vortices from the degree of twist less than 7. The results showed that aerodynamic forces also significantly contribute to the efficiency of separating the light phase in the device, and they increase when the diameter of liquid droplets grows.

Проблема низкоэффективной деэмульсации водонефтяной эмульсии является актуальной в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности [1, 2]. Стремительное развитие нефтяных отраслей напрямую связано с модернизацией и совершенствованием технико-экономических характеристик оборудования для подготовки и переработки нефти. Наиболее распространенным способом добычи нефти является закачка воды непосредственно в нефтяной пласт для эффективного вытеснения нефти к добывающим скважинам [3, 4]. В процессе добычи нефти ее обводненность существенно увеличивается. Интенсивное перемешивание пластовой воды и нефти ведет к образованию устойчивых водонефтяных эмульсий, которые усложняют процесс

дальнейшей ее транспортировки и переработки. Как следствие, важным технологическим процессом в нефтедобыче является обезвоживание водонефтяной эмульсии, что подразумевает удаление из нефти воды со всеми растворенными в ней примесями и хлоридами, которые способствуют загрязнению технологического оборудования и их дальнейшей коррозии [5].

Устойчивость является важным показателем водонефтяных эмульсий, так как она в значительной степени определяет выбор технологии дальнейшей переработки и глубину отделения водной фазы от нефтепродуктов. Одной из важных характеристик эмульсии является дисперсность – степень раздробленности дисперсной фазы в дисперсионной среде.

Размеры капель нефти дисперсной фазы в эмульсиях имеют разные величины: мелкодисперсные (0,2–20,0 мкм), среднедисперсные (20–50 мкм), грубодисперсные (50–300 мкм) [6].

В нефтяной промышленности существуют различные методы деэмульсации водонефтяной эмульсии: термохимические, электрохимические и механические [7, 8]. В основе термохимического метода лежит ввод деэмульгаторов в исходную эмульсию, в процессе которого разрушается сольватная оболочка глобулы воды и происходит осаждение тяжелой фазы в нефти. Электрохимический метод основан на пропускании нефти через электрическое поле, в результате чего капли воды способны поляризоваться и деформироваться с разрушением защитных пленок с последующим их столкновением и укрупнением. Наиболее распространенным и эффективным методом деэмульсации водонефтяной эмульсии является механический, который представляет собой гравитационное отстаивание эмульсии [9, 10]. Преимущество данного метода заключается в простоте конструкции устройства и низких материальных затратах для его реализации. Данный процесс может осуществляться в объемном резервуаре, в котором осаждается более плотная жидкость – вода и поднимается менее плотная – нефть [11, 12]. Методу свойственны и определенные недостатки, такие как низкая скорость отстаивания нефти и малоэффективная деэмульсация мелкодисперсных водонефтяных эмульсий. Таким образом, в нефтяной промышленности в связи с увеличивающимся объемом добычи нефти с высоким содержанием воды и ужесточением требований к качеству нефти, проблема интенсификации процесса деэмульсации нефти становится актуальной, и для решения этой проблемы имеется необходимость разработки новых эффективных способов [13, 14]. Для решения поставленной задачи авторами разработана новая модель сепаратора с соосно расположенными трубами. Интенсификация разделения фаз водонефтяной эмульсии в нем обеспечивается за счет проведения процесса в закрученном слое жидкости [15, 16].

Сепаратор с соосно расположенными трубами (рис. 1) содержит наружный цилиндрический корпус 3, внутри которого располагается внутренняя цилиндрическая труба 1. На внутренней цилиндрической трубе расположен диск с одинаковыми по диаметру отверстиями 4, ниже имеется четное количество прямоугольных отверстий 2, расположенных с определенным шагом. Устройство содержит входной патрубок для подачи исходной эмульсии и выходные патрубки для вывода тяжелой и легкой фазы эмульсии.

Процесс деэмульсации устойчивой водонефтяной эмульсии в сепараторе с соосно расположенными трубами осуществляется следующим образом. Исходная водонефтяная эмульсия подается в верхний входной патрубок сепаратора. Поток эмульсии движется вниз по внутренней цилиндрической трубе до прямоугольных отверстий 2, далее при прохождении через них поступает в пространство между цилиндрическими трубами, которое является основной зоной разделения. Прямоугольное отверстие

в сепараторе позволяет поступающему потоку водонефтяной эмульсии разбиваться на две равные части, движущиеся синхронно относительно друг друга между цилиндрическими трубами в верхнюю часть устройства. Водонефтяная эмульсия приобретает вращательное движение исходя из конструктивных особенностей сепаратора (рис. 2), где в основной зоне разделения поток тяжелой фазы вращается по внешнему радиусу круга вихря, а легкая фаза во внутренней части вихря вследствие разности их плотностей. Легкая фаза (нефтепродукты) стремится в центр вихря за счет силы, которая возникает из-за разницы давлений, вызванной градиентом скорости. Центробежной силой, действующей на капли, мы пренебрегаем, так как плотность дисперсности и несущей фаз сопоставимы. Тяжелая фаза (вода) перемещается на периферию потока и образует слой около внутренней поверхности наружного корпуса, где затем выводится через выходное отверстие устройства. Наибольшие изменения параметров потока вихрей наблюдаются именно в пристеночной области.

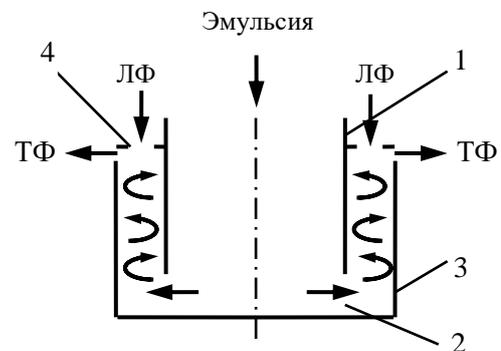


Рис. 1 - Схема сепаратора с соосно расположенными трубами в разрезе (вид с боку): ЛФ – легкая фаза; ТФ – тяжелая фаза; 1 – внутренняя цилиндрическая труба; 2 – прямоугольные щели; 3 – наружный цилиндрический корпус; 4 – диск с отверстиями

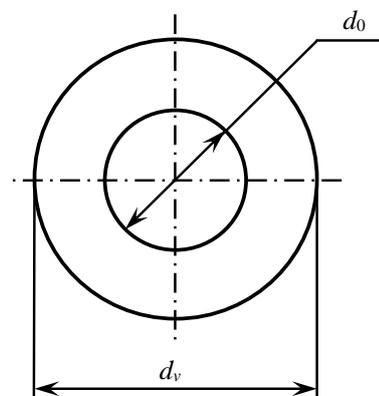


Рис. 2 - Схема сепарационного пространства для разделения водонефтяных эмульсий (вид сверху): d_0 – диаметр отверстия в диске; d_v – диаметр вихрей водонефтяной эмульсии

Следует отметить, что для определения возможности захвата каплей нефти различной дисперсности требуется исследование конструктивных параметров новой модели сепаратора с соосно расположенными трубами на основе математических расчетов. Поэтому целью данной работы является создание методики расчета необходимой высоты сепарационного пространства устройства для разделения водонефтяных эмульсий.

При проведении математических расчетов принимались следующие постоянные значения: начальная скорость потока эмульсии равная 2 м/с, плотность легкой и тяжелой фазы жидкости.

Капли жидкости с меньшей плотностью движутся к центру за счет силы вызванной градиентом скорости и, следовательно, давлением. Эту силу можно определить по аналогии с определением силы Архимеда

$$F_w = (p(r+a) - p(r))S, \quad (1)$$

где S – площадь грани, м²; $p(r+a)$, $p(r)$ – давление по разные стороны капли соответственно, Па; a – диаметр капли, м.

Распределение тангенциальной скорости по радиусу вихря можно представить в следующем виде:

$$W_\varphi(r) = K_1 r, \quad (2)$$

где K_1 – коэффициент; r – радиус, м.

Разница давлений по разные стороны капли

$$p(r+a) - p(r) = \frac{\rho_L K_1^2}{2} (r^2 + 2ra + a^2 - r^2), \quad (3)$$

где ρ_L – плотность сплошной среды, кг/м³.

Так как $r \gg a$, то можно записать

$$p(r+a) - p(r) = \rho_L K_1^2 ra. \quad (4)$$

В этом случае действующая на каплю сила, возникающая из-за разницы давлений, определится по уравнению:

$$F_w = \rho_L K_1^2 raS. \quad (5)$$

Если предположить, что элемент, на который действует сила, имеет форму куба, то $S = a^2$, следовательно:

$$F_w = \rho_L K_1^2 r a^3. \quad (6)$$

и для сферических частиц

$$F_w = \rho_L K_1^2 r \frac{\pi a^3}{6}. \quad (7)$$

Сила сопротивления при обтекании частицы по Стоксу

$$F_a = 3\pi a \mu_L U_r. \quad (8)$$

Допустив равномерное движение капли от периферии вихря к центру

$$3\pi a \mu_L U_r = \rho_L K_1^2 r \frac{\pi a^3}{6}. \quad (9)$$

где μ_L – коэффициент динамической вязкости, Па·с; U_r – радиальная скорость капли, м/с.

Тогда можно определить радиальную скорость движения каплей по следующей зависимости:

$$U_r = \frac{a^2 K_1^2}{18 \nu_L} r, \quad (10)$$

где ν_L – коэффициент кинематической вязкости, м²/с.

Если предположить, что тангенциальная скорость на границе вихря равна скорости в щелях, то можно записать

$$W_\varphi = \frac{2W_{sl}}{d_v} r. \quad (11)$$

Следовательно

$$U_r = \frac{2}{9\nu_L} \left(\frac{aW_{sl}}{d_v} \right)^2 r. \quad (12)$$

Для отвода капли через отверстие необходимо, чтобы она оказалась внутри области круга диаметром d_0 . Таким образом, самый длинный путь, который необходимо пройти каплям, составляет

$$l_r = \frac{1}{2}(d_v - d_0). \quad (13)$$

Для получения зависимости для оценочных расчетов введем допущение, что капля движется со средней скоростью, которую примем при $r = r_{cp}$. Тогда

$$r_{cp} = \frac{1}{4}(d_v + d_0). \quad (14)$$

Время прохождения этого пути

$$\tau_l = 9\nu_L \frac{d_v - d_0}{d_v + d_0} \left(\frac{d_v}{aW_{sl}} \right)^2. \quad (15)$$

Время движения капли вдоль оси до момента достижения условия, при котором она окажется на диаметре d_0

$$\tau_z = \frac{z}{W_z}. \quad (16)$$

Скорость движения эмульсии вдоль оси в сепарационном пространстве можно определить по формуле:

$$W_z = \frac{4G_v}{\pi(D^2 - d^2)}, \quad (17)$$

где G_v – объемный расход эмульсии, м³/с; D , d – диаметры внешнего и внутреннего цилиндров, соответственно, м.

Если принять условие равнопроточности, то диаметры цилиндров будут связаны следующим соотношением:

$$D = \sqrt{2}d. \quad (18)$$

Диаметр вихрей водонефтяной эмульсии в сепарационном пространстве можно определить с помощью формулы:

$$d_v = \frac{\sqrt{2}-1}{2}d. \quad (19)$$

Скорость потока эмульсии на входном патрубке

$$W_z = \frac{4G_v}{\pi d^2}. \quad (20)$$

Время, за которое эмульсия пройдет путь от верхней части щели до отверстия

$$\tau_z = \frac{\pi d^2 z}{4G_v}. \quad (21)$$

Приравняв время движения вдоль оси и время движения к заданной области

$$\frac{\pi z}{G_v} = 9v_L \frac{(d_v - d_0)}{(d_v + d_0)} \left(\frac{\sqrt{2} - 1}{aW_{sl}} \right)^2. \quad (22)$$

Степень крутки A определяется по выражению:

$$A = \frac{F_{an}}{F_{sl}} = \frac{\pi}{nbh_{sl}} \left(\frac{d_v}{\sqrt{2} - 1} \right)^2, \quad (23)$$

где F_{an} – площадь поперечного сечения входной трубы, м²; F_{sl} – площадь щелей, м².

Объемный расход эмульсий равен

$$G_v = W_{bx} \pi \left(\frac{d_v}{\sqrt{2} - 1} \right)^2. \quad (24)$$

Скорость эмульсии в щелях можно определить по соотношению:

$$W_{sl} = \frac{G_v}{nbh_{sl}} = W_{bx} A. \quad (25)$$

Таким образом, высоту сепарационного устройства можно определить по формуле:

$$z = \frac{9v_L}{W_{bx}} \frac{(d_v - d_0)}{(d_v + d_0)} \left(\frac{d_v}{aA} \right)^2. \quad (26)$$

Также была получена зависимость высоты сепарационной зоны z и диаметр вихрей водонефтяной эмульсии d_v в формуле (26), которая имеет существенное значение при выборе диаметра и высоты зоны сепарации разработанного устройства. Было выявлено, что увеличение степени крутки вихревого потока в сепарационном пространстве влияет на силы, действующие на капли, которые в свою очередь определяют эффективность сепарационного устройства. Для эффективной деэмульсации водонефтяной эмульсии требуется соотношение параметров $z/d_v < 7$, для устойчивости вихрей. Для наибольшей эффективности улавливания капель нефти из водонефтяной эмульсии при значениях их размеров 25; 50; 100; 200 и 300 мкм значение параметра z/d_v составляет 6; 1,5; 0,375; 0,094 и 0,042, соответственно (рис. 3).

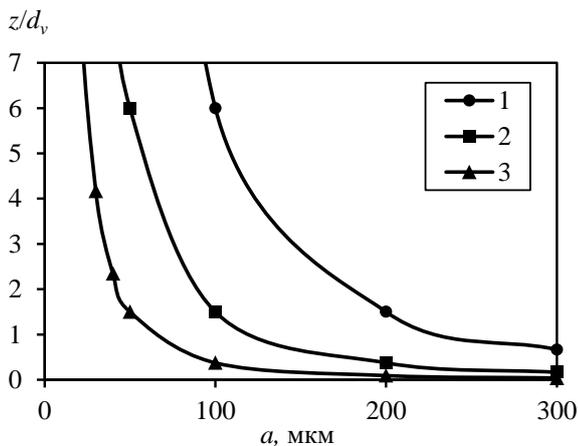


Рис. 3 - Зависимость отношения высоты сепарационного пространства устройства и диаметра вихрей z/d_v от размера капель нефтепродуктов a при различной степени крутки A : 1 – 0,5; 2 – 1,0; 3 – 2,0 ($d_v = 0,01$ м)

При этом результаты показали, что на эффективность улавливания капель нефтепродуктов в сепараторе существенно влияет сила, возникающая из-за разницы давлений, значение которой увеличивается по мере роста степени крутки вихревого потока эмульсии и диаметра капель нефтепродуктов. Влияние степени крутки потока водонефтяной эмульсии на улавливание разных по дисперсности капель нефти показано на рис. 4. В данном случае значение диаметра отверстий в диске принимали равным 5 мм и диаметр вращения потока водонефтяной эмульсии – 20 мм.

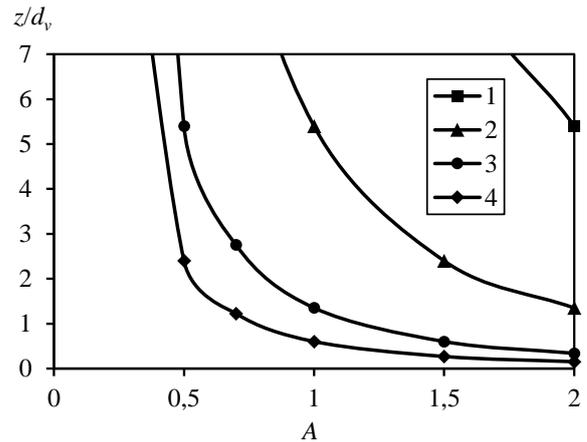


Рис. 4 - Зависимость изменения отношения высоты сепарационного пространства устройства и диаметра вихрей z/d_v от степени крутки A при различных размерах капель нефтепродуктов a , мкм: 1 – 50; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 300 ($d_v = 0,02$ м)

В работе было отмечено, что при уменьшении размера капель нефтепродуктов для их улавливания необходимо создавать перепад давлений в потоке больших значений. Следовательно, для лучшего улавливания мелкодисперсных капель нефти рекомендуется увеличивать степень крутки вихревого потока, что обеспечит эффективное разделение капель нефти от тяжелой фазы в сепарационном устройстве. Регулирование степени крутки существенно изменяет закрутку вихревого потока эмульсии в основной зоне разделения, так как разгон движения частиц значительно влияет на деэмульсацию исходной водонефтяной эмульсии.

Для улавливания легкой фазы из водонефтяной эмульсии, особенно мелкодисперсных капель нефтепродуктов, требуется большое значение соотношения z/d_v . Из графика (рис. 5) видно, что для вывода капель нефти, диаметром от 200 до 300 мкм, из сепаратора через выходной патрубок, соотношение z/d_v (при диаметре вращения потока водонефтяной эмульсии 40 мм) требуется меньше 1. Важно отметить, что интенсивность вихревого потока сказывается на улавливании капель нефти меньших по диаметру и для необходимости захвата всех дисперсного состава нефтепродуктов степень крутки вихревого потока влияет на общую эффективность работы сепаратора.

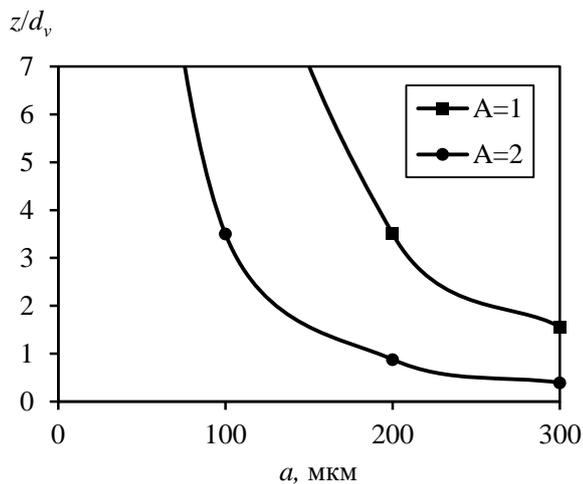


Рис. 5 - Зависимость отношения высоты сепарационного пространства устройства и диаметра вихрей z/d_v от размеров капель нефтепродуктов a при различной степени крутки ($d_v = 0,04$ м)

В итоге, существующие методы разделения водонефтяных эмульсий редко используются обособленно, а чаще комбинируются с целью повышения общей эффективности процесса разделения. Проведенные численные исследования показали, что применение сепаратора с соосно расположенными трубами позволит повысить эффективность улавливания дисперсных капель нефтепродуктов из водонефтяной эмульсии, что способствует повышению эффективности процесса дальнейшей подготовки и транспортировки нефти на нефтехимических и нефтеперерабатывающих предприятиях.

В ходе математических расчетов была установлена зависимость влияния параметров крутки, диаметра вихрей и высоты сепарационного пространства аппарата на эффективность разделения. Чем больше значение задаваемого параметра крутки, тем меньше нужно соотношение z/d_v , то есть отношения высоты сепарационного пространства сепаратора и диаметра вихрей эмульсии для улавливания нефтепродуктов различной фракции. На основе построенных графиков было выявлено, что сила, которая возникает из-за разницы давлений, вызванной градиентом скорости, является важной составляющей в принципе действия сепаратора с соосно расположенными трубами. Результаты численного расчета наглядно показали, что для наибольшей эффективности улавливания капель нефти из водонефтяной эмульсии при значениях их размеров 25; 50; 100; 200 и 300 мкм значение параметра z/d_v составляет 6; 1,5; 0,375; 0,094 и 0,042, соответственно, при высоте сепарационной зоны – 20 мм.

Конструкция разработанного сепаратора позволяет повысить качество разделения водонефтяной эмульсии, увеличить эффективность улавливания нефтепродуктов в режиме взвешенного закрученного слоя и обеспечивать надежность его эксплуатации в нефтяной промышленности.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-616.2020.8.

Литература

1. М.М. Abdulredha, S.A. Hussa, A. Luqman, *Arab. J. of Chem.*, **13**, 1, 3403–3428 (2020).
2. R. Zolfagharia, A. Fakhru'l-Razi, L. C. Abdullah, S. S.E.H. Elnashaie, A. Pendashteh, *Sep Purif Technol*, **170**, 377–407 (2016).
3. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, В.Л. Нгуен, *Вестник Казанского государственного энергетического университета*, **10**, 1(37), 74–81 (2018).
4. В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, В.В. Харьков, А.Р. Галимова, *Вестник технологического университета*, **23**, 7, 61–64 (2020).
5. В.Э. Зинуров, А.Р. Галимова, В сб. *Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники*. Т. 1. Казань, 2020. С. 190–194.
6. Ф.М. Хуторянский, *Обезвоживание и обессоливание нефти: Химическая энциклопедия*. Т. 3. Научн. изд. Большая российская энциклопедия, Москва, 1992. 608 с.
7. J. Sjblom, *Encyclopedic handbook of emulsion technology*. Marcel Dekker, New York, 2001. 621 p.
8. D. Wang, D. Yang, C. Huang, Y. Huang, D. Yang [et al.], *Fuel*, **286**, 119390 (2021).
9. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, И.Д. Файзрахманов, В сб. *Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии*, Альметьевск, 2018. С. 387–389.
10. А.Р. Галимова, М.А. Антонов, *Энергия 2020* (Казань, 7–10 апреля 2020). 2020. С. 75.
11. В.Э. Зинуров, А.Р. Галимова, Д.Р. Маматкулова, И.Д. Файзрахманов, В сб. *Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники*. Т. 1, Казань, С. 190–194.
12. А.Р. Галимова, Б.А. Мубаракшин, *Энергия 2020* (Казань, 7–10 апреля 2020). 2020. С. 36.
13. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, В.В. Харьков, *Вестник технологического университета*, **23**, 3, 85–88 (2020).
14. А.В. Дмитриев, В.Э. Зинуров, О.С. Дмитриева, С.В. Данг, *Вестник Казанского государственного энергетического университета*, **3(39)**, 65–71 (2018).
15. А.Н. Николаев, В.В. Харьков, *Вестник технологического университета*, **18**, 18, 130–132 (2015).
16. А.А. Овчинников, В.В. Харьков, *Вестник Казанского технологического университета*, **17**, 23, 322–325 (2014).

© А. Р. Галимова – студент ФГБОУ ВО «КГЭУ», galimovaar00@mail.ru; В. Э. Зинуров – аспирант ФГБОУ ВО «КГЭУ», vadd_93@mail.ru; А. В. Дмитриев – д.т.н., зав. кафедрой ТОТ ФГБОУ ВО «КГЭУ», ieremiada@gmail.com; В. В. Харьков – к.т.н., доцент кафедры ОПП ФГБОУ ВО «КНИТУ», v.v.kharkov@gmail.com.

© A. R. Galimova – student, Kazan State Power Engineering University (KSPEU), galimovaar00@mail.ru; V. E. Zinurov – post-graduate student, KSPEU, vadd_93@mail.ru; A. V. Dmitriev – Doctor of Engineering Sciences, Head of Department of Theoretical Basis of Thermotechnics, KSPEU, ieremiada@gmail.com; V. V. Kharkov – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Food Production Equipment, Kazan National Research Technological University, v.v.kharkov@gmail.com.