

7. Ivochkin, Yu.P. *Issledovanie mekhanizmov termogidrodinamicheskikh i MGD protsessov s zhidkometallicheskimimi rabochimi telami*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Study of the mechanisms of thermohydrodynamic and MHD processes with liquid metal working bodies. Dr. tech. sci. diss.]. Moscow, 2015. 407 p.

8. Murthy, A., Szekely, J., El-Kaddah, N. Experimental measurement and numerical computation of velocity and turbulence parameters in a heated liquid metal system. *Metallurgical Transactions B*, 1988, vol. 19, no. 10, pp. 765–775.

9. Kukharev, A.L., Korsunov, K.A., Sergienko, S.N. Raschet parametrov elektricheskoy dugi v elektroprechnykh ustanovkakh dlya proizvodstva stali i ferrosplavov [Calculation of electric arc parameters in electric furnace for the production of steel and ferroalloys]. *Sbornik nauchnykh trudov*

Donbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2017, no. 5(48), pp. 52–57.

10. Kukharev, A.L., Petrenko, V.V. Eksperimental'naya mnogiektrodnaya ustanovka dlya issledovaniya energeticheskikh protsessov v tokoprovodyashchikh rasplavakh [Experimental multielectrode installation for the study of energy processes in conducting melts]. *Resursosberegayushchie tekhnologii proizvodstva i obrabotki davleniem materialov v mashinostroenii*, 2018, no. 4(25), pp. 64–71.

11. Dement'ev, S.B., Chaykovskiy, A.I., Chudnovskiy, A.Yu. Formirovanie elektrovikhrevykh techeniy v vannakh s mnogiektrodnym tokopodvodom [Generation of electrovortex flows in liquid-metal baths with a multielectrode current input]. *Magnitnaya gidrodinamika*, 1988, no. 1, pp. 85–89.

Кухарев Алексей Леонидович,

ГОУВПО «Луганский национальный университет имени Владимира Даля», кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики и транспортных систем, e-mail: alex.kuharev@mail.ru

Kukharev Aleksei Leonidovich,

Lugansk Vladimir Dahl National University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Mining Electromechanics and Transport Systems Department, e-mail: alex.kuharev@mail.ru

УДК 66.047

УСЛОВИЯ И КОНСТРУКТИВНЫЕ МЕРЫ МАСШТАБНОГО ПЕРЕХОДА ОТ ЛАБОРАТОРНЫХ УСТАНОВОК К ПРОМЫШЛЕННЫМ ОБРАЗЦАМ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СУШИЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ ВИХРЕВОГО ТИПА

А.И. СОКОЛЬСКИЙ, Е.В. ГУСЕВ, О.Б. КОЛИБАБА

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: tevp@tvp.ispu.ru; gusev_pcm@mail.ru; koli-baba@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса. Аппараты вихревого и циклонного типов находят все большее распространение для интенсивного протекания совмещенных технологических процессов обработки (тонкого измельчения, классификации, сушки, смешения, гидрофобизации и др.) дисперсных материалов. Одним из видов данного класса оборудования с активным гидродинамическим режимом являются аппараты с восходящим (или с нисходящим) спирально-закрученным газодисперсным потоком. Исследованию подобных устройств посвящены работы А.Ф. Фролова, В.И. Муштаева, В.М., Ульянова, Б.С. Сажина, которые подтверждают высокую эффективность сушки высоковлажных дисперсных материалов. Одной из задач масштабного перехода от лабораторных установок к промышленным образцам является разработка конструктивных особенностей, определяющих подобие гидродинамических режимов протекающих теплообменных процессов.

Материалы и методы. Для определения гидродинамических характеристик газодисперсного потока использованы методы, основанные на измерении расходов, скоростей, гидравлических сопротивлений. Для снятия кривых сушки и температурных кривых полидисперсного материала (зола гидроудаления ТЭС) различной фракции при различных условиях конвективного подвода теплоты применен

кинетический метод, основанный на измерении влажности (массы) и температуры высушиваемых частиц путем отбора по ходу их движения.

Результаты. Определены условия и конструктивные меры для создания гидродинамических и теплообменных режимов термообработки дисперсных материалов при переходе от лабораторных конструкций к промышленным аппаратам без промежуточных затратных исследований на пилотных установках. Приведены обобщающие аналитические и экспериментальные данные по определению внешних теплообменных характеристик процесса сушки дисперсного материала (зола гидроудаления) в вихревой сушилке в зависимости от гидродинамических и структурных параметров газодисперсного потока.

Выводы. Представленные экспериментальные данные позволяют говорить о лимитирующем влиянии гидродинамических явлений, определяющих эффективность протекания процесса сушки дисперсных материалов в газовом потоке.

Ключевые слова: гидродинамика, теплообмен, сушильный агрегат вихревого типа, газодисперсный поток, зола гидроудаления, полидисперсные материалы, теплообменные характеристики

TERMS AND CONSTRUCTIVE MEASURES OF TRANSITION FROM LABORATORY INSTALLATIONS TO INDUSTRIAL DESIGN OF VORTEX DRYERS

A.I. SOKOLSKY, E.V. GUSEV, O.B. KOLIBABA
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru; gusev_pcm@mail.ru

Abstract

Background. Vortex and cyclone apparatuses are increasingly used for intensive flow of combined technological processes of processing (fine grinding, classification, drying, mixing, hydrophobization, etc.) dispersed materials. One of the types of equipment of this class with an active hydrodynamic regime is an apparatus with an upward (or downward) spiral-swirling gas-dispersed flow. The studies conducted by A.F. Frolov, V.I. Mushtaev, V.M., Ulyanov and B.S. Sazhin confirm the high drying efficiency of highly moist dispersed materials. One of the tasks of a large-scale transition from laboratory facilities to industrial designs is the development of design features that determine the similarity of the hydrodynamic regimes of heat and mass transfer processes.

Materials and methods. To determine the hydrodynamic characteristics of the gas-dispersed flow, methods based on the measurement of flow rates, velocities and hydraulic resistances were used. To establish the drying curves and the temperature curves of the polydisperse material (TPP hydraulic ash removal) of different fractions under various conditions of convective heat input, the kinetic method was applied. This method was based on measuring the moisture (mass) and temperature of the dried particles by selecting along their movement.

Results. The developed conditions and design measures allow for a large-scale transition from laboratory facilities to industrial designs without intermediate costly research on pilot plants. The generalized analytical and experimental data on the determination of the external heat and mass transfer characteristics of the drying process of dispersed material (hydraulic ash removal) in a vortex dryer depending on the hydrodynamic and structural parameters of the gas-dispersed flow have been presented.

Conclusions. The presented experimental data allow suggesting the limiting effect of hydrodynamic phenomena that determine the efficiency of the drying process of dispersed materials in a gas stream.

Key words: hydrodynamics, heat and mass transfer, vortex-type drying unit, gas-dispersed flow, hydraulic ash removal, polydispersed materials, heat and mass transfer characteristics

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.2.022-029

Введение. До настоящего времени математическое и физическое моделирование, их сочетание являются основой разработки и проектирования теплотехнологического сушильного оборудования.

Однако опыт его эксплуатации показал, что из-за гидродинамических неоднородностей в газодисперсном слое оптимальные режимы, выбранные на основе моделирования, часто полностью не реализуются [1, 2].

Одной из основных причин, снижающих эффективность сушильных аппаратов при увеличении их размеров, является неравномерность распределения потоков и соотношения фаз по рабочему сечению за счет флуктуации и уменьшения скоростей движения газодисперсного слоя по длине (высоте) сушилки. Для объяснения этого эффекта разработана теория масштабного перехода, основанная на гидродинамической природе экспериментальных стенов, позволяющих стабилизировать структуру потоков путем различных конструктивных мер без технологических испытаний [1–3].

Поэтому для осуществления масштабного перехода от лабораторных установок к промышленным сушильным агрегатам вихревого типа необходимо в первую очередь изучение гидродинамической обстановки и определение путей усиления продольного перемешивания и циркуляции потоков по сечению и длине аппарата.

Сушильные агрегаты вихревого типа с восходящим и нисходящим закрученным газодисперсным потоком находят все большее применение для интенсивного обезвоживания высоковлажных тонкодисперсных материалов [4, 10]. Результаты гидродинамических исследований эффективности и структуры газодисперсных потоков в лабораторных аппаратах могут являться исходными данными для разработки конструкции промышленного масштаба. Сочетание гидродинамического и тепло-массообменного моделирования сушильных агрегатов вихревого типа позволяет в целом эффективно управлять движением спирально закрученных газового и тонкодисперсного потоков в рабочем пространстве промышленного аппарата [6, 8].

Ниже определяются условия масштабного перехода от лабораторных установок к промышленным образцам при проектировании сушильных агрегатов вихревого типа со спирально-закрученным восходящим газодисперсным потоком на основе исследования их гидродинамики и тепло-массообмена.

Методы исследования. Для исследования гидродинамики закрученного по спирали восходящего газодисперсного потока была смонтирована лабораторная сушильная установка, которая состоит из следующих основных узлов: сушильной камеры, вращающегося ротора с лопастями, ка-

мер завихрения и измельчения и систем подачи влажного материала и сепарации.

Закручивание потока в сушильной камере осуществлялось за счет вихрепреобразователя, состоящего из изогнутых по дуге пластинок, расположенных равномерно на полном диске.

Регулирование скорости восходящего газодисперсного слоя в сушильной камере осуществлялось за счет изменения частоты вращения ротора и геометрии лопастей и их расположения.

На рис. 1 представлена аэродинамическая схема вихревого аппарата. Движение газовой фазы в рабочей зоне сушилки обусловлено скоростным напором теплоносителя, выходящего из завихрителя 5, а также действием центробежной силы, создаваемой лопастями 3 турбулизатора 2 при его вращении.

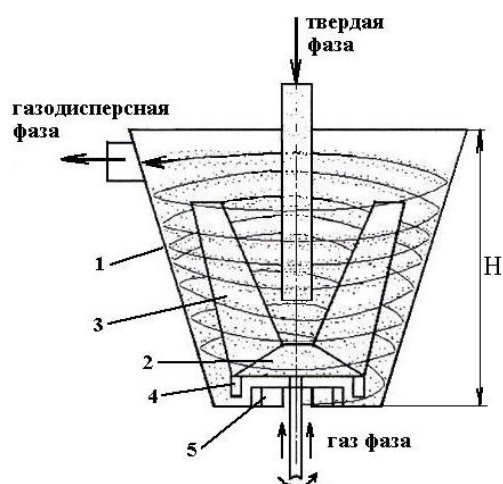


Рис. 1. Схема движения потоков в вихревом аппарате: 1 – камера; 2 – турбулизатор; 3 – лопасти; 4 – била; 5 – завихритель

Газодисперсная фаза движется по восходящей спирали в кольцевом зазоре между корпусом 1 аппарата и вращающимися лопастями 3 турбулизатора 2 в верхнюю часть вихревой камеры. Особенностью конструкции вихревой сушилки с активными гидродинамическими режимами является то, что непрерывный тепло- и массообмен между твердыми частицами и газовой средой происходит в условиях, постоянно меняющихся по высоте камеры скоростей, температур и влажностей взаимодействующих фаз.

Аэродинамическая обстановка движущейся газовой фазы по криволинейной траектории в вихревой сушильной камере

определялась с учетом действия комплекса сил в режиме идеального вытеснения твердой фазы при полном контакте поверхности частиц с теплоносителем. При этом уравнение движения частицы по криволинейному каналу имеет в следующий вид:

$$\frac{d(m_c \vartheta)}{d\tau} = G_c + F_{aэ} + F_{арх} + F_{тр} + F_c, \quad (1)$$

где G_c , $F_{aэ}$, $F_{арх}$, $F_{тр}$, F_c – силы веса, аэродинамическая, архимедова, трения и центробежная соответственно.

Определение этих главных сил основано на конструктивно меняющихся размерах дисперсных частиц, сушилки, а также на изменениях тангенциальных и осевых скоростей газа и твердой фазы по высоте рабочей камеры. При этом интенсивность теплообмена газодисперсного потока зависит не только от гидродинамического напора, но и от количественной характеристики соотношения расходных газовой и твердой фаз [8–10].

Для проведения численного расчета динамики скоростей газовой и твердой фаз полидисперсный поток частиц рассматривался как монодисперсный за счет усреднения технологических параметров фаз по траектории движения частиц, разбитой на множество рабочих зон малых высотных участков Δz . Так как лопастной ротор и корпус сушилки имеют коническую форму, то производился учет изменения их диаметров по высоте газодисперсного потока по i -м зонам в следующем виде:

$$D_{i+1} = D_i + 2tg(\gamma)\Delta z; \quad (2)$$

$$d_{p,i+1} = d_{p,i} + 2tg(\theta)\Delta z,$$

где γ , θ – углы конусности корпуса и рабочих элементов ротора.

Общее время пребывания частицы в вихревом аппарате с газодисперсным потоком определяется как сумма всех элементарных времен пребывания:

$$\bar{\tau} = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta \bar{\tau}_i = \sum_{i=1}^{i=n} \left(\frac{\Delta z_i}{\vartheta_{Ti}} \right). \quad (3)$$

Результаты исследования. В результате проведенных аэродинамических исследований в аппарате с восходящим спирально-закрученным газодисперсным потоком установлено следующее:

– напор, создаваемый теплоносителем, теряется на преодолении сил трения и на создании закрученного потока дисперсного материала;

– частицы твердой фазы движутся по той же траектории, что и газовая фаза, но с меньшими скоростями, т. е. за одинаковое время газовая фаза проходит больший путь по восходящей спиральной траектории, чем твердая фаза;

– для устранения зависания изменяющихся по массе и размеру высушиваемых частиц на определенном высотном уровне рабочей камеры сушилки бесконечно длительное время необходимо соблюдение равенства осевой скорости и скорости витания частиц.

Особенностью представленной конструктивной схемы вихревой сушилки с активными гидродинамическими режимами является то, что непрерывный тепло- и массообмен между твердыми частицами и газовой средой происходит в условиях, постоянно меняющихся по высоте камеры скоростей, температур и влагосодержаний взаимодействующих фаз.

В качестве примера приведено исследование кинетических закономерностей сушки дисперсного материала золы гидроудаления Ивановской ТЭС-2 с влажностью 81,8 и 43 % [13].

Изменение размеров твердых влажных частиц и кажущейся плотности (массы) при движении их в тепловом закрученном газовом потоке происходит в результате испарения влаги.

В связи с этим в сушильной вихревой установке были сняты фракционные кривые сушки и температурные кривые золы, а также кривые изменения температуры теплоносителя по высоте камеры при расходе воздуха 14,4 кг/ч и материала 0,75 кг/ч, которые приведены на рис. 2, 3.

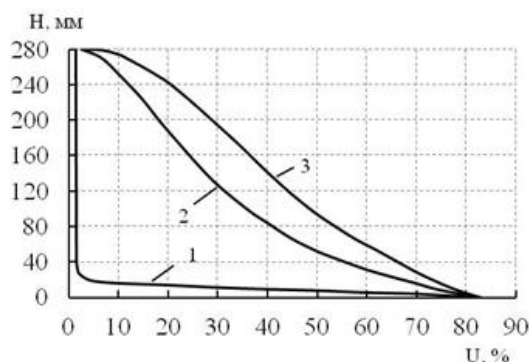


Рис. 2. Изменение фракционной влажности золы по высоте камеры при $t_s = 150^\circ\text{C}$: 1 – $d = 28$ мкм; 2 – $d = 90$ мкм; 3 – $d = 152$ мкм

Кривые на рис. 2 убедительно свидетельствуют о том, что размеры частиц влияют на время их термообработки, т. е. с увеличением диаметра частиц золы продолжительность сушки возрастает.

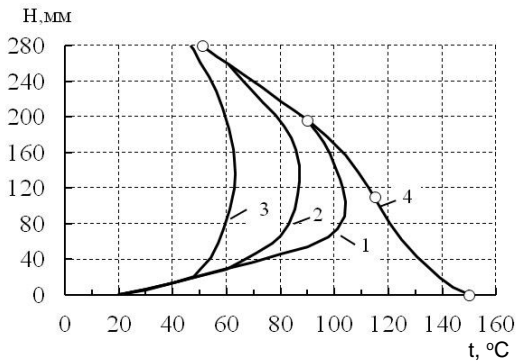


Рис. 3. Изменение фракционной температуры золы и температуры воздуха по высоте камеры: 1 – $d = 28$ мкм; 2 – $d = 90$ мкм; 3 – $d = 152$ мкм; 4 – температура воздуха

Анализ кривых на рис. 3 показывает, что температура газа непрерывно уменьшается по высоте камеры, а кривые, характеризующие температуры частиц, имеют своеобразный вид. Более крупные частицы в основном прогреваются находясь в зоне завихрителя, затем их температура по мере продвижения к выходу снижается. Более мелкие частицы (28 мкм) до момента поднятия на высоту 50 мм практически успевают высохнуть и прогреться до температуры газа. В дальнейшем происходит остывание газа за счет насыщения парами испаряемой влаги из частиц более крупных размеров и остывания частиц за счет теплообмена с газом.

На основании полученных экспериментальных данных следует отметить, что интенсивность протекающих тепло- и массообменных процессов в вихревой сушилке связана с изменением гидродинамической структуры газодисперсного потока по высоте аппарата [12].

Экспериментальными исследованиями также установлено, что интенсивность тепломассообмена газодисперсного потока зависит не только от гидродинамического напора, но и от количественной характеристики соотношения расходных твердой и газовой фаз.

Между коэффициентами теплоотдачи α и массоотдачи β и расходной концентрацией дисперсной твердой фазы μ в пристеночном слое с учетом интенсивности отно-

сительного движения фаз установлена корреляционная связь в виде следующих критериальных уравнений по определению критериев Нуссельта и Шервуда:

$$Nu = \frac{\alpha R}{\lambda_{\Gamma}} = 0,65 Re \cdot e^{(5,5\mu - 3,88 + 0,005 Re)}, \quad (4)$$

$$Sh = \frac{\beta R}{D_{\Gamma}} = 0,75 Re \cdot e^{(11,8\mu - 6,88 + 0,012 Re)}, \quad (5)$$

где $\mu = \frac{G_{\Gamma}}{G_{\Gamma}} = f(Re, t_c, U_H)$ – массовая рас-

ходная концентрация дисперсной твердой фазы в пристеночном движущимся слое;

$Re = \frac{u R}{\nu_{\Gamma}} = 400 \div 1000$ – критерий Рейнольдса;

u – относительная скорость газодисперсного потока; R – определяющий размер (радиус лопастного ротора); λ_{Γ} , ν_{Γ} – коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости теплоносителя; D_{Γ} – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе.

На рис. 4, 5 приведены изменения критериев Нуссельта и Шервуда для различных фракций золы гидроудаления по высоте аппарата при следующих технологических параметрах: $t_c = 250$ °C; $G_{\Gamma} = 14,4$ кг/ч; $\mu = 0,06-0,15$ кг/кг; начальное влагосодержание материала $U_H = 0,43$ кг/кг.

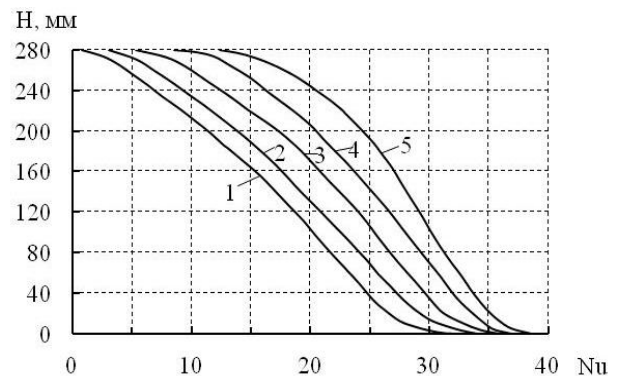


Рис. 4. Изменение критерия Nu по высоте аппарата: 1 – 28 мкм; 2 – 90 мкм; 3 – 152 мкм; 4 – 215 мкм; 5 – 325 мкм

Анализ кривых (рис. 4, 5) показывает, что значения критериев Нуссельта и Шервуда снижаются с уменьшением фракционных размеров частиц по ходу восходящего движения материала к выходу установки. Это связано с уменьшением суммарной относительной скорости движения частиц и кажущейся плотности материала при сушке.

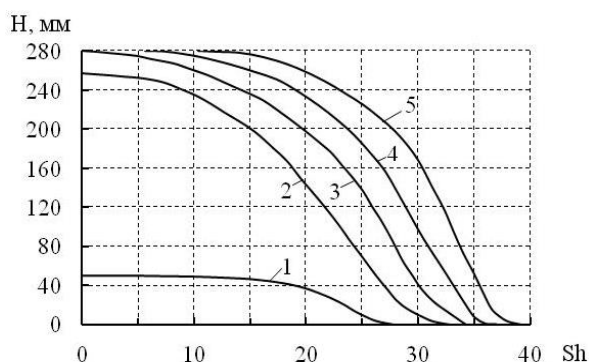


Рис. 5. Изменение критерия Sh по высоте аппарата: 1 – 28 мкм; 2 – 90 мкм; 3 – 152 мкм; 4 – 215 мкм; 5 – 325 мкм

На снижение конечного влагосодержания высушиваемых частиц материала (зола) оказывает непосредственное влияние содержание дисперсной твердой фазы в пристеночном движущемся газодисперсном слое и рост температуры теплоносителя (рис. 6).

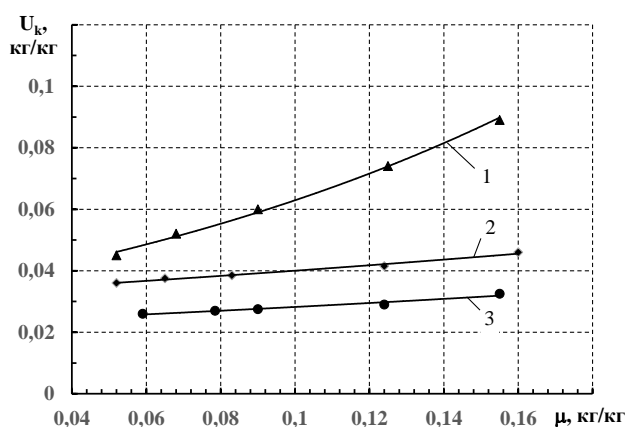


Рис. 6. Влияние расходной концентрации твердой фазы на конечное влагосодержание при $G_r = 14,4$ кг/ч; $U_n = 0,818$ кг/кг; t_c : 1 – 150 °C; 2 – 200 °C; 3 – 250 °C

В результате проведенных исследований установлено, что регулирование тангенциальной скорости газа как на выходе из завихрителя, так и по высоте рабочей камеры и в конечном счете продолжительности пребывания частиц в зоне термообработки связано в основном с геометрией расположения лопастей и частотой вращения ротора.

Результаты исследования по гидродинамике и тепломассообмену в вихревой сушильной установке с восходящим спирально-закрученным газодисперсным потоком говорят о возможности прямого мас-

штабного перехода к промышленному использованию данного типа сушилок на основе рассмотренных гидродинамических и структурных параметров. Об этом свидетельствует практика внедрения сушильного агрегата вихревого типа на промышленных предприятиях для термообработки асбеста, стеарата цинка, белой сажи, тальковой руды, огнетушащего порошка.

Выводы. Установлено прямое влияние гидродинамических параметров спирально-закрученного газового потока на интенсивность сушки высоковлажных дисперсных материалов в виде представленных критериальных зависимостей.

Возможность регулирования скорости вращения, температуры и фазового состава газодисперсного потока и его геометрии движения позволяет установить оптимальные параметры сушки тонкодисперсного материала и при масштабном переходе к промышленной установке свести значение коэффициента масштабного перехода ближе к единице.

Установленные в результате проведенного анализа возможностей сушильного агрегата вихревого типа с управляемой гидродинамикой закрученного газодисперсного потока конструктивные меры и условия управления гидродинамикой закрученного газодисперсного потока в сушильной камере позволят осуществить масштабный переход от лабораторных установок к промышленным аппаратам при проектировании сушильных агрегатов вихревого типа.

Список литературы

1. **Масштабный** переход в химической технологии: разработка промышленных аппаратов методом гидродинамического моделирования / А.М. Розен, Е.И. Мартюшин, В.М. Олевский и др.; под ред. А.М. Розина. – М.: Химия, 1980. – 320 с.
2. **Фролов В.Ф.** Моделирование сушки дисперсных материалов. – Л.: Химия, 1987. – 208 с.
3. **Муштаев В.И., Ульянов В.М.** Сушка дисперсных материалов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.
4. **Сажин, В.Б., Сажин, Б.С.** Научные основы стратегии выбора эффективного сушильного оборудования / под общ. ред. Б.С. Сажина. – М.: Химия, 2013. – 554 с.
5. **Экспериментальные** исследования особенностей гидродинамики вихревых аппаратов / Б.С. Сажин, А.С. Белоусов, М.Б. Сажин.

на и др. // Успехи в химии и химической технологии. – 2010. – Т. XXIV, № 1. – С. 117–119.

6. **Особенности** гидродинамики вихревых сушилок / Б.С. Сажин, М.Б. Сажина, Л.М. Кочетов и др. // Успехи в химии и химической технологии. – 2010. – Т. XXIV, № 1. – С. 110–115.

7. **Сажин, Б.С., Сажин В.Б.** Основные проблемы сушки дисперсных материалов, научно-практический анализ и решение // Успехи в химии и химической технологии. – 2008. – Т. XXII, №1. – С. 98–111.

8. **Аэромеханика** газодисперсного потока в вихревой камере / А.И. Сокольский, С.В. Федосов, С.А. Сокольский, Е.П. Барулин // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2005. – Т. 48, вып. 3. – С. 81–85.

9. **Сокольский А.И.** Теплообмен в потоке газозвеси // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2005. – Т. 11, вып. 3. – С. 696–700.

10. **Сокольский А.И.** Сушилки с восходящим закрученным потоком газодисперсной фазы // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2005. – Т. 11, вып. 4. – С. 965–969.

11. **Сокольский А.И.** Инженерный метод расчета вихревого аппарата с восходящим газодисперсным потоком // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2006. – Т. 49, вып. 4. – С. 88–91.

12. **Сокольский А.И., Гусев Е.В.** Закономерности газодисперсного потока в конвективной вихревой сушилке // Материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф. «Информационная среда вуза». ИГАСУ. – Иваново, 2012. – С. 81–85.

13. **Сокольский А.И., Гусев Е.В., Данилов К.А.** Кинетика сушки дисперсного материала в аппарате вихревого типа // Сборник научных трудов по материалам круглого стола, посвященного научной школе акад. РААСН, д-ра техн. наук, проф. С.В. Федосова. – Иваново, 2013. – С. 76–79.

References

1. Rosen, A.M., Martyushin, E.I., Olevskiy, V.M. *Masshtabnyy perekhod v khimicheskoy tekhnologii: razrabotka promyshlennykh apparatov metodom gidrodinamicheskogo modelirovaniya* [Large-scale transition in chemical technology: the development of industrial apparatuses by the method of hydrodynamic modeling]. Moscow: Khimiya, 1980. 320 p.

2. Frolov, V.F. *Modelirovanie sushki dispersnykh materialov* [Modeling the drying of dispersed materials]. Leningrad: Khimiya, 1987. 208 p.

3. Mushtaev, V.I., Ul'yanov, V.M. *Sushka dispersnykh materialov* [Drying of dispersed materials]. Moscow: Khimiya, 1988. 352 p.

4. Sazhin, V.B., Sazhin, B.S. *Nauchnye osnovy strategii vybora effektivnogo sushil'nogo oborudovaniya* [Scientific basis of the strategy for choosing effective drying equipment]. Moscow: Khimiya, 2013. 554 p.

5. Sazhin, B.S., Belousov, A.S., Sazhina, M.B., Sazhin, V.B., Lopakov, A.V., Lopakov, A.V., Fitseva, N.A. *Eksperimental'nye issledovaniya osobennostey gidrodinamiki vikhrevykh apparatov* [Experimental studies of the hydrodynamics of vortex devices]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2010, vol. XXIV, no. 1, pp. 117–119.

6. Sazhin, B.S., Sazhina, M.B., Kochetov, L.M., Sazhin, V.B., Lopakov, A.V., Lopakov, A.V., Strazhdina, S.Yu. *Osobennosti gidrodinamiki vikhrevykh sushilok* [Features of the hydrodynamics of vortex dryers]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2010, vol. XXIV, no. 1, pp.110–115.

7. Sazhin, B.S., Sazhin, V.B. *Osnovnye problemy sushki dispersnykh materialov, nauchno-prakticheskiy analiz i reshenie* [The main problems of drying dispersed materials, scientific and practical analysis and solution]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2008, vol. XXII, no. 1, pp. 98–111.

8. Sokol'skiy, A.I., Fedosov, S.V., Sokol'skiy, S.A., Barulin, E.P. *Aeromekhanika gazodispersnogo potoka v vikhreвой kamere* [Aeromechanics of a gas-dispersed flow in a vortex chamber]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2005, vol. 48, issue 3, pp. 81–85.

9. Sokol'skiy, A.I. *Teplomassoobmen v potoke gazovzvesi* [Heat and mass transfer in a gas suspension stream]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2005, vol. 11, issue 3, pp. 696–700.

10. Sokol'skiy, A.I. *Sushilki s voskhodyashchim zakruchennym potokom gazodispersnoy fazy* [Dryers with a swirling upward flow of the gas-dispersed phase]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2005, vol. 11, issue 4, pp. 965–969.

11. Sokol'skiy, A.I. *Inzhenernyy metod rascheta vikhreвой apparata s voskhodyashchim gazodispersnym potokom* [An engineering method for calculating a vortex apparatus with an upward gas-dispersed flow]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2006, vol. 49, issue 4, pp. 88–91.

12. Sokol'skiy, A.I., Gusev, E.V. *Zakonomenosti gazodispersnogo potoka v konvektivnoy vikhreвой sushilke* [Patterns of a gas-dispersed flow in a convective vortex-dryer]. *Materialy XVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Informatsionnaya sreda vuza»*. IGASU [Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference 'University Information Environment'. IGASU]. Ivanovo, 2012, pp. 81–85.

13. Sokol'skiy, A.I., Gusev, E.V., Danilov, K.A. Kinetika sushki dispersnogo materiala v aparate vikhrevogo tipa [Kinetics of the drying of dispersed material in a vortex type apparatus]. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam kruglogo stola, posvyashchennogo nauchnoy shkole akad.*

RAASN, d-ra tekhn. nauk, prof. S.V. Fedosova [Proceedings of the round table dedicated to the academic school of acad. RAASN, Dr.-Eng., prof. S.V. Fedosova]. Ivanovo, 2013, pp. 76–79.

Сокольский Анатолий Иванович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Sokolsky Anatoly Ivanovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering, Professor, Thermal Technologies and Gas Supply Department, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Гусев Евгений Валентинович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: gusev_pcm@mail.ru; tevp@tvp.ispu.ru

Gusev Evgenie Valentinovich,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor, Thermal Technologies and Gas Supply Department, e-mail: gusev_pcm@mail.ru; tevp@tvp.ispu.ru

Колыбаба Ольга Борисовна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: koli-baba@mail.ru

Kolibaba Olga Borisovna,

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering, Sciences (PhD), Associate Professor, Thermal Technologies and Gas Supply Department, e-mail: koli-baba@mail.ru