

ISSN 1561-8358 (print)

УДК 66.047

Поступила в редакцию 12.05.2017

Received 12.05.2017

**П. В. Акулич, Д. С. Слижук***Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Беларусь***ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ  
СО ВСТРЕЧНЫМИ ПОТОКАМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

**Аннотация.** Обсуждаются результаты исследования термогидродинамических процессов в распылительной камере с прямоточным движением газа и встречными потоками. Верхнее устройство газораспределения в распылительной камере выполнено в виде системы решеток, а нижнее представляет собой патрубок с завихрителем, направленным вверх. В камере реализовано встречное взаимодействие потоков, причем нижний поток вводится в виде закрученной струи. Приведены результаты экспериментальных исследований осевой составляющей скорости газа, распределения температуры и коэффициента теплоотдачи в различных сечениях камеры. Коэффициент теплоотдачи определялся методом регулярного режима. Измерения проводились шарообразными датчиками из материалов с высокой теплопроводностью (меди, латуни) с зачеканенной по центру термопарой. Установлено, что верхняя система газораспределения в виде двух решеток (при отсутствии нижнего дополнительного ввода газа) позволяет достигнуть осесимметричного распределения коэффициента теплоотдачи, а следовательно, и газораспределения в распылительной камере. Для исследованного устройства наличие отверстия (сопла) около форсунки приводит к несимметричности профиля, неравномерности газораспределения и образованию малоактивных зон. Значения коэффициента теплоотдачи в центральной зоне камеры значительно выше, чем в периферийной зоне, что обусловлено струйным течением газа. При этом с удалением от перекрытия интенсивность теплообмена в центральной области камеры существенно снижается.

Показано, что дополнительный нижний ввод теплоносителя и создание режима встречных потоков приводит к значительному увеличению в 1,5–2 раза коэффициента теплоотдачи в центральной приосевой зоне и нижней части камеры и свидетельствует об активизации гидродинамического режима и интенсификации теплообмена. Это способствует более эффективному использованию объема камеры и повышению ее влагонепропускности.

**Ключевые слова:** распылительная сушка, теплообмен, гидродинамика, кинетика сушки, распределение температуры, регулярный режим, встречные струи

**Для цитирования:** Акулич, П. В. Термогидродинамические процессы в распылительной камере со встречными потоками теплоносителя / П. В. Акулич, Д. С. Слижук // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 3. – С. 72–79.

**P. V. Akulich, D. S. Slizhuk***A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***THERMOHYDRODYNAMIC PROCESSES IN A SPRAYING CHAMBER  
WITH COUNTER-CURRENT HEAT FLOWS**

**Abstract.** The article deals with the results of thermohydrodynamic processes in a spraying chamber with direct gas flow and counter-current flows. The upper gas distribution device in a spraying chamber is shaped as a grid system, while the bottom device represents a branch pipe with a swirler pointing upwards. The chamber features counter-current flow interactions, and the bottom flow is introduced as a swirling jet. The experimental calculations of gas axial flow rates, temperature and thermal conductivity distribution in different chamber sections are provided. The thermal conductivity properties were determined with the normal mode method. The study was performed with ball-shaped sensors made of materials with high thermal conductivity (copper, brass) with centered thermocouples.

The upper gas distribution system in the form of two grids (if no bottom gas inlet was involved) was found to build up an axisymmetric thermal conductivity model, and, consequently, the model-specific gas distribution in the spraying chamber. Referring to the study device, a hole (nozzle) near the burner results in asymmetric pattern, irregular gas distribution and generation of low-activity areas. Thermal conductivity values in the chamber central area turn to be higher than at the peripheral areas due to gas jet flow. Besides, heat exchange intensity in the chamber central area decreases significantly upon distance from the chamber floor.

An extra bottom inlet of heat medium and creation of counter flows was shown to result in substantial increase in thermal conductivity (1.5–2 times) in the chamber central paraxial area and lower section, thus evidencing the hydrodynamic

activation and heat and mass exchange intensification, which benefits to more effective use of chamber capacity and improved drying performance.

**Keywords:** spray drying, heat exchange, hydrodynamics, drying kinetics, temperature distribution, normal mode, counter flows

**For citation:** Akulich P. V., Slizhuk D. S. Thermohydrodynamic processes in a spraying chamber with counter-current heat flows. *Vestsi Natsyonal'noi akademii navuk. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series.* 2017, no. 3, pp. 72–79 (in Russian).

**Введение.** В настоящее время способ распылительной сушки широко применяется для обезвоживания растворов и суспензий и получения мелкодисперсных, гранулированных и быстрорастворимых материалов. Сущность способа состоит в диспергировании жидкости в поток теплоносителя и испарении растворителя из образующихся капель. Эффективность и интенсивность тепло- и массообменных процессов, протекающих в газодисперсных средах, обусловлены гидродинамическими характеристиками потока (скорости фаз, степени турбулентности). Поэтому эффективность работы распылительных камер во многом зависит от системы газораспределения теплоносителя и условий межфазного взаимодействия «газ – жидкие частицы» [1–8].

Известны различные конструкции устройств газораспределения: завихрители потока газа (лопастные, тангенциальные), сопловые устройства, системы решеток. Посредством последних можно создавать струйное и равномерное осесимметричное распределение газа в области факела распыла и тем самым достигать интенсивного межфазного тепло- и массообмена [1, 9–11]. В работе [9] приведены результаты исследования эффективности процесса сушки в вертикальной распылительной камере диаметром 800 мм с газораспределительным устройством в виде турбулизирующей решетки. Последняя представляла собой пластину толщиной 1 мм и живым сечением 48 %. Одно из отверстий находилось в центре решетки. Проводились также исследования с решеткой без отверстия в центре. В опытах высушивалась молочная суспензия с концентрацией сухих веществ 30 % при температуре воздуха на входе в камеру 195 °С и на выходе – 90 °С. Суспензия распылялась сжатым воздухом. В результате было определено, что влагонапряженность камеры заметно выше при наличии решетки, но без отверстия (рис. 1). Под влагонапряженностью понимается количество влаги испаряемой в 1 м<sup>3</sup> камеры в единицу времени. Эти данные свидетельствуют о влиянии газораспределения на интенсивность процесса сушки. Однако одна решетка не всегда может выровнять поток или создать осесимметричное его распределение.

В настоящей работе приведены результаты исследования неравномерности газораспределения в распылительной камере (с прямоточным движением газа и встречными потоками) и активности гидродинамического режима в различных ее зонах путем экспериментального определения коэффициента теплоотдачи, а также распределений температуры и скорости газа. Верхнее устройство газораспределения в распылительной камере выполнено в виде системы решеток, а нижнее представляет собой патрубок с завихрителем, направленным вверх. Таким образом, имеется возможность ввода дополнительного теплоносителя в виде встречного закрученного потока. Верхнее устройство (рис. 2) состоит из двух решеток: кольцевой 2 и плоской 3, а также соплового кольцевого отверстия 5, расположенного вокруг форсунки. Основные размеры газораспределителя (мм):  $d_1 = 200$ ,  $d_2 = 9$ ,  $d_3 = 9$ ,  $d_4 = 50$ ,  $d_{\phi} = 20$ ,  $h = 70$ ,  $d_k = 1200$ . Объемный расход воздуха, подаваемого в камеру, равен 220 м<sup>3</sup>/ч.

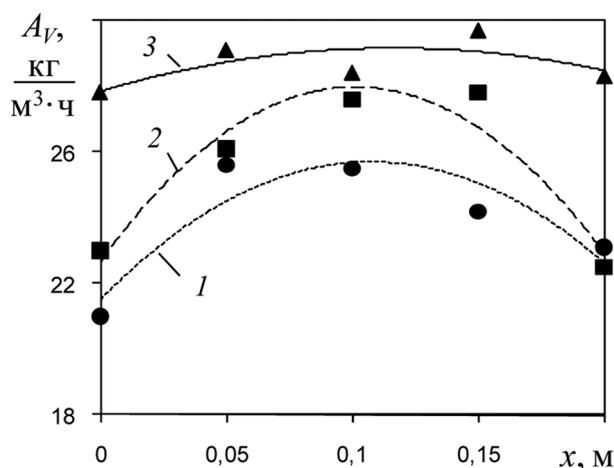


Рис. 1. Зависимость влагонапряженности камеры от расположения форсунки: 1 – без решетки, 2 – решетка с центральным отверстием, 3 – без отверстия [9]

Fig. 1. Drying performance dependence on nozzle location: 1 – no grid, 2 – grid with central orifice, 3 – no orifice [9]

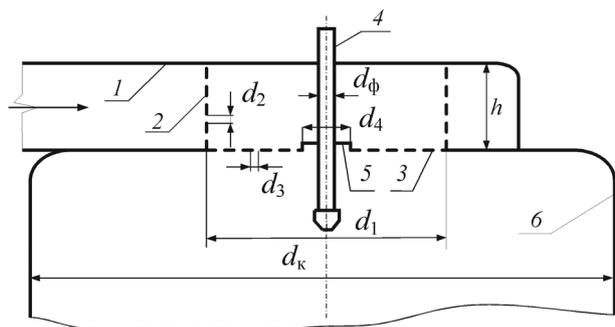


Рис. 2. Схема верхнего газораспределителя в распылительной камере: 1 – подающий газоход, 2 – первая газораспределительная решетка, 3 – вторая газораспределительная решетка, 4 – форсунка, 5 – сопловое отверстие, 6 – камера сушилки

Fig. 2. Diagram of the upper gas distributor in the spray chamber: 1 – gas inlet tube, 2 – first gas distribution grid, 3 – second gas distribution grid, 4 – nozzle, 5 – nozzle opening, 6 – drying chamber

**Методика экспериментального определения коэффициента теплоотдачи.** Определение коэффициента теплоотдачи в различных сечениях распылительной камеры проводилось методом регулярного режима [12]. Датчики выполнены шарообразной формы диаметром 15 мм и изготовлены из латуни, а также из меди.

Регистрация температуры датчика осуществлялась термопарой, зачеканенной в его центре. Вследствие высокой теплопроводности материала датчика число Био  $Bi \ll 0,1$  и коэффициент неравномерности распределения температуры в датчике близок к единице, поэтому можно допустить равномерное распределение температуры. В этом случае уравнение теплового баланса можно записать в виде

$$c\rho \frac{dT}{d\tau} = -\alpha(T - T_{cp}) \frac{S}{V}, \quad (1)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость материала датчика, Дж/(кг·К);  $T$  – средняя по объему температура датчика, К;  $T_{cp}$  – температура среды, К;  $S$  – поверхность датчика, м<sup>2</sup>;  $V$  – объем датчика, м<sup>3</sup>;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  – время, с.

С учетом шарообразной формы датчика уравнение (1) принимает вид

$$c\rho \frac{dT}{d\tau} = -\frac{6\alpha}{d}(T - T_{cp}), \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр датчика, м.

Интегрируя уравнение (2), получаем выражение для коэффициента теплоотдачи

$$\alpha = -\frac{c\rho d}{6} \operatorname{tg} \varphi = -\frac{c\rho d}{6} \frac{\ln\left(\frac{T_2 - T_{cp}}{T_0 - T_{cp}}\right) - \ln\left(\frac{T_1 - T_{cp}}{T_0 - T_{cp}}\right)}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (3)$$

Здесь  $\varphi$  – угол наклона прямого участка характерного для регулярного режима в координатах  $\ln\left[\frac{(T - T_{cp})}{(T_0 - T_{cp})}\right]$  от  $\tau$ ;  $T_2$ ,  $T_1$  – температуры датчика находящиеся на прямом участке регулярного режима, соответствующие временам  $\tau_2$  и  $\tau_1$ .

**Обсуждение результатов исследования.** Измерение скорости газового потока в распылительной камере диаметром 1200 мм и высотой цилиндрической части 800 мм проводилось цифровым анемометром АТТ-1006. В камере располагалась координатная система, позволяющая помещать измерительную часть анемометра в любую заданную точку. Измерение общего расхода воздуха через камеру осуществлялось в отводящем воздуховоде трубкой Пито – Прандтля и цифровым газоанализатором Testo 335. Объемный расход воздуха через камеру составлял 220 м<sup>3</sup>/ч.

Распределение осевой скорости потока воздуха внутри камеры показано на рис. 3. Следует отметить, что измерения проводились при наличии центрального отверстия в решетке и отсутствии форсунки. Из рисунка следует, что поток газа имеет форму струи при небольших значениях осевой скорости, которая уменьшается при удалении от решетки. При этом распределения скорости потока в горизонтальных сечениях камеры на расстояниях от решетки  $z = 220$  и 370 мм близки к осесимметричным.

Коэффициент теплоотдачи от газового потока к сферическому датчику определялся следующим образом. Измерялся расход подаваемого газа в камеру в установившемся режиме. Предварительно датчик нагревался до заданной температуры в нагревательном устройстве. В распылительную камеру подавался газовый поток при температуре окружающей среды. Затем нагретый датчик помещался в исследуемую точку камеры. Камера закрывалась, и далее регистрировались температура датчика и газового потока в камере (на уровне датчика). Характерные зависимости приведены на рис. 4 и 5, из которых видно, что температура датчика практически по экспоненциальной зависимости убывает и стремится к температуре газового потока. Температура последнего остается практически неизменной за исключением небольшого отклонения в начальный период, продолжительность которого мала по сравнению с периодом охлаждения датчика. Это отклонение обусловлено установкой датчика в исследуемую точку и последующей стабилизацией режима. На рис. 5 отчетливо видно, что практически все результаты измерения в полулогарифмической системе координат оптимально укладываются на прямую линию. Данный факт свидетельствует о том, что за исключением весьма небольшого по продолжительности начального участка имеет место регулярный режим охлаждения датчика.

На этом основании коэффициент теплоотдачи определялся по формуле (3). В результате проведенных исследований были получены распределения коэффициента теплоотдачи в различных сечениях камеры.

На рис. 6 приведены профили распределения коэффициента теплоотдачи в горизонтальных сечениях камеры, отстоящих от перекрытия на расстоянии  $z = 0,24$  и  $0,54$  м. Эти профили получены при наличии отверстия (сопла) вокруг форсунки (рис. 6, а) диаметром  $d_4 = 50$  мм (см. рис. 2) и при его отсутствии (рис. 6, б). Из сравнения профилей видно, что наличие отверстия вокруг форсунки приводит к неравномерности и несимметричности профиля. Это свидетельствует о неравномерности газораспределения в камере и наличии малоактивных зон. Значения коэффициента теплоотдачи в центральной зоне камеры значительно выше, чем в периферийной, что обусловлено струйным течением газа. При этом с удалением от перекрытия интенсивность теплообмена в центральной области камеры существенно снижается. На рис. 6, б наглядно представ-

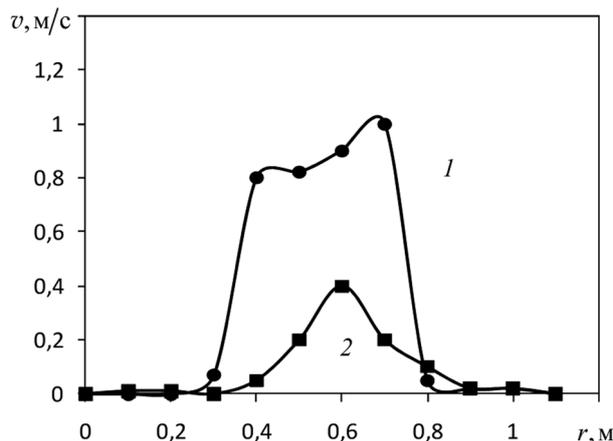


Рис. 3. Распределение осевой скорости в камере: 1 –  $z = 220$  мм; 2 –  $z = 370$  мм

Fig. 3. Axial gas flow distribution in the chamber: 1 –  $z = 220$  mm; 2 –  $z = 370$  mm

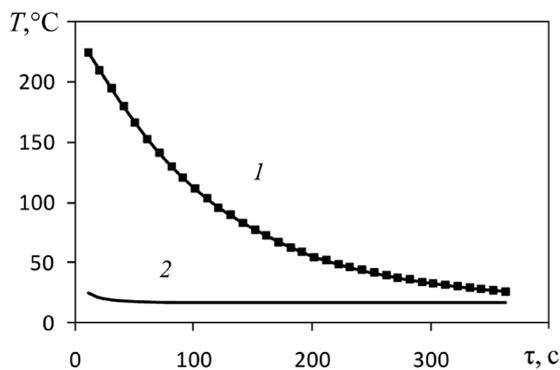


Рис. 4. Зависимость температуры датчика (1) и газового потока в камере (2) от времени

Fig. 4. Time-based dependence of sensor temperature (1) and gas flow in the chamber (2)

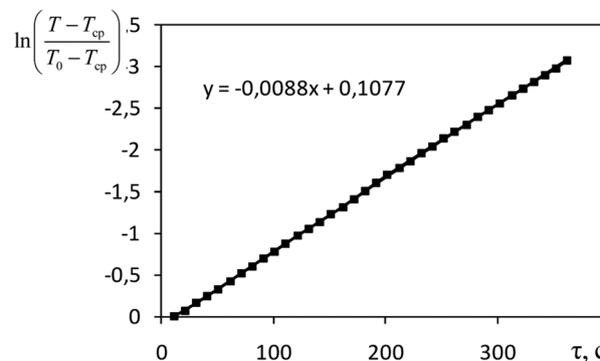


Рис. 5. Зависимость логарифма безразмерной температуры  $\ln[(T - T_{cp})/(T_0 - T_{cp})]$  от времени

Fig. 5. Logarithm of time-based dimensionless temperature dependence  $\ln[(T - T_{cp})/(T_0 - T_{cp})]$

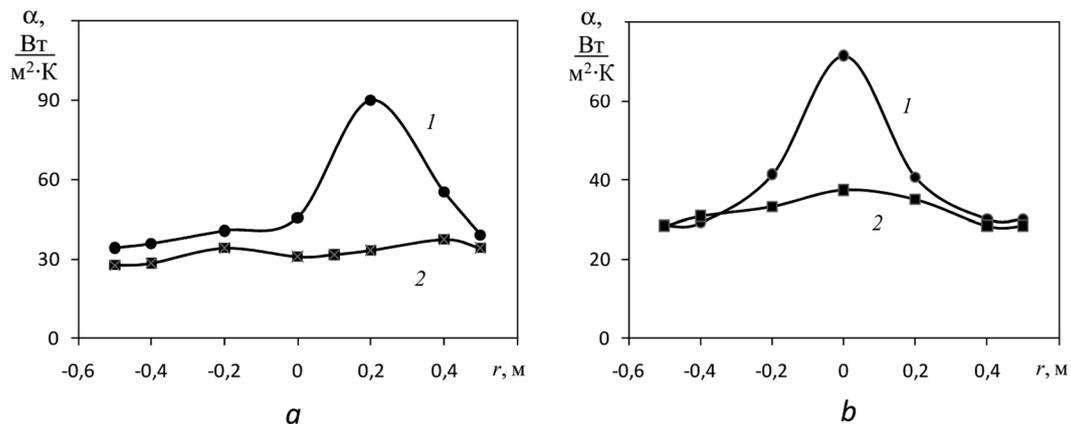


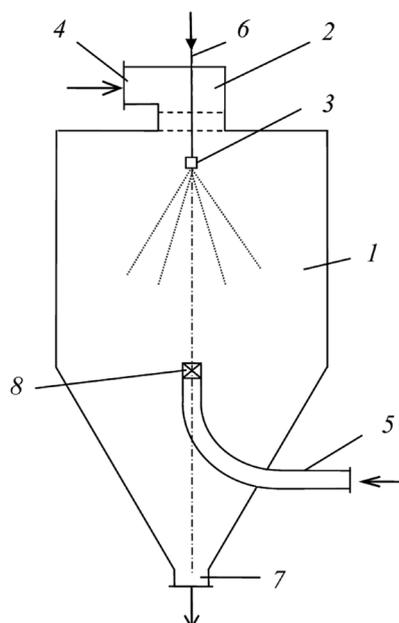
Рис. 6. Зависимости коэффициента теплоотдачи в распылительной камере в различных сечениях: 1 –  $z = 0,24$  м (расстояние от перекрытия); 2 –  $z = 0,54$  м: *a* – наличие кольцевого отверстия в решетке около форсунки, *b* – отверстие отсутствует

Fig. 6. Heat exchange intensity in different areas of the spray chamber: 1 –  $z = 0.24$  m (distance from the chamber's floor); 2 –  $z = 0.54$  m: *a* – round-shaped orifice in the grid near the nozzle, *b* – no orifice

лено, что система газораспределения в виде двух перфорированных решеток при отсутствии отверстия около форсунки обеспечивает практически осесимметричный профиль коэффициента теплоотдачи.

Далее выполнены исследования в распылительной камере, в которой реализовано встречное взаимодействие вертикальных потоков теплоносителя. Ввод нижнего дополнительного потока газа позволяет активизировать гидродинамический режим в зоне факела распыла, где имеет место наибольшая концентрация частиц дисперсной фазы. Известно, что встречное взаимодействие потоков позволяет увеличить относительную скорость движения фаз, турбулизовать несущий поток. Развитие и применение данного способа интенсификации тепломассообменных процессов в различных его модификациях вызывает интерес исследователей [3, 10, 13]. В данном случае нижний дополнительный поток газа, подаваемый в виде закрученной струи и направленный вверх, способствует также снижению скорости движущихся вниз частиц, некоторому их «зависанию», а следовательно, увеличению времени их пребывания в камере. Это важно для повышения влагонапряженности камеры, а также для достижения низкой влажности материалов.

На рис. 7 представлена схема распылительного аппарата со встречными потоками теплоносителя.



Аппарат состоит из вертикальной цилиндрической камеры 1, установленного на ее перекрытии верхнего газораспределителя 2, расположенного под ним распылителя 3, патрубков для подвода теплоносителя 4 и 5, жидкого материала 6 и вывода высушенного материала и отработанного теплоносителя 7. В нижней части сушильной камеры по ее оси установлен нижний газораспределитель (завихритель) 8.

Рис. 7. Схема распылительного аппарата со встречными вертикальными потоками теплоносителя: 1 – цилиндрическая камера, 2 – верхний газораспределитель, 3 – распылитель, 4 и 5 – патрубки для подвода теплоносителя, 6 – трубопровод жидкого материала, 7 – патрубок вывода высушенного материала и отработанного теплоносителя, 8 – завихритель

Fig. 7. Diagram of spray chamber with counter-current heat flows: 1 – tapered cylinder chamber, 2 – upper gas distributor, 3 – atomizer, 4 and 5 – heat medium jets, 6 – liquid material inlet pipeline, 7 – outlet for exhaust medium and dried product, 8 – swirler

Для изучения влияния ввода нижнего потока газа экспериментально получены распределения температуры в различных сечениях камеры при вводе верхнего потока воздуха с температурой  $t_1 = 140\text{ }^\circ\text{C}$  и нижнего потока с температурой  $t_2 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ . Расход верхнего и нижнего потоков воздуха составлял 50 % от общего расхода через аппарат. Подача воздуха с различной температурой через верхний и нижний вводы позволяет определить степень влияния соответствующего потока в конкретном сечении камеры. На рис. 8 приведены распределения температуры в распылительной камере. Видно, что в сечении, расположенном на расстоянии  $h = 340\text{ мм}$  от перекрытия, влияние нижнего потока газа незначительно, а в сечении 680 мм наблюдается резкое снижение температуры в центральной зоне, что свидетельствует о сильном влиянии нижнего потока газа. При этом область влияния нижнего потока сконцентрирована в приосевой зоне, то есть наибольшее воздействие будет оказываться на факел распыла.

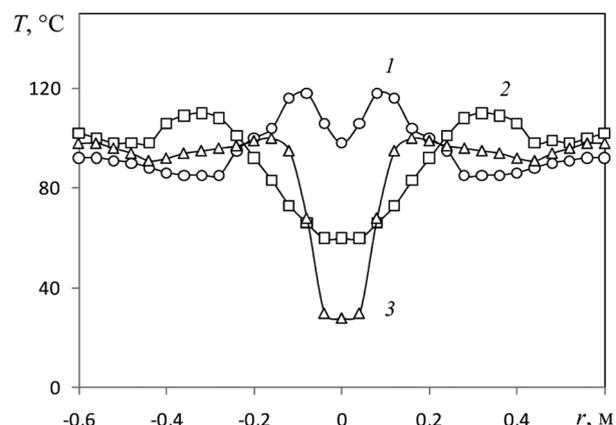


Рис. 8. Распределение температуры теплоносителя в камере при встречном взаимодействии потоков: 1 –  $h = 340\text{ мм}$ , 2 –  $h = 540\text{ мм}$ , 3 –  $h = 680\text{ мм}$

Fig. 8. Distribution of heat medium temperatures in the chamber with counter-current heat flows: 1 –  $h = 340\text{ мм}$ , 2 –  $h = 540\text{ мм}$ , 3 –  $h = 680\text{ мм}$

Экспериментально также получены распределения коэффициента теплоотдачи в различных сечениях распылительной камеры для двух режимов: при отсутствии дополнительного нижнего потока теплоносителя (воздуха) и при его наличии. На рис. 9 приведены профили распределения коэффициента теплоотдачи в горизонтальных сечениях камеры.

Сравнив представленные на рис. 9 зависимости, можно сделать вывод о том, что ввод дополнительного нижнего потока, направленного снизу вверх, приводит к росту коэффициента теплоотдачи в центральной части камеры в приосевой зоне. Это важно, поскольку в этой области имеет место повышенная концентрация частиц распыляемой жидкости. Отметим, что измеряемый коэффициент определяет интенсивность теплоотдачи от потока газа к неподвижному датчику. Однако измеряемая теплоотдача интегрально характеризует активность (скорость газа, турбулентность потока) гидродинамического режима в соответствующих точках, его изменение по объему камеры, равномерность и симметричность газораспределения, а также влияние дополни-

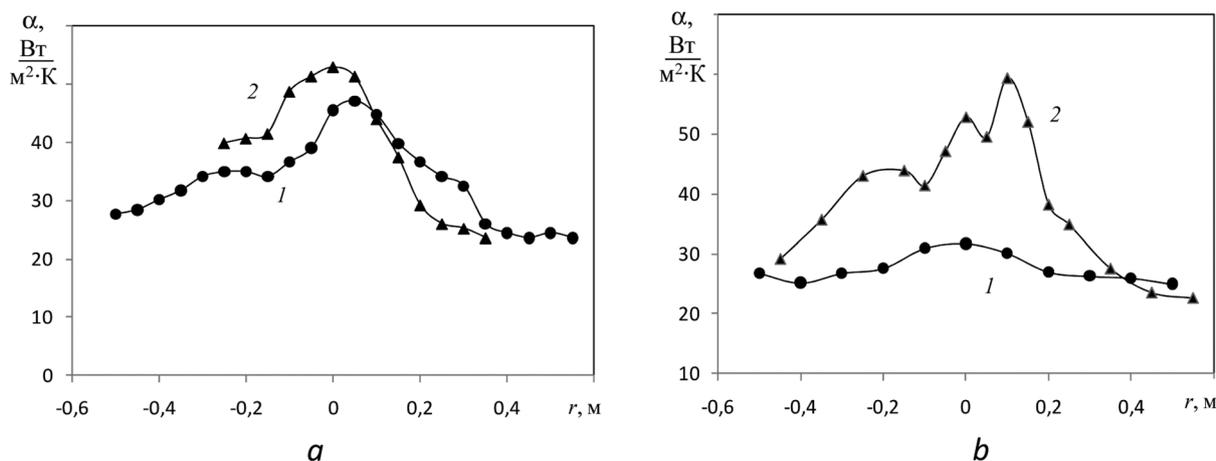


Рис. 9. Зависимости коэффициента теплоотдачи в распылительной камере с дополнительным вводом газа и при его отсутствии:  $a - z = 0,34\text{ м}$  (расстояние от перекрытия),  $b - z = 0,49\text{ м}$ ; 1 – без дополнительного нижнего ввода газа; 2 – с дополнительным нижним вводом газа

Fig. 9. Thermal conductivity values in a spraying chamber with extra gas inlet and no extra inlet implemented:  $a - z = 0.34\text{ м}$  (distance from the chamber's floor),  $b - z = 0.49\text{ м}$ ; 1 – no extra bottom inlet; 2 – with extra gas inlet

тельного ввода газа. Отметим, что определение поля скоростей, характеристик турбулентности в зоне соударения потоков сопряжено с определенными трудностями.

**Заключение.** Исследованная система газораспределения в виде двух перфорированных решеток позволяет достигнуть осесимметричного распределения коэффициента теплоотдачи, а следовательно, и газораспределения в распылительной камере. Дополнительный ввод теплоносителя в виде струйного закрученного потока и создание встречных потоков теплоносителя в центральной зоне с высокой концентрацией капель приводит к активизации гидродинамического режима и интенсификации теплообмена в камере, что способствует повышению ее влагонапряженности. Организация гидродинамики сушильной распылительной камеры с более высоким коэффициентом теплоотдачи в центральной области представляет практический интерес. При таких режимах движения теплоносителя основной процесс удаления влаги происходит в центральной части камеры и частицы материала достигают стенок камеры с меньшей влажностью и адгезией, что способствует снижению отложений на стенках камеры, стабилизации процесса и улучшению качества материала.

### Список использованных источников

1. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 443 с.
2. Акулич, П. В. Термогидродинамические процессы в технике сушки / П. В. Акулич. – Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Нац. акад. наук Беларуси, 2002. – 268 с.
3. Kudra, T. *Advanced Drying Technologies* / T. Kudra, A. S. Mujumdar. – New York: Marcel Dekker Inc., 2002. – 459 p.
4. Акулич, П. В. Моделирование и экспериментальное исследование термогидродинамических процессов распылительной сушки / П. В. Акулич, В. Л. Драгун, А. В. Акулич // Труды третьей междунар. науч.-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ–2008», 16–20 сент. 2008 г. – М., 2008. – Т. 1. – С. 124–129.
5. *Handbook of Industrial Drying* / ed. Arun S. Mujumdar. – 4th ed. – New York: CRC Press, 2014. – 1348 p.
6. Долинский, А. А. Распылительная сушка : в 2 т. / А. А. Долинский, К. Д. Малецкая. – Киев: Академперіодика, 2011. – Т. 1: Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения. – 376 с.
7. Долинский, А. А. Распылительная сушка : в 2 т. / А. А. Долинский, К. Д. Малецкая. – Киев: Академперіодика, 2015. – Т. 2: Теплотехнологии и оборудование для получения порошковых материалов. – 390 с.
8. Рудобашта, С. П. Новые российские исследования в области сушки и термовлажностных процессов / С. П. Рудобашта // Труды третьей междунар. науч.-практ. конф. «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ–2008», 16–20 сент. 2008 г. – М., 2008. – Т. 1. – С. 4–15.
9. Kuts, P. S. Enhancement of spray drying of thermosensitive materials / P. S. Kuts, V. K. Samsomyuk // *Drying Technology*. – 1989. – Vol. 1, N 7. – P. 35–45.
10. Тутова, Э. Г. Сушка продуктов микробиологического производства / Э. Г. Тутова, П. С. Куц. – М.: Агропромиздат, 1987. – 303 с.
11. Термогидродинамические процессы и технологии получения мелкодисперсных материалов методом распыления / П. В. Акулич [и др.] // XV Минский международный форум по тепло- и массообмену, 23–26 мая 2016 г.: тез. докл. и сообщ. – Минск: Ин-т тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова Нац. акад. наук Беларуси, 2016. – Т. 3. – С. 87–90.
12. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 416 с.
13. Model of Heat and Mass Transfer in an Industrial Counter-Current Spray-Drying Tower / P. Wawrzyniak [et al.] // *Drying Technology*. – 2012. – Vol. 30, iss. 11–12. – P. 1274–1282.

### References

1. Akulich P. V. *Calculations of drying and heat exchange installations*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2010. 443 p. (in Russian).
2. Akulich P. V. *Thermohydrodynamic processes in drying techniques*. Minsk, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute, National Academy of Sciences of Belarus, 2002. 268 p. (in Russian).
3. Kudra T., Mujumdar A. S. *Advanced Drying Technologies*. New York, Marcel Dekker Inc., 2002. 459 p. Doi: 10.1201/9781420073898
4. Akulich P. V., Dragun V. L., Akulich A. V. Simulation and experimental study of spray drying thermohydrodynamic processes. *Trudy tret'ei mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Sovremennye energosberegayushchie teplovyie tekhnologii (sushka i termovlazhnostnaya obrabotka materialov) SETT–2008», 16–20 sent. 2008 g. T. 1* [Works of the 3rd International Scientific and Practical Conference “Modern power saving heat technologies (drying and thermo-moisturizing treatment of materials), SETT–2008”, September 16–20, 2008. Volume 1]. Moscow, 2008, pp. 124–129 (in Russian).

5. Mujumdar A. S. *Handbook of Industrial Drying*. Fourth Edition. CRC Press, 2014. 1348 p. Doi: 10.1201/b17208
6. Dolinskii A. A., Maletskaya K. D. *Spray drying. Volume 1. Thermophysical basics. Methods of intensification and power saving technologies*. Kiev, Akadempriodika Publ., 2011. 376 p. (in Russian).
7. Dolinskii A. A., Maletskaya K. D. *Spray drying. Volume 2. Heat engineering and equipment for the production of powder materials*. Kiev, Akadempriodika Publ., 2015. 390 p. (in Russian).
8. Rudobashta S. P. New Russian studies in drying and thermo-moisturizing processes. *Trudy tret'ei mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Sovremennye energosberegayushchie teplovye tekhnologii (sushka i termovlazhnostnaya obrabotka materialov) SETT-2008», 16–20 sent. 2008 g. T. 1* [Works of the 3rd International Scientific and Practical Conference “Modern power saving heat technologies (drying and thermo-moisturizing treatment of materials), SETT-2008”, September 16–20, 2008. Volume 1]. Moscow, 2008, pp. 4–15 (in Russian).
9. Kuts P. S., Samsonyuk V. K. Enhancement of spray drying of thermosensitive materials. *Drying Technology*, 1989, vol. 1, no. 7, pp. 35–45. Doi: 10.1080/07373938908916573
10. Tutova E. G., Kuts P. S. *Drying of microbiological products*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1987. 303 p. (in Russian).
11. Akulich P. V., Slizhuk D. S., Makarova O. D., Chizhik K. G. Thermohydrodynamic processes and technologies of fine materials manufacture with spray method. *XV Minskii mezhdunarodnyi forum po teplo- i massoobmenu, 23–26 maya 2016 g.: tezisy dokladov i soobshchenii* [XV Minsk International Forum on Heat and Mass Exchange: Theses of reports and announcements, May 23–26, 2016. Volume 3]. Minsk, Institute of Heat and Mass Transfer. A. V. Lykov, National Academy of Sciences of Belarus, 2016, pp. 87–90 (in Russian).
12. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Heat transfer*. Minsk, Energoatomizdat Publ., 1981. 416 p. (in Russian).
13. Wawrzyniak P., Podyma M., Zbicinski I., Bartczak Z., Polanczyk A., Rabaeva J. Model of Heat and Mass Transfer in an Industrial Counter-Current Spray-Drying Tower. *Drying Technology*, September 2012, vol. 30, no. 11–12, pp. 1274–1282. Doi: 10.1080/07373937.2012.704604

### Информация об авторах

*Акулич Петр Васильевич* – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: akul@hmti.ac.by

*Слижук Дмитрий Станиславович* – научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: slizhuk@itmo.by

### Information about the authors

*Piotr V. Akulich* – D. Sc. (Engineering), Chief Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus (15, Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: akul@hmti.ac.by

*Dmitriy S. Slizhuk* – Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus (15, Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: slizhuk@itmo.by