

В. В. Харьков, М. Г. Кузнецов, А. Н. Николаев

ВТОРИЧНОЕ ДРОБЛЕНИЕ ПЛЕНКИ ОТСЕПАРИРОВАННОЙ ЖИДКОСТИ В ВИХРЕВОМ УСТРОЙСТВЕ

Ключевые слова: лопаточный завихритель, дисперсность, струя, пленка.

Использование закрученных течений сред в рабочей области оборудования способствует существенной интенсификации различных технологических процессов. В связи с этим устройства вихревого типа представляют собой перспективное и высокоэффективное оборудование, что обуславливает необходимость их тщательного исследования. На эффективность газожидкостного вихревого устройства влияет дисперсный состав капель, а так как в объеме устройства можно выделить несколько характерных зон, то существует необходимость в определении дисперсного состава капель для каждой из них. В данной работе проводится анализ механизма образования капель, образующихся при вторичном дроблении пленки отсепарированной жидкости на поверхности лопаточного завихрителя в зоне поперечной сепарации. На основании оценки влияния отдельных факторов на процесс распада струи, капель и пленок жидкости показано, что экспериментальный путь исследования вторичного дробления пленки отсепарированной жидкости является единственно оправданным. Установлено, что с помощью зависимости для диаметра капель, связанного с диаметром струй, и эмпирической зависимости, полученной при обобщении данных по средним диаметрам капель маловязких жидкостей, образующихся при дроблении пленки отсепарированной жидкости, возможно в первом приближении оценить вероятность вторичного дробления. На основании экспериментальных данных по исследованию дисперсного состава жидкости на выходе из тангенциального завихрителя вихревого устройства найдено, что модальный размер капель увеличился в 6,3 раза, а кривая распределения капель по размеру соответствует логарифмически-нормальному распределению, что указывает на сильное влияние случайных факторов, определяющих процессы взаимодействия и дробления в зоне поперечной сепарации.

V. V. Khar'kov, M. G. Kuznetsov, A. N. Nikolaev

SECONDARY CRUSHING OF THE FILM OF SEPARATED LIQUID IN A VORTEX DEVICE

Keywords: blade swirler, dispersion, jet, film.

The use of swirling fluid flows in the working area of equipment contributes to a significant intensification of various technological processes. Consequently, vortex-type devices represent promising and highly efficient equipment, necessitating their thorough investigation. The performance of a gas-liquid vortex device is influenced by the droplet size distribution, and since several distinct zones can be identified within the device, it is essential to determine the droplet size distribution for each of them. This study analyzes the droplet formation mechanism resulting from the secondary breakup of the separated liquid film on the surface of a vane-type swirler in the transverse separation zone. By evaluating the influence of individual factors on the breakup process of jets, droplets, and liquid films, it is demonstrated that the experimental approach to studying the secondary breakup of the separated liquid film is the only justified method. It has been established that using the relationship between droplet diameter and jet diameter, along with an empirical correlation derived from generalized data on the mean droplet diameters of low-viscosity liquids formed during the breakup of a separated liquid film, it is possible to estimate – in a first approximation – the probability of secondary breakup. Based on experimental data examining the droplet size distribution at the outlet of a tangent swirler in a vortex device, it was found that the modal droplet size increased by a factor of 6.3, and the droplet size distribution follows a lognormal distribution. This indicates a strong influence of random factors governing the interaction and breakup processes in the transverse separation zone.

Устройства вихревого типа широко используются во многих отраслях промышленности, в том числе в химической, нефтеперерабатывающей, пищевой и др., так как наличие закрученных течений способствует значительной интенсификации тепломассообменных, гидромеханических и сепарационных процессов [1–4]. Для теоретического описания этих процессов и оценки эффективности устройств необходимо знание практического распределения дисперсных частиц по размерам. А для этого нужно понимать и описать механизм формирования дисперсного состава частиц с учетом действия всех (различных по природе) факторов, что является довольно сложной задачей [5–8].

Эффективность газожидкостных вихревых устройств с лопаточными завихрителями во многом определяются дисперсностью и параметрами

движения капель в зоне поперечной сепарации, где происходит взаимопроникающее движение капель, вылетающих из межлопаточных каналов завихрителя, капель, образующихся при дроблении отсепарированной фазы, и капель орошающей жидкости, сопровождаемое их дроблением и коалесценцией [9, 10].

В рамках данной работы планируется изучить процесс взаимодействия капель жидкости с поверхностями лопастей завихрителя, покрытыми пленкой жидкости, так он приводит к изменению дисперсного состава капель, поступающих в зону поперечной сепарации, по сравнению с дисперсным составом капель на входе в вихревое устройство.

В работе [11] выполнен эксперимент по определению параметров вторичного дробления отсепарированной жидкости с помощью. С помощью

голографического метода исследовался процесс разрушения пленки жидкости, стекающей с кромки пластины в спутном потоке газа. Телеграфировался след за пластиной начиная непосредственно от задней кромки и далее до расстояния 150 мм вниз по потоку. Толщина задней кромки варьировалась от 0,05 до 4 мм. Опыты проводились при скоростях воздуха 45–120 м/с на воде, этиловом спирте и водным раствором глицерина. Установлена последовательность разрушения пленки жидкости – непосредственно с кромки пластины сходит сплошная пленка, длина которой невелика (3–4 мм) и зависит от скорости газа и расхода жидкости, далее пленка распадается на ряд отдельных струй, которые впоследствии распадаются на отдельные капли.

Таким образом, задача о разрушении стекающей пленки и образования спектра размеров капель сводится к исследованию дробления струй жидкости при наличии спутного потока газа, которое в свою очередь является частным случаем распыливания жидкостей и обуславливается двумя процессами:

- а) пневматическим дроблением жидкости;
- б) дроблением одиночной капли.

Несмотря на то, что процессу распада посвящено значительное количество как теоретических, так и экспериментальных работ, в настоящее время нет твердо установившихся представлений о механизме протекания этого процесса. Сложность распада струи жидкости, капли и пленки привела к многочисленным – и часто противоречивым – корреляциям для прогнозирования размера капли. Хотя существенный объем теоретических и экспериментальных исследований был посвящен явлениям распада, окончательное понимание базовых механизмов остается неясным.

Для правильной оценки влияния отдельных факторов на процесс распада необходимо четкое разграничение двух режимов протекания этого процесса:

1. При низких относительных скоростях между распыляемой струей жидкости и газом происходит распад струи из-за статической неустойчивости, вызванной силами поверхностного натяжения.

2. При более высоких относительных скоростях возникает второй режим, где доминирующим фактором становятся аэродинамические силы.

Характерным признаком первого режима является неизменность размеров капель после распада струи. Окончательные размеры капель определяются при этом целиком условиями первичного дробления.

Второй режим характеризуется двумя стадиями: первичного дробления струи жидкости на капли и вторичного дробления уже образовавшихся капель. Первичное дробление в различных типах распыляющих устройств определяется различными факторами. Вторичное дробление для любого типа распыляющих устройств определяется аэродинамическими силами, действующими на капли.

На основе вывода о существовании двух стадий процесса можно показать несостоятельность попыток получить зависимость окончательных

размеров капель при помощи теории неустойчивости и турбулентного распада во втором режиме.

Окончательный размер капли при распыливании под действием аэродинамических сил не зависит заметно от условий первичного дробления, а определяется относительной скоростью среды и физическими свойствами жидкости [12].

Устойчивость капли при обтекании ее газом в основном определяется отношением аэродинамических сил и силами поверхностного натяжения или числом Вебера

$$We = \frac{\rho_g v_k^2 \delta_k}{\sigma}, \quad (1)$$

где ρ_g – плотность газа; v_k – скорость капли; δ_k – характерный размер капли; σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Значение числа Вебера, при котором происходит дробление капли, называются критическим. Определению критического числа Вебера посвящен ряд теоретических и экспериментальных работ. Следует заметить, что существует довольно большое расхождение значений $We_{кр}$, полученных различными авторами. Прандтль указывает, что $We_{кр} = 7,5$ [13], в опытах Вольнского [14] критерий дробления $We_{кр} = 12–14$, Бухман [15] говорит о необходимости учета характера турбулентности струи, в которой происходит дробление и считает, что для ламинарного потока $We_{кр} = 3,5$.

Сложная комбинация физических процессов, которые происходят при распаде струй жидкости, влечет за собой сложность математического анализа [16]. Поэтому многочисленные работы в этой области не позволяли приблизиться к адекватному математическому описанию процесса. В этих условиях экспериментальный путь исследования является единственно оправданным.

Статистический анализ полученных голограмм [11] показал, что средний диаметр струй, образующихся в результате распада пленки, практически не зависит ни от расхода жидкости, ни от ее вязкости, ни от толщины задней кромки лопатки. Вместо этого он в основном определяется скоростью газа и поверхностным натяжением жидкости. Данные по среднему диаметру струй жидкости $\delta_{ср}$ в зависимости от скорости спутного потока газа W представлены на рис. 1. Для каждой из исследуемых жидкостей эти опытные данные в общем виде могут быть описаны эмпирической зависимостью вида

$$\delta_{ср} = \frac{c_1}{W^{1,1}}, \quad (2)$$

где c_1 – эмпирическая константа, зависящая только от физических свойств жидкости.

Начальный спектр размеров капель формируется в результате дробления струй жидкости. На основании теории дробления струй жидкости малой вязкости, при распаде одиночную струю можно разделить на отдельные участки длиной λ_{max} . Величина λ_{max} определяется из условия максимальной устойчивости предельных колебаний на поверхности струи и для рассматриваемого случая

$$\lambda_{max} = 4\delta_{стр} \quad (3)$$

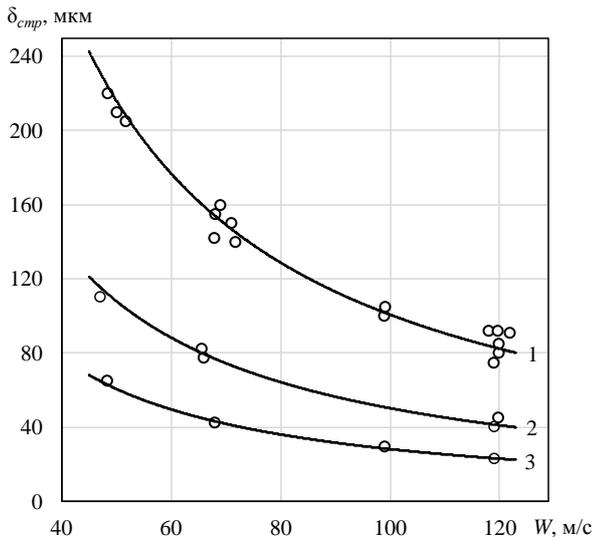


Рис. 1 – Диаметр струи при диспергировании: 1 – воды (расход жидкости $q = 0,065–0,465$ кг/м³·с); 2 – спирта ($q = 0,075–0,175$ кг/м³·с); 3 – глицерина ($q = 0,245$ кг/м³·с)

Fig. 1 – Jet diameter during dispersion: 1 – water (flow rate $q = 0.065–0.465$ kg/m³·s); 2 – alcohol ($q = 0.075–0.175$ kg/m³·s); 3 – glycerin ($q = 0.245$ kg/m³·s)

В соответствии с этим при разрушении струй будут образовываться капли, равновеликие по массе с участком струи длиной λ_{max} . Диаметр этих капель связан с диаметром струй соотношением

$$\delta_{max} = 1,82\delta_{стр} \quad (4)$$

Поскольку диаметр струи от расхода жидкости не зависит и определяется только скоростью газа, размеры образующихся при распаде струй капель также должны не зависеть от расхода жидкости, а влияние скорости должно описываться зависимостью (2). Линия на рис. 2 описывает рассчитанные таким образом диаметры капель, причем для определения $\delta_{стр}$ использовалась эмпирическая зависимость, приведенная на рис. 1. Для сравнения на рис. 2 отложены опытные значения максимальных диаметров капель воды в образующемся спектре.

При распаде струй жидкости образуются довольно крупные капли, которые будут дробиться вторично. Возможность дробления можно оценить по критическому значению числа Вебера. Капли, образующиеся при распаде струй, ускоряются в потоке газа. Если время критической деформации капли меньше времени ее разгона до скорости, соответствующей критическому значению числа Вебера, рассчитанному по местной относительной скорости газа, то капля распадается. Это условие практически всегда выполняется, поэтому вниз по потоку от выходной кромки лопасти спектр размеров капель, образующихся при разрушении струй, сохраняться не будет.

Экспериментальные исследования [11] показали, что средний диаметр капли уменьшается с увеличением расстояния от кромки лопасти, а длина

зоны распада зависит от скорости газа. При высоких скоростях газа (примерно 70–100 м/с) область, демонстрирующая наиболее значительное изменение среднего размера капли, составляет 50–60 мм. Наоборот, когда скорость газа уменьшается до 40 м/с, вторичная зона распада расширяется до 80–100 мм.

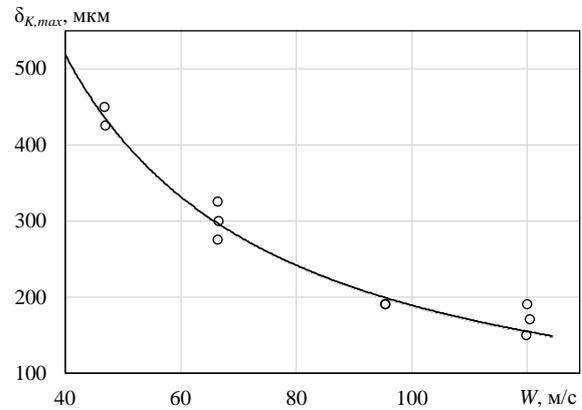


Рис. 2 – Зависимость максимального диаметра капли от скорости газа

Fig. 2 – Dependence of the maximum droplet diameter on the gas velocity

Учитывая, что путь движения капель в зоне поперечной сепарации невелик и для капель диаметром 50–100 мкм не превышает 4–5 диаметров зоны, был сделан вывод, что дробление пленки отсепарированной жидкости происходит в условиях, отличных от равновесных, и дисперсный состав жидкости может быть определен только экспериментально. Вместе с тем, используя зависимость (4), а также формулу (5) при обобщении данных по средним диаметрам капель маловязких жидкостей в конечном спектре, можно в первом приближении оценить характерный диаметр капель, образующихся при дроблении пленки отсепарированной жидкости и оценить вероятность вторичного дробления.

$$\frac{\delta_k}{\sqrt{\sigma / (g\rho_{ж})}} = \frac{67,5(gv_{ж})^{1/3}}{W} \quad (5)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости.

Было выполнено экспериментальное исследование дисперсного состава капель жидкости на выходе тангенциального завихрителя вихревого устройства. Дисперсный состав капель на входе в устройство соответствовал модельному распределению с модой 30 мкм и дисперсией 3,0. Исследование проводилось на системе вода-воздух в вихревом устройстве диаметром 100 мм с углом наклона пластин завихрителя 45° при среднерасходной скорости газа 20 м/с. Дисперсный состав капель определялся электроконтактным методом [17]. Более подробное описание экспериментальной установки представлено в работе [10]. Исследование показало (рис. 3), что в результате взаимодействия капель с пластинами завихрителя состав дисперсной фазы существенно изменяется, капли укрупняются, что способствует улучшению их сепарации в поле центробежной силы [18]. Вид

кривой распределения капель по размерам (кривая 3) близок к логарифмически нормальному закону распределения случайных величин, что указывает на большое число случайных факторов, определяющих процессы взаимодействия и дробления. Распределение капель по размерам характеризуется модой 190 мкм и дисперсией 1,82.

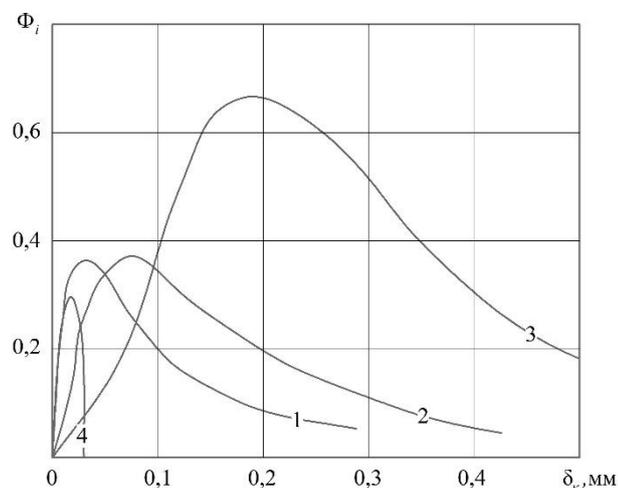


Рис. 3 – Дифференциальная кривая распределения капель диаметром δ_k : 1, 2 – на входе в завихритель; 3 – на выходе из завихрителя; 4 – пролетающих без взаимодействия с лопастями

Fig. 3 – Differential droplet distribution curve with a diameter of δ_k : 1, 2 – at the swirler inlet; 3 – at the swirler outlet; 4 – flying without interaction with the swirler blades

Заключение

В работе рассмотрена актуальная задача по оценке дисперсного состава капель, образующихся в результате вторичного дробления пленки отсепарированной жидкости, образованной на поверхности лопатки завихрителя вихревого устройства. Приводится описание механизма процесса разрушения стекающей пленки и образования спектра размеров капель, а также четкое разграничение двух режимов протекания этого процесса. Формулируется утверждение о сложности математического анализа этого процесса из-за сложной комбинации физических явлений. Проведенные опытные исследования распределения размера капель на выходе тангенциального завихрителя вихревого устройства показали, что модальный размер капель увеличился в 6,3 раза, а кривая распределения капель по размеру соответствует логарифмически-нормальному распределению, что указывает на сильное влияние случайных факторов, определяющих процессы взаимодействия и дробления в зоне поперечной сепарации.

В дальнейшем планируется оценить условия, определяющие характер взаимодействия и результат удара капли о лопасти завихрителя устройства вихревого типа.

Литература

1. M.A. Rahman, S.M. Hasnain, R. Zairov, *International Journal of Thermofluids*, 22, Article 100689 (2024). DOI: 10.1016/j.cep.2019.107679.
2. A. Kourou, S. Chen, Y. Ouyang, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 46, Article 101056 (2024). DOI: 10.1016/j.coche.2024.101056.
3. V. Zinurov, V. Kharkov, E. Pankratov, A. Dmitriev, *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 12, 4, 336–346 (2022). DOI: 10.46604/ijeti.2022.9568.
4. X. Luo, L. Yang, H. Yin, L. He, Y. Lu, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 145, Article 107679 (2019). DOI: 10.1016/j.cep.2019.107679.
5. A.A. Кухленко, С.Е. Орлов, М.С. Василишин, *Южно-Сибирский научный вестник*, 4(24), 196–201 (2018).
6. A.A. Кухленко, М.С. Василишин, С.Е. Орлов, *Инженерно-физический журнал*, 93, 3, 674–684 (2020).
7. П.Г. Ганин, А.А. Шмидт, *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Физико-математические науки*, 1(116), 29–36 (2011).
8. Н.Е. Шлегель, А. Клименко, *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*, 10, 1(37), 19–40 (2024). DOI: 10.21684/2411-7978-2024-10-1-19-40.
9. В.В. Харьков, А.Н. Николаев, *Химическая промышленность сегодня*, 1, 16–21 (2017).
10. О.С. Дмитриева, В.В. Харьков, А.Н. Николаев, *Вестник технологического университета*, 27, 5, 54–58 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_5_54.
11. В.Н. Быков, Т.Е. Лаврентьев, *Инженерно-физический журнал*, 31, 6, 1074–1078 (1976).
12. А.А. Овчинников, В.В. Харьков, *Вестник Казанского технологического университета*, 17, 23, 322–325 (2014).
13. Д. Прандтль, *Гидроаэродинамика*. Издательство иностранной литературы, Москва, 1953.
14. М.С. Волынский, А.С. Липатов, *Инженерно-физический журнал*, 18, 5, 838–843 (1970).
15. С.В. Бухман, *Вестник Академии наук Казахской ССР*, 1, 38–43 (1954).
16. Ю.И. Даскал, *Известия ВУЗов. Энергетика*, 5, 65–69 (1983).
17. M. Wicks, A.E. Dukler, *Proceedings of 3-rd Int. Heat Transfer Conf.*, Chicago, 5, 33–49 (1966).
18. А.Н. Николаев, В.В. Харьков, *Вестник технологического университета*, 18, 18, 130–132 (2015).

References

1. M.A. Rahman, S.M. Hasnain, R. Zairov, *International Journal of Thermofluids*, 22, Article 100689 (2024). DOI: 10.1016/j.cep.2019.107679.
2. A. Kourou, S. Chen, Y. Ouyang, *Current Opinion in Chemical Engineering*, 46, Article 101056 (2024). DOI: 10.1016/j.coche.2024.101056.
3. V. Zinurov, V. Kharkov, E. Pankratov, A. Dmitriev, *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 12, 4, 336–346 (2022). DOI: 10.46604/ijeti.2022.9568.
4. X. Luo, L. Yang, H. Yin, L. He, Y. Lu, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 145, Article 107679 (2019). DOI: 10.1016/j.cep.2019.107679.
5. A.A. Kuhlenko, S.E. Orlov, M.S. Vasilishin, *YUzhno-Sibirskij nauchnyj vestnik*, 4(24), 196–201 (2018).
6. A.A. Kuhlenko, M.S. Vasilishin, S.E. Orlov, *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, 93, 3, 674–684 (2020).
7. P.G. Ganin, A.A. SHmidt, *Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo*

- universiteta. Fiziko-matematicheskie nauki*, 1(116), 29-36 (2011).
8. N.E. Shlegel', A. Klimenko, *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika*, 10, 1(37), 19-40 (2024). DOI: 10.21684/2411-7978-2024-10-1-19-40.
 9. V.V. Khar'kov, A.N. Nikolaev, *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*, 1, 16–21 (2017).
 10. O.S. Dmitrieva, V.V. Khar'kov, A.N. Nikolaev, *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, **27**, 5, 54–58 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_5_54.
 11. V.N. Bykov, T.E. Lavrent'ev, *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, **31**, 6, 1074–1078 (1976).
 12. A.A. Ovchinnikov, V.V. Khar'kov, *Herald of Kazan Technological University*, **17**, 23, 322–325 (2014).
 13. D. Prandtl', *Gidraerodinamika. Izdatel'stvo inostrannoj literatury*, Moskva, 1953.
 14. M.S. Volynskij, A.S. Lipatov, *Inzhenerno-fizicheskij zhurnal*, **18**, 5, 838–843 (1970).
 15. S.V. Buhman, *Vestnik Akademii nauk Kazahskoj SSR*, 1, 38–43 (1954).
 16. YU.I. Daskal, *Izvestiya VUZov. Energetika*, 5, 65–69 (1983).
 17. M. Wicks, A.E. Dukler, *Proceedings of 3-rd Int. Heat Transfer Conf.*, Chicago, 5, 33–49 (1966).
 18. A.N. Nikolaev, V.V. Khar'kov, *Herald of Technological University*, **18**, 18, 130–132 (2015).

© **В. В. Харьков** – к.т.н., доцент кафедры оборудования пищевых производств (ОПП), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, v.v.kharkov@gmail.com; **М. Г. Кузнецов** – к.т.н., доцент кафедры ОПП, КНИТУ; доцент кафедры Экономики и информационных технологий, Казанский государственный аграрный университет, max-genn@ya.ru; **А. Н. Николаев** – д.т.н., заведующий кафедрой ОПП, КНИТУ, andr_nik_nik@rambler.ru.

© **V. V. Khar'kov** – PhD (Technical sci.), Associate Professor, Department of Food Production Equipment (FPE), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, v.v.kharkov@gmail.com; **M. G. Kuznetsov** – PhD (Technical sci.), Associate Professor, the FPE department, KNRTU; Department of Economics and Information Technologies, Kazan State Agrarian University, max-genn@ya.ru; **A. N. Nikolaev** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Head of the FPE department, KNRTU, andr_nik_nik@rambler.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 04.04.25.

Дата принятия рукописи в печать – 15.06.25.