

Научная статья

УДК 631.3

doi: 10.34655/bgsha.2023.72.3.018

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОТДАЛЕНИЯ ВХОДНОГО ПАТРУБКА НА КАЧЕСТВО РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНОГО СЕПАРАТОРА ПРОДУКТОВ БИОКОНВЕРСИИ

Павел Викторович Токарев¹, Аркадий Николаевич Соловьев²

^{1,2}Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

¹ tokarev-pavel1995@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9620-749X>

² solovievarc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8465-5554>

Аннотация. Одним из перспективных направлений комплексного системного решения проблемы возрастающего избытка возобновляемых отходов сельского хозяйства и его перерабатывающих отраслей является биоконверсия возобновляемых видов сельскохозяйственного сырья и отходов его переработки в социально значимую продукцию высокого качества. Одной из важнейших операций биоконверсии является разделение готового продукта и сопутствующих материалов. Поэтому создание эффективного сепаратора продуктов биоконверсии при производстве кормов является актуальной задачей. Центробежные сепараторы, имея простую малогабаритную конструкцию, позволяют эффективно извлекать частицы твердой фракции из жидкости, при этом существенно экономя ресурсы. Одним из перспективных направлений совершенствования центробежных сепараторов является максимальное использования закрученного потока. В этой связи значительный интерес представляет повышение эффективности сепаратора продуктов биоконверсии при производстве кормов за счёт отдаления входного патрубка от входного торца рабочей камеры центробежного сепаратора при тангенциальном его расположении. В работе исследовано: кинематика потока частиц жидкой фракции технологического материала в зоне входа центробежного сепаратора при тангенциальном расположении входного патрубка; влияние отдаления входного патрубка центробежного сепаратора при тангенциальном его расположении на кинематику потока. При физико-математическом описании турбулентного потока использовались модели осреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. В процессе исследования кинематики потока использовался пакет универсальной программной системы метода конечно-элементного анализа ANSYS Fluent. Получены траектории движения и изолинии тангенциальной составляющей скорости потока частиц жидкой фракции технологического материала в зоне входа центробежного сепаратора продуктов биоконверсии при производстве кормов. Обосновано отдаление входного патрубка от входного торца рабочей камеры центробежного сепаратора.

Ключевые слова: центробежный сепаратор, биоконверсия, математическая модель, поток частиц, траектория движения частиц, изолинии скоростей.

INFLUENCE OF THE DISTANCE OF AN INLET PIPE ON PERFORMANCE OF A CENTRIFUGAL SEPARATOR OF BIOCONVERSION PRODUCTS

Pavel V. Tokarev¹, Arkady N. Solovyov²

^{1,2}Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

¹tokarev-pavel1995@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9620-749x>

²solovievarc@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-8465-5554>

Abstract. *One of the promising directions of a comprehensive, systematic solution to the problem of an increasing excess of renewable agricultural wastes and their processing industries is the bioconversion of renewable agricultural raw materials and wastes from its processing into socially significant high-quality products. One of the most important operations of bioconversion is the separation of the finished product and related materials. Therefore, the creation of an effective separator of bioconversion products in the production of feed is an urgent task. Centrifugal separators, having a simple small-sized design, make it possible to efficiently extract solid fraction particles from the liquid while significantly saving resources. One of the promising areas of improvement of centrifugal separators is the maximum use of swirling flow. In this regard, it is of considerable interest to increase the efficiency of the bioconversion products separator in the production of feed due to the distance of the inlet pipe from the inlet end of the working chamber of the centrifugal separator, with its tangential arrangement. The paper investigates the kinematics of the flow of particles of the liquid fraction of the process material in the inlet zone of the centrifugal separator with a tangential arrangement of the inlet pipe; the effect of the distance of the inlet pipe of the centrifugal separator with its tangential arrangement on the kinematics of the flow. Models of Reynolds-averaged Navier-Stokes equations were used in the physical and mathematical description of the turbulent flow. In the process of studying the flow kinematics, the package of the universal software system of the finite element analysis method ANSYS Fluent was used. The paths of movement and isolines of axial, radial and tangential components of the flow velocities of the particles of the liquid fraction of the process material in the inlet zone of the centrifugal separator of bioconversion products in the production of feed are obtained. The distance of the inlet pipe from the inlet end of the working chamber of the centrifugal separator is justified.*

Keywords: centrifugal separator, bioconversion, mathematical model, particle flow, particle path, velocity isolines.

Введение. В связи с прогрессирующим ростом населения существует проблема роста дефицита кормов, удобрений, энергоносителей, сырья для производства и других необходимых человечеству товаров. Одновременно с недостатком товаров существует катастрофический избыток возобновляемых отходов сельского хозяйства и его перерабатывающих отраслей, представляющих собой отходоёмкий сектор производства, в котором выход основных продуктов составляет всего 15-30% от массы исходного сырья, а остальная часть, содержащая значительное количество ценных веществ, не используется в производственных процессах и становится отходами,

основная масса которых малоэффективно утилизируется или подлежит захоронению. Наиболее перспективным направлением комплексного системного решения этих проблем является биоконверсия возобновляемых видов сельскохозяйственного сырья и отходов его переработки в социально значимые продукты высокого качества. Преимущества биоконверсии проявляются в повышении качества готовых продуктов и эффективности методов его получения по отношению к физико-химическим методам, повышении производительности, ресурсосбережении, высоком уровне экологической безопасности, возможности «точного» регулирования хода процесса, получения специ-

фичных и уникальных продуктов в качестве сырья использования отходов [1, 2, 3, 4].

Одной из важнейших операций биоконверсии является разделение готового продукта и сопутствующих материалов. Поэтому создание эффективного сепаратора продуктов биоконверсии при производстве кормов является актуальной задачей. Разделение дисперсных сред производится с помощью различных фильтров, отстойников, центробежных сепараторов. Центробежные сепараторы, имея простую малогабаритную конструкцию, позволяют эффективно извлекать частицы твердой фракции из жидкости, при этом существенно экономя ресурсы [5, 6, 7, 8, 9]. Одним из перспективных направлений совершенствования центробежных сепараторов является максимальное использования закрученного потока. В этой связи значительный интерес представляет повышение эффективности сепаратора продуктов биоконверсии при производстве кормов за счёт отдаления входного патрубка от входного торца рабочей камеры центробежного сепаратора при тангенциальном его расположении. Объектом исследования является зона входа технологического материала в рабочую камеру центробежного сепаратора.

Математическая постановка задачи. Для данного исследования в качестве модели технологического материала была использована Лагранжева модель DPM (Discrete Phase Model) с использованием математической модели на основе уравнений Навье-Стокса. Для моделирования турбулентности применена модель напряжений Рейнольдса [10, 11, 12].

В качестве условий на входных границах были принята цилиндрическая система координат, у которой задаются три компоненты скорости: радиальная, касательная и осевая.

Все стенки в данной модели сепаратора жесткие, неподвижные. Внутренние стенки гладкие с условием прилипания. Шероховатость стенок постоянная, равномерная, зернистая и её величина 0,5 мкм. Параметры были выбраны так, что-

бы при использовании модели Рейнольдсовых напряжений турбулентности сопротивление трубы соответствовало графику Никурадзе [13].

В качестве условий выходных границ задаются параметры возвратного потока и манометрическое давление, равное нулю. Возвратный поток может возникнуть, если в результате решения поток начнет вытекать через границу [14]. Направления возвратного потока задаются при помощи нормали к границе потока. Для решения задачи достаточно задать равномерный профиль турбулентных параметров:

- интенсивность турбулентности;
- отношение турбулентной вязкости.

Интенсивность турбулентности I определяется как отношение среднеквадратичной пульсации скорости u' к её осредненному значению \bar{u} :

$$I = \frac{u'}{\bar{u}} = 0,16 \cdot \text{Re}_{d_h}^{-1/8}, \quad (4)$$

где

$$u' = \sqrt{\frac{1}{3}(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)}, \quad \bar{u} = \sqrt{\frac{1}{3}(\bar{u}_x^2 + \bar{u}_y^2 + \bar{u}_z^2)},$$

Для ядра полностью развитого турбулентного течения в трубе можно использовать следующую эмпирическую зависимость [15, 16]:

$$I = 0,16 \cdot \text{Re}_{d_h}^{-1/8},$$

где Re_{d_h} – число Рейнольдса, рассчитанное по гидравлическому диаметру. Гидравлический диаметр – это отношение площади поперечного сечения канала к его периметру, для круглого канала равен диаметру.

$$\text{Re}_{d_h} = 77095500$$

$l=2\%$, что соответствует течению со средней турбулентностью.

Коэффициент турбулентной вязкости рассчитывается следующим образом [17]:

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\Omega} \quad (3)$$

где ν_t – коэффициент турбулентной

вязкости; α_1 – модельный коэффициент; k – константа Кармана; Ω – компонента тензора вектора завихренности.

Условия исследования. В данной работе с помощью программного комплекса ANSYS Fluent исследуется повышение эффективности вертикального центробежного сепаратора продуктов биоконверсии за счёт отдаления входного патрубка от входного торца рабочей камеры центробежного сепаратора на расстояниях r , $3r$, $5r$.

На основании анализа работ [18, 19, 20] были приняты следующие параметры, характеризующие качество потока частиц жидкости: траектория движения частицы жидкости; тангенциальная мгновенная скорость частицы жидкости в рабочей камере $v_{чж}^{ti}$ в м/с. В качестве фактора, способного оказывать влияние на качество потока частиц жидкости, рассматривались следующие три уровня отдаления: $l_{1r} = 15$ мм; $l_{3r} = 45$ мм; $l_{5r} = 75$ мм. Иссле-

дование проводилось в следующих условиях:

- плотность жидкости $\mu = 998$ кг/м³;
- коэффициент динамической вязкости жидкости $m = 0,001$ Па х с;
- тангенциальное расположение входного патрубка;
- массовая производительность $Q_m = 5$ кг/с;
- внутренний диаметр рабочей камеры $D_{вн.рк} = 150$ мм;
- внутренний радиус входного патрубка $r_{вн.п} = 15$ мм.

Результаты исследования. Рассмотрим случай, когда входной патрубок расположен на расстоянии $1r$ от входного торца рабочей камеры.

Анализ результатов численных экспериментов по схемам траекторий движения частиц жидкости (см. рис. 1) показал, что дополнительных завихрений нет, а режим потока частиц жидкости стационарный во времени и плавный переходный в пространстве.

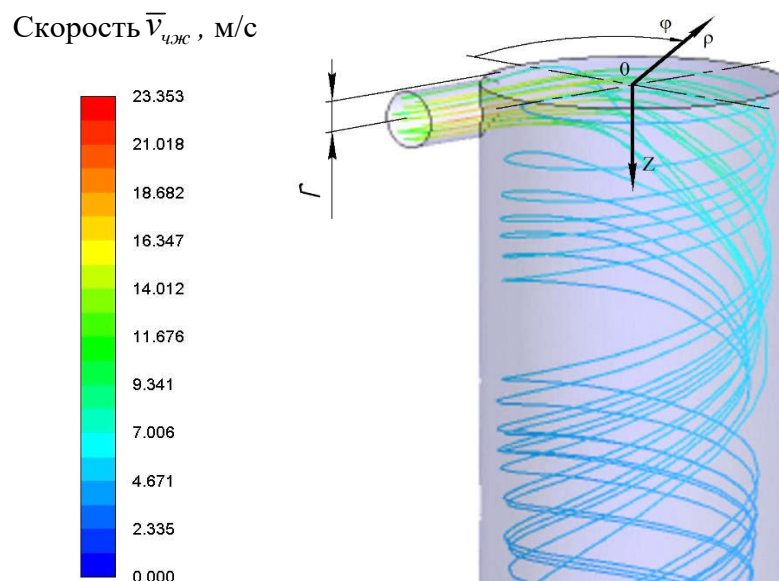


Рисунок 1. Схемы траекторий движения частиц жидкости при тангенциальном расположении входного патрубка на расстоянии $1r$

Анализ результатов численных экспериментов по схемам контуров изолиний скоростей движения частиц жидкости выполним для тангенциальной скорости, разбив зону входа технологического материала на две области: на уровне и после входного патрубка. Рассмотрим тангенциальную со-

ставляющую скорости (см. рис. 2).

В зоне входа рабочей камеры наблюдаются существенные различия в численных значениях тангенциальных составляющих скоростей движения частиц жидкости в рассматриваемых радиальных сечениях. При этом наблюдаются следующие закономерности:

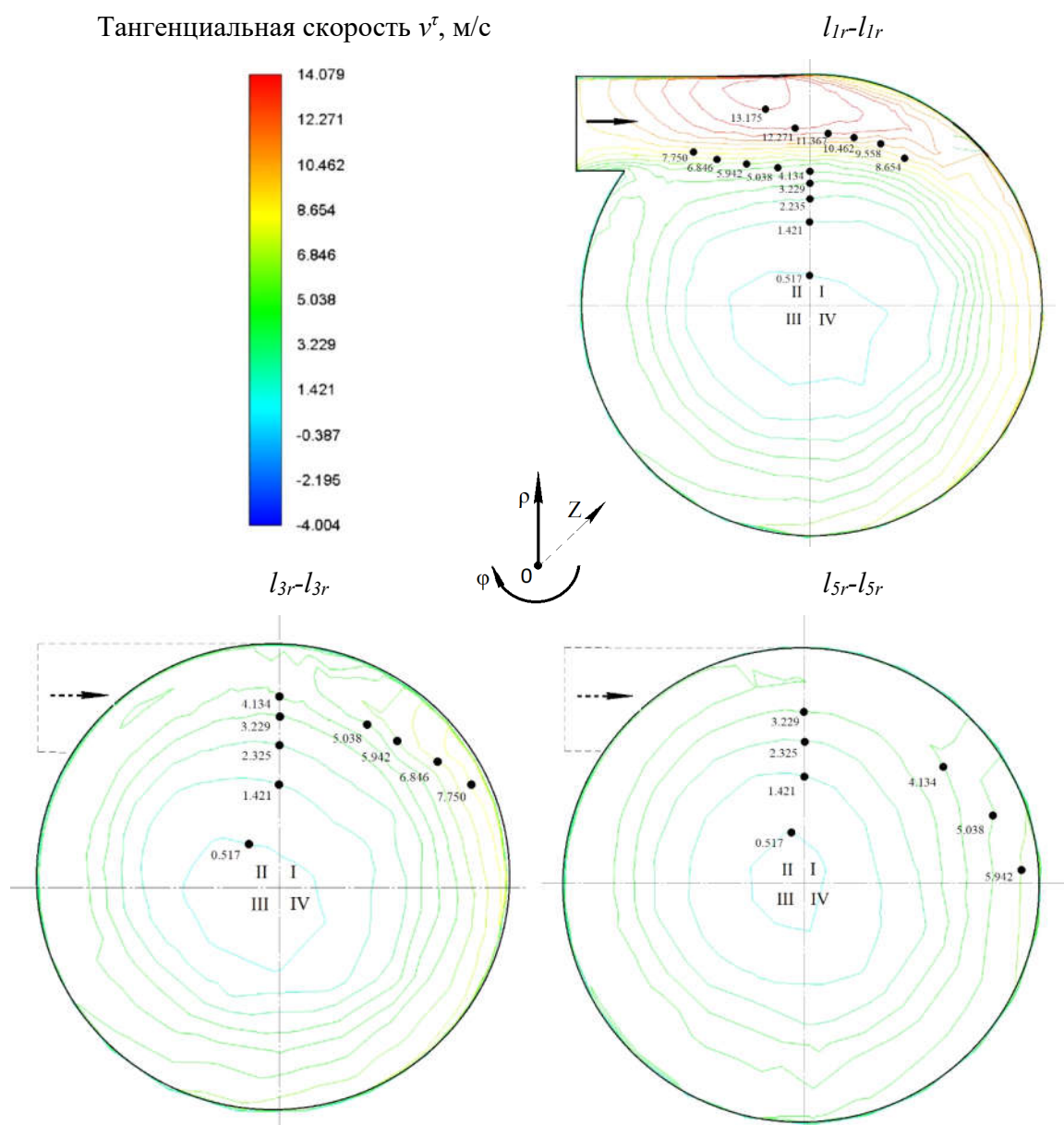


Рисунок 2. Схемы контуров изолиний тангенциальных составляющих скоростей движения частиц жидкости при тангенциальном расположении входного патрубка в радиальных сечениях рабочей камеры

- значения повышенных тангенциальных составляющих скоростей в рассматриваемых сечениях по мере их отдаления от входного торца рабочей камеры смещаются по направлению вращательного движения потока;

- значения тангенциальной составляющей скорости возрастают на периферии рабочей камеры, а уменьшаются в её центре, разница достигает более 10 раз.

Это говорит о струйном характере потока. Дополнительных, кроме основного вращения потока, завихрений в радиальной плоскости не наблюдаются. Также

отсутствуют завихрения в продольной плоскости рабочей камеры. Кинематика потока благоприятна для процесса центробежной сепарации технологического материала.

Рассмотрим случай, когда входной патрубок расположен на расстоянии $3r$ от входного торца рабочей камеры. Анализ результатов экспериментов схем траекторий движения частиц жидкости (рис. 3) показал, что режим потока частиц жидкости плавный переходный в пространстве и стационарный во времени, но наблюдаются дополнительные завихрения.

Скорость $\bar{v}_{\text{жж}}$, м/с

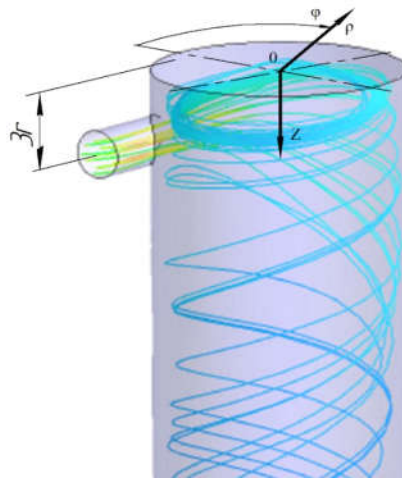
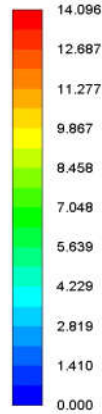
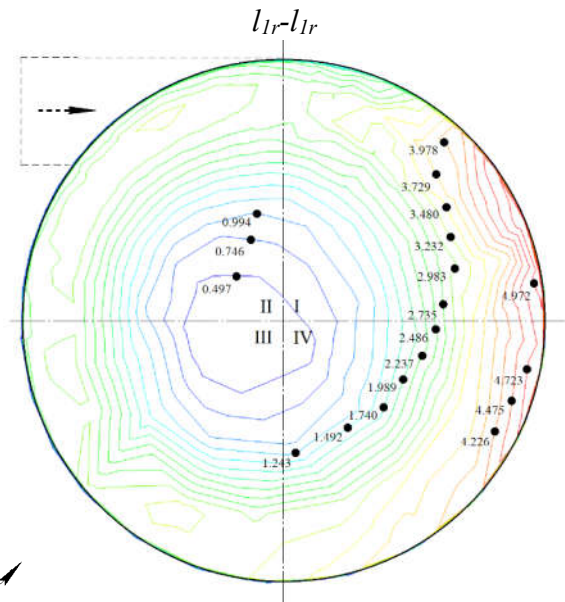
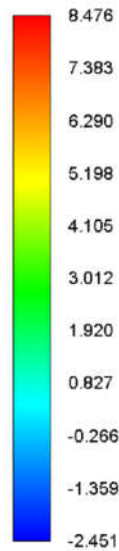
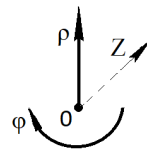
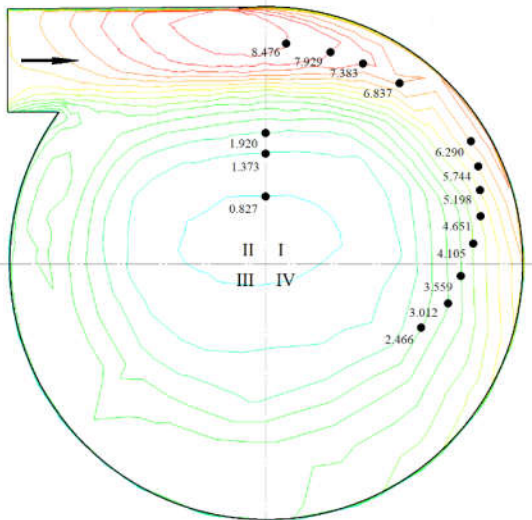


Рисунок 3. Схемы траекторий движения частиц жидкости при тангенциальном расположении входного патрубка на расстоянии $3r$

Тангенциальная скорость v^t , м/с



$l_{3r}-l_{3r}$



$l_{5r}-l_{5r}$

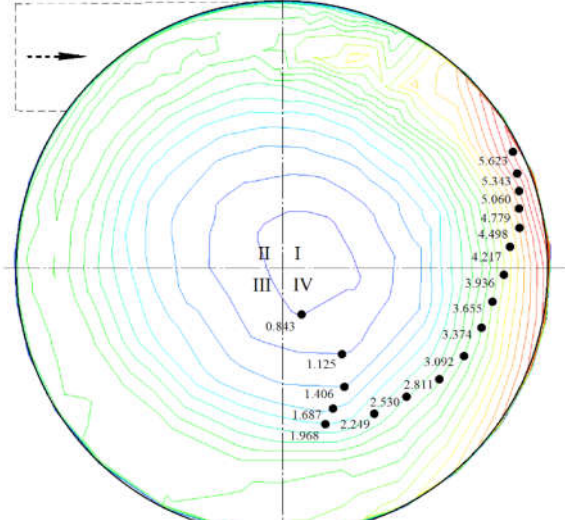


Рисунок 4. Схемы контуров изолиний тангенциальных составляющих скоростей движения частиц жидкости при тангенциальном расположении входного патрубка в радиальных сечениях рабочей камеры

При этом, в пространстве до входного патрубка наблюдается вращательное движение частиц жидкости вокруг центральной продольной оси рабочей камеры с малыми осевыми перемещениями, а в дальнейшем вращательно-поступательное движение.

Анализ результатов экспериментов схем контуров изолиний скоростей движения частиц жидкости для тангенциальной скорости, где зона входа технологического материала разбита на три области: до, на уровне и после входного патрубка (см. рис. 4).

В зоне входа рабочей камеры наблюдаются существенные различия в численных значениях тангенциальных составляющих скоростей движения частиц жидкости в рассматриваемых радиальных сечениях. При этом наблюдаются следующие закономерности: наибольшее численное значение тангенциальная составляющая скорости имеет на уровне входного патрубка, в пространстве после входного патрубка она снижается, а минимальные значения имеет в пространстве до входного патрубка; разброс численных

значений тангенциальных скоростей в каждом из рассматриваемых сечений – существенный, большие значения тангенциальная составляющая скорости имеет на периферии рабочей камеры, а меньшие – в её центре, причём разница составляет более 10 раз.

Всё это говорит о струйном характере потока. Наблюдаются дополнительные, кроме основного вращения потока вокруг главной продольной оси рабочей камеры, завихрения в радиальной плоскости в зоне после входного патрубка. Кинематика потока приемлемая для процесса центробежной сепарации технологического материала.

Рассмотрим случай, когда входной патрубок расположен на расстоянии $5r$ от входного торца рабочей камеры. Анализ результатов экспериментов схем траекторий движения частиц жидкости (см. рис. 5) показал, что режим потока частиц жидкости плавный переходный в пространстве и стационарный во времени, также наблюдаются дополнительные завихрения в пространстве до входного патрубка.

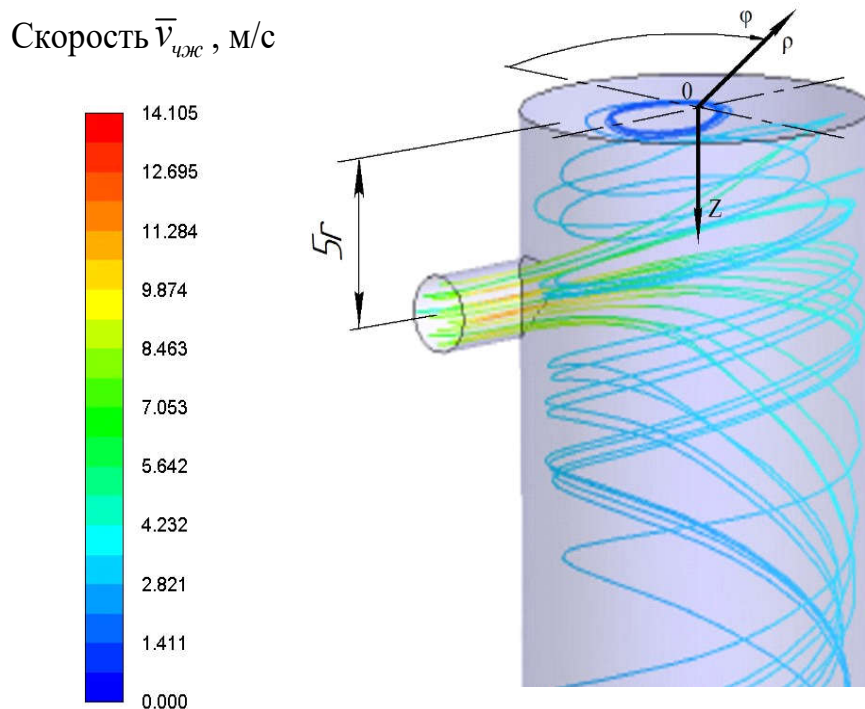


Рисунок 5. Схемы траекторий движения частиц жидкости при тангенциальном расположении входного патрубка на расстоянии $5r$

Рассмотрим тангенциальную составляющую скорости (см. рис. 6).

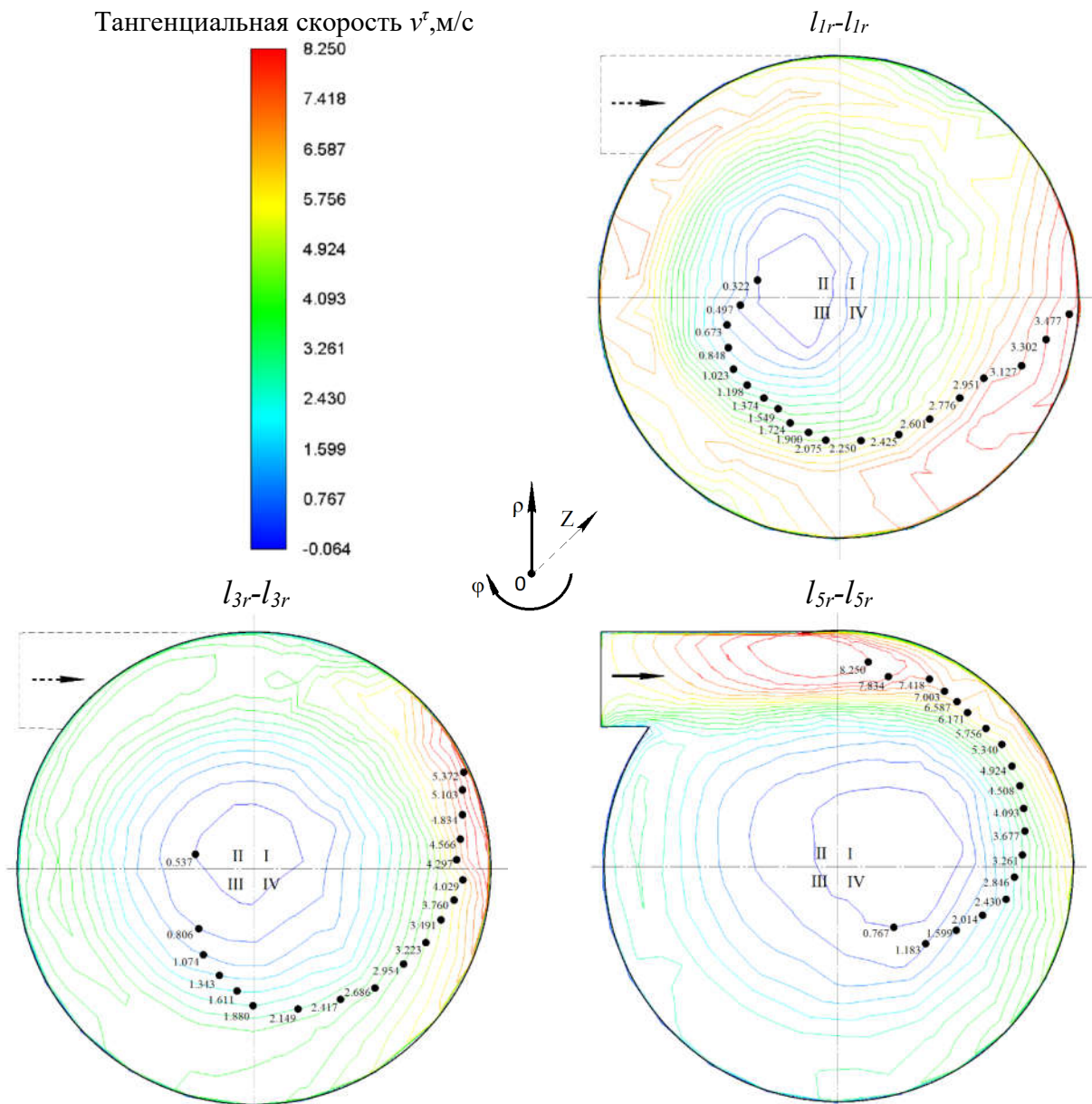


Рисунок 6. Схемы контуров изолиний тангенциальных составляющих скоростей движения частиц жидкости при тангенциальном расположении входного патрубка в радиальных сечениях рабочей камеры

В зоне входа рабочей камеры наблюдаются существенные различия в численных значениях тангенциальных составляющих скоростей движения частиц жидкости в рассматриваемых радиальных сечениях. При этом наблюдаются следующие закономерности:

- максимальное значение тангенциальная составляющая скорости имеет на уровне входного патрубка;
- наибольшие значения тангенциальная скорость имеет на периферии рабо-

чей камеры, а меньшие – в её центре, разница достигает более 10 раз;

- присутствуют дополнительные, кроме основного вращения потока вокруг главной продольной оси рабочей камеры, слабые завихрения в радиальной плоскости, что не может существенно сказаться на процессе центробежной сепарации технологического материала;
- отсутствуют завихрения в продольной плоскости рабочей камеры, что является важным для процесса сепарации;

- кинематика потока приемлемая для процесса центробежной сепарации технологического материала.

Заключение. На основании проведённого исследования кинематики потока частиц жидкости в зоне входа технологического материала центробежного сепаратора при тангенциальном расположении входного патрубка можно сделать выводы, что, независимо от расположения входного патрубка, режим потока частиц жидкости плавный переходный в пространстве и стационарный во времени; в пространстве до входного патрубка частицы жидкости совершают, в основном, вращательное движение вокруг центральной продольной оси рабочей камеры с малыми осевыми перемещениями разной направленности. В результате этого одно из условий технологического процесса, а именно перемещение технологического материала от входа к выходу рабочей камеры со средней скоростью, обеспечивающей производительность сепаратора, не выполняется; в пространствах на уровне и после входного патрубка частицы жидкости совершают поступательно-вращательное движение, что способствует выполнению технологического процесса; в пространстве до входного патрубка наблюдаются значительные завихрения в продольной и поперечных областях рабочей камеры, что препятствует выполнению технологического процесса. На уровне входного патрубка они снижаются, а в пространстве после входного патрубка отсутствуют, что благоприятно для выполнения технологического процесса; кинематика потока, в основном, приемлемая для процесса центробежной сепарации технологического материала, за исключением пространства до входного патрубка. Минимальное отдаление входного патрубка от входного торца рабочей камеры обеспечивает минимальное количество вредных завихрений и, следовательно, наиболее качественное функционирование центробежного сепаратора.

Список источников

1. Болотникова О.И., Михайлова Н.П., Базарнова Ю.Г., Аронова Е.Б., Болотникова Т.А., Акинина Ю.Н. Проблемы и перспективы использования микроорганизмов для утилизации отходов лигноцеллюлозы // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9. № 4. С. 679–693. doi: 10.21285/2227-2925-2019-9-4-679-693. EDN: DOUUXH
2. Ефимов О.Е., Ефимова Л.А. Биоконверсия в обеспечении экологической безопасности сферы деятельности человека // Успехи современной науки и образования. Белгород, 2017. С. 129-131. EDN: YGXHXB
3. Курбатова Е.И., Постникова В.Е., Тесля А.В., Алсивар С.К.А. Эффективные процессы биоконверсии растительного сырья и вср для получения функциональных продуктов питания // Научное обеспечение инновационных технологий производства и хранения сельскохозяйственной и пищевой продукции. Краснодар, 2014. С. 66-69. EDN: SYOFOT
4. Фоменко И.А., Керимова Г.М. Биоконверсия растительных отходов в кормовые и пищевые дрожжевые препараты // Новые технологии. 2022. Т. 18, № 1. С. 78-85. doi: 10.47370/2072-0920-2022-18-1-78-85 EDN: GDDORA
5. Валеев С.И., Булкин В.А. Применение гидроциклонов для очистки сточных вод в системе оборотного водоснабжения // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16. № 15. С. 294-295. EDN: RAJEEZ
6. Старостин А.Г., Федотова О.А., Кобелева А.Р. Очистка сточных вод от мелкодисперсных частиц на гидроциклоне // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология. 2020. №1. С. 99-112. doi: 10.15593/2224-9400/2020.1.08. EDN: XOVFPR
7. Морозов Ю.П., Пеньков П.М. Изучение возможностей повышения эффективности центробежной сепарации // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2020. № 3. С. 80-86. doi: 10.21440/0536-1028-2020-3-80-86. EDN: YWUUSG.
8. Пеньков П.М., Хамидулин И.Х. Исследования работы центробежного сепаратора при циркуляции легкой фракции // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXII Между-

народной научно-технической конференции. Екатеринбург, 19–20 апреля 2017 года. Екатеринбург: Издательство “Форт Диалог-Исеть”, 2017. С. 148-150. EDN: ZARWIH.

9. Моделирование процесса центробежной сепарации минеральных частиц в гравитационном поле с применением метода конечных элементов / М.А. Перепелкин, Е.С. Семькин, Л.К. Мирошникова, З.Г. Уфатова // Горная промышленность. 2022. № 1. С. 128-132. doi: 10.30686/1609-9192-2022-1-128-132 EDN: SZSVRA.

10. ANSYS Fluent, Release 19.2. Ansys Inc., 2018. 3504 с.

11. Рязских А.В. Моделирование разгонного течения ньютоновской жидкости в круглой трубе / А.В. Рязских // Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий (ПМТУКТ-2013) : сборник трудов VI международной конференции, Воронеж, 10–16 сентября 2013 года. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2013. С. 210-212. EDN: RTRHLN.

12. Павловский В.А., Чистов А.Л., Кучинский Д.М. Моделирование течений в трубах // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. 2019. Т. 15. Вып. 1. С.93–106. DOI: 10.21638/11702/spbu10.2019.107. EDN: RHGUDI

13. Nikuradze J. Laws of flow in rough pipes (English translation of Strömungsgesetze in rauhen Röhren, VDI-Forschungsheft 361, Ausgabe B, Bd 4. P. 1–22. July/August 1933). P. 63. Washington: NACA Technical Memo 1292, November 1950.

14. Федотов К.В., Сенченко А.Е. Моделирование движения двухфазного потока пульпы в центробежном сепараторе // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21. № 11. С. 30-35. doi: 10.18412/1816-0395-2017-11-30-35. EDN: ZQUBBV.

15. Грязев В. М. Исследование возможностей расчета шума реактивной струи с использованием программного обеспечения ANSYS Fluent // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 2. С. 302-312. EDN: YPDJNZ

16. Токарев П. В. Исследование влияния массовой производительности на качество работы центробежного сепаратора продуктов биоконверсии // Вестник аграрной науки Дона. 2022. Т. 15. № 3(59). С. 72-83. doi: 10.55618/20756704_2022_15_3_72-83.

EDN: YBHAEV

17. Bradshaw P., Ferris D.H., Atwell N.P. Calculation of Boundary Layer Development Using the Turbulent Energy Equation // Journal of Fluid Mechanics, Vol. 28. Pt. 3. Pp. 593-616.

18. Моделирование гидродинамических процессов в центробежном поле гидроциклонов / А.Б. Голованчиков, А.Е. Новиков, М.И. Ламскова, М.И. Филимонов. Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2017. 200с. EDN: XQKTCI

19. Исследование центробежного инерционного обезвоживателя сапропеля естественной влажности / В.Г. Игнатенков, М.Б. Тельпук, Е.Л. Лаппо [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2019. № 4(174). С. 161-165. EDN: DWZRPD.

20. Плеханов Н. Г. Влияние различных схем работы центрифуги на эффективность очистки загрязненных гидравлических масел // Механика XXI века. 2022. № 21. С. 105-109. EDN: TBOSIJ

References

1. Bolotnikova O.I., Mikhailova N.P., Bazarnova J.G., Aronova E.B., Bolotnikova T.A., Akinina J.N. Problems and prospects for the application of microorganisms in the disposal of lignocellulose waste. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2019; 9(4):679–693 (In Russ.)

2. Efimov O.E., Efimova L.A. Bioconversion in ensuring environmental safety of human activity. *The successes of modern science and education*. Belgorod, 2017. Pp. 129-131.

3. Kurbatova E.I., Postnikova V.E., Teslya A.V., Alsivar S.K.A. Effective processes of bioconversion of plant raw materials and HRV for obtaining functional food products. *Scientific support of innovative technologies for the production and storage of agricultural and food products*. Krasnodar, 2014. Pp. 66-69.

4. Fomenko I.A., Kerimova G.M. Bioconversion of plant wastes into feed and nutritional yeast preparations. *New technologies*. 2022;18(1):78-85 (In Russ.)

5. Valeev S.I., Bulkin V.A. The use of hydrocyclones for wastewater treatment in the circulating water supply system. *Bulletin of Kazan Technological University*. 2013;16(15):294-295 (In Russ.)

6. Starostin A.G., Fedotova O.A., Kobeleva A.R. Hydrocyclone wastewater treatment from fine particles. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*. 2020;1:99-112. (In Russ.)
7. Morozov I. P., Penkov P. M. Studying the possibilities of improving centrifugal separation efficiency. *Minerals and Mining Engineering = Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal Minerals and Mining Engineering = Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*. 2020;3:80-86 (In Russ.)
8. Penkov P.M., Khamidulin I.H. Studies of the operation of a centrifugal separator during the circulation of a light fraction. *Scientific foundations and practice of processing ores and technogenic raw materials: materials of the XXII International Scientific and Technical Conference*. 2017;148-150 (In Russ.)
9. Perepelkin M.A., Semykin E.S., Miroshnikova L.K., Ufatova Z.G. Modeling centrifugal separation process of mineral particles in gravity field using finite element method. *Russian Mining Industry*. 2022;(1):128–132 (In Russ.)
10. ANSYS Fluent, Release 19.2. Ansys Inc., 2018. 3504 p.
11. Ryazhskikh, A.V. Modeling of the acceleration flow of a Newtonian fluid in a round tube. *Modern Methods of Applied Mathematics, Control Theory and Computer Technologies (PMTUKT-2013): Proceedings of the VI International Conference*. 2013;210-212 (In Russ.)
12. Pavlovsky V.A., Chistov A.L., Kuchinsky D.M. Modeling of flows in pipes. *Vestnik of Saint Petersburg University. Applied mathematics. Computer science. Control processes*. 2019;15(1):93–106 (In Russ.)
13. Nikuradze J. Laws of flow in rough pipes (English translation of Strömungsgesetze in rauhen Rohren, VDI-Forschungsheft 361, Ausgabe B, Bd 4. P. 1–22. July/August 1933). P. 63. Washington: NACA Technical Memo 1292, November 1950.
14. Fedotov K.V., Senchenko A.E. The Motion Simulation of Two-phase Flow Pulp in a Centrifugal Separator. *Ecology and Industry of Russia*. 2017;21(11):30-35 (In Russ.)
15. Gryazev, V.M. Analysis capabilities of ANSYS fluent software for jet noise modelling. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki*. 2017;2:302-312 (In Russ.)
16. Tokarev P.V. Investigation of the influence of mass productivity on the quality of the centrifugal separator of bioconversion products. *Vestnik agrarnoy nauki Dona = Don agrarian science bulletin*. 2022;15-3(59):72–83 (In Russ.)
17. Bradshaw P., Ferris D.H., Atwell N.P. Calculation of Boundary Layer Development Using the Turbulent Energy Equation. *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 28. Pt. 3. Pp. 593-616.
18. Golovanchikov A.B., Novikov A.E., Lamskova M.I., Filimonov M.I. Modeling of hydrodynamic processes in the centrifugal field of hydrocyclones. Volgograd. Volgograd State Technical University, 2017. 200 p. (In Russ.)
19. Ignatenkov V.G. The study of centrifugal inertial dehydrator of spropel with natural moisture content. *Bulletin of altai state agricultural university*. 2019;4(174):161-165 (In Russ.)
20. Plekhanov N. G. Peculiarities of oil centrifuges application in BDM hydraulic drive. *Mechanics for the XXI century*. 2022;21:105-109 (In Russ.)

Информация об авторах

Павел Викторович Токарев – ассистент кафедры теоретической и прикладной механики, tokarev-pavel1995@mail.ru;

Аркадий Николаевич Соловьев – доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, solovievarc@gmail.com

Information about the authors

Pavel V. Tokarev – Assistant, Chair of Theoretical and Applied Mechanics, tokarev-pavel1995@mail.ru;

Arkady N. Soloviev – Doctor of Science (Physics and Mathematics), Head of the Chair of Theoretical and Applied Mechanics, solovievarc@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 06.06. 2023; одобрена после рецензирования 16.07.2023; принята к публикации 22.08.2023.

The article was submitted 06.06.2023; approved after reviewing 16.07.2023; accepted for publication 22.08.2023.