

ISSN 2306-4986

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РФ**

**ФГБОУ ВО
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНЖЕНЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»**

**VIII НАЦИОНАЛЬНАЯ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ
ЭНЕРГОИНФОРМАЦИОННЫХ
ПРОЦЕССОВ**

ВОРОНЕЖ 2020

**СЕКЦИЯ «МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМ
АВТОМАТИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ. ПРИМЕНЕНИЕ
МИКРОПРОЦЕССОРОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ»**

На удельные энергозатраты наибольшее влияние оказывает давление прессования, наименьшее – температура экстрагента на этапе экстракции. На выход сока наибольшее влияние оказывает давление прессования, и в меньшей степени – температура экстрагента на этапе экстракции.

Таким образом, в результате выполнения 31 опыта была получена информация о влиянии факторов и построена математическая модель процесса, позволяющая рассчитать удельные энергозатраты на 1 кг извлеченного свекловичного сока, внутри выбранных интервалов варьирования входных факторов.

Список литературы

1. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Макаров, Ю. В. Грановский. – 2-е изд. перер. доп. – М.: Наука, 1976. – 280 с.

2. Бахвалов, Н. С. Численные методы [Текст] / Н. С. Бахвалов. – М.: Бином, 2010. – 636 с.

3. Грачев, Ю. П. Математические методы планирования экспериментов [Текст] / Ю. П. Грачев. – М.: Пищевая пром-сть, 1979. – 199 с.

УДК 536.24

ТЕПЛООБМЕН В ПУЧКЕ ТРУБ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ПУЛЬСАЦИЙ

Яруллина А.А.

*ФГБОУ ВО «Казанский государственный
энергетический университет»,
г. Казань, Россия*

Трубчатые теплообменные аппараты широко применяются в различных отраслях промышленности. Даже небольшое повышение эффективности кожухотрубных аппаратов может

привести к значительному энергосбережению. Одним из способов повышения эффективности работы кожухотрубных аппаратов является применение пульсаций потока для интенсификации теплообмена [1-4]. Несмотря на то, что теплообмен при поперечном обтекании пучков труб в стационарных условиях хорошо изучен, теплообмен в условиях пульсаций потока исследован ограниченно, поэтому раскрытие его закономерностей остается актуальной задачей.

В данной работе для описания течения несжимаемой жидкости использовались нестационарные уравнения Навье-Стокса осредненные по методу Рейнольдса (URANS) с применением гипотезы турбулентной вязкости. Теплоперенос описывался уравнением конвективного теплообмена (Фурье-Кирхгофа) [5, 6]. Двухмерная расчетная область математической модели представлена на рис. 1.

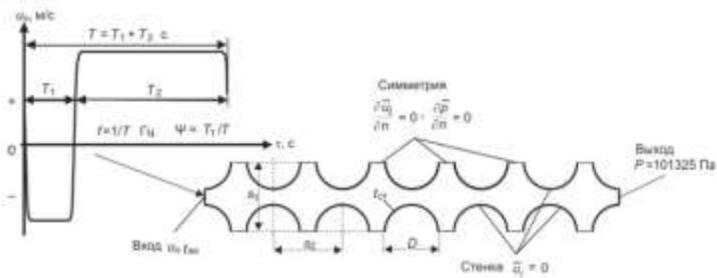


Рис. 1. Расчетная область модели

При стационарном течении на входе задавалась постоянная скорость жидкости u_{st} , м/с с постоянной температурой $t_{вх} = 18$ °С. Температура стенки центрального нижнего цилиндра в пучке была постоянной $t_{ст} = 19$ °С, для остальных цилиндров принималось условие адиабатной стенки $\partial t / \partial n = 0$. Пульсационное течение моделировалось с помощью пульсаций скорости (зависимости скорости от времени $u(t)$, которая задавалась на входе в пучок труб в качестве граничного условия

(рис. 1)). Пульсации скорости $u(t)$ соответствовали необходимой частоте $f=1/T$ Гц, числу Re , скважности $\psi = T_1/T$ и относительной амплитуде A/D , где A – смещение частицы жидкости назад, m в самом узком сечении межтрубного пространства пучка труб. Таким образом, пульсации жидкости имели возвратно-поступательный характер.

Расчеты проводились с помощью ПО ANSYS Fluent на основе метода конечных объемов (МКО). Расчетная область модели была разбита на 32023 контрольных объемов. Коэффициент расширения размеров расчетных ячеек в радиальном направлении от стенок каждого цилиндра составлял 1.2. Количество слоев в пристеночной области 10. Минимальный размер ячейки в пристеночной области составлял $y_{min}/D = 2,5 \cdot 10^{-3}$, что сравнимо с минимальным размером ячейки $y_{min}/D = 4,3 \cdot 10^{-3}$ использованной в работе [8].

Полученные результаты по теплообмену в пучке труб при стационарном течении сравнивались с критериальным уравнением (1) [9]. Числа Нуссельта рассчитывались по формуле (1)

$$Nu_{st} = 0,26 Re^{0,63} Pr^{0,36} \quad (1)$$

На рис. 2 представлена зависимость числа Нуссельта Nu_{st} от числа Re для различных моделей турбулентности. Относительный поперечный и продольный шаг составлял $s_{1,2}/D = 1,3$, числа $Pr = 7,2$. При выборе модели турбулентности были рассмотрены 6 различных моделей турбулентности [6]: модель Спаларта-Алмараса Spalart–Allmaras (SA), модель переноса касательных напряжений ShearStressTransport (SST), стандартная k -epsilon (k - ϵ), стандартная k -omega (k - ω), k - kl -omega (k - kl - ω) модели и модель Рейнольдсовых напряжений ReynoldsStressModel (RSM) с линеаризованным описанием момента давления-деформации (Linear Pressure-Strain (LPS)). В результате проведенных расчетов наилучшее схождение с экспериментальными данными показала модель SST с максимальным расхождением не более 3,5 %.

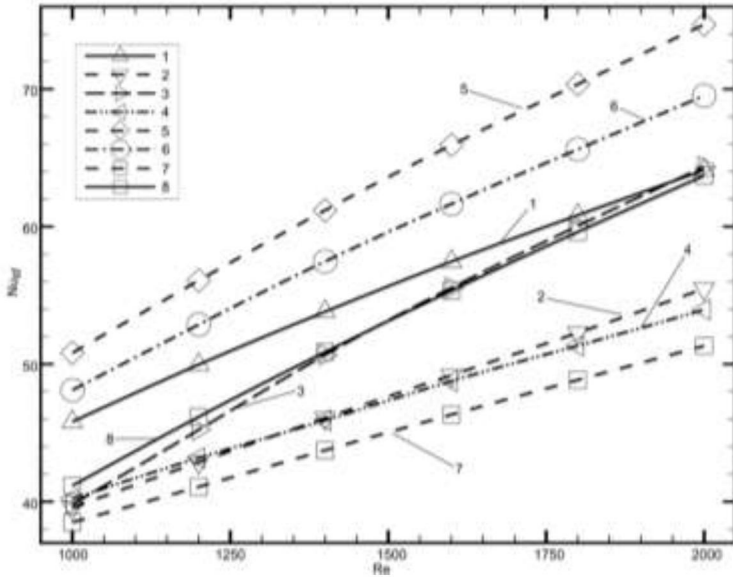


Рис. 2. Зависимость Nu_{st} от Re для различных моделей турбулентности: 1 – RSMEWT; 2 – SA; 3 – SST; 4 – $k-kl-\omega$; 5 – $k-\epsilon$ SWF; 6 – $k-\epsilon$ EWT; 7 – $k-\omega$; 8 – ур. (1)

При моделировании нестационарного течения число Re находилось в диапазоне от 1000 до 2000, амплитуда пульсаций A/D от 1 до 2, число $Sh = fD/u_{st}$ от 0,77 до 1,51, в качестве рабочей жидкости принималась вода с постоянным числом $Pr = 7,2$, скважность пульсаций также имела фиксированное значение $\psi = 0,25$.

В качестве модели турбулентности была выбрана модель SST поскольку она показала наилучшее схождение с уравнением (1).

Число Нуссельта в пульсационном течении рассчитывалось следующим образом

$$Nu_p = \frac{q_p D}{\lambda \Delta t_p}, \quad (2)$$

где q_p – плотность теплового потока осредненная по поверхности центрального цилиндра в пучке и за один период пульсаций, Вт/м²;

Δt_{st} – разница температур между стенкой центрального цилиндра и осредненной температурой жидкости по межтрубному пространству и за один период пульсаций, °С.

По результатам численного эксперимента была получена обобщающая зависимость

$$\frac{Nu_p}{Nu_{st}} = 2,681 \operatorname{Re}^{-0,098} \cdot A/D^{1,191} \cdot \operatorname{Sh}^{0,526} \quad (3)$$

Данное уравнение может быть использовано для диапазонов $1000 \leq \operatorname{Re} \leq 2000$; $0,77 \leq \operatorname{Sh} \leq 1,51$; $1 \leq A/D \leq 2$ при $\operatorname{Pr} = 7,2$, $\psi = 0,25$, $s_{1,2}/D = 1,3$. Коэффициент детерминации R^2 составил 0,993. Максимальное отклонение от данных численного эксперимента составляет не более $\delta_{\max} = \pm 7,8 \%$, среднее $\delta_{\text{ср}} = \pm 2,4 \%$.

Полученная обобщающая зависимость может быть использована для оценки интенсификации теплообмена в коридорном пучке труб с $s_{1,2}/D = 1,3$, при указанных в работе диапазонах режимных параметров. Для получения уравнения в более широком диапазоне режимных параметров и с отличными конфигурациями пучков труб необходимы дополнительные исследования, чему будут посвящены последующие работы.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №18-79-10136).

Список литературы:

1. Bhalla N., Dhiman A.K. Pulsating flow and heat transfer analysis around a heated semi-circular cylinder at low and moderate Reynolds numbers. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017, vol. 39, no. 8, pp. 3019–3037. doi:10.1007/s40430-017-0749-
2. Li G., Zheng Y., Hu G., Zhang Z., Xu Y. Experimental Study of the Heat Transfer Enhancement from a Circular Cylinder in

Laminar Pulsating Cross-flows. *HeatTransferEngineering*, 2015, vol. 37, no. 6. – pp. 535–544. doi:10.1080/01457632.2015.1060758.

3. Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р., Ильин В.К. Теплообмен в проточном канале с пучком труб коридорного расположения при наложении на поток жидкости противоточных низкочастотных несимметричных пульсаций // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2016. № 11-12. С. 56-67.

4. Ilyin V.K., Haibullina A.I., Hayrullin A.R., Sabitov L.S. External heat transfer in corridor and staggered tube bundles of different configuration under the application of low-frequency pulsations // *Всборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering Ser. "International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2016, ISTC-IETEM 2016"* 2017. С. 012027.

5. Снегирёв А.Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений. – Санкт-Петербург: Изд. Политехнический университет, 2009. – 143 с.

6. ANSYS FLUENT, ANSYS, Inc. Southpointe, 2011.

7. Liang C., Papadakis G. Study of the Effect of Flow Pulsation on the Flow Field and Heat Transfer Over an Inline Cylinder Array Using LES // *Engineering Turbulence Modelling and Experiments*. – 2005. – Т. 6. – С. 813–822. doi:10.1016/b978-008044544-1/50078-9.

8. Liang C., Papadakis G. Study of the Effect of Flow Pulsation on the Flow Field and Heat Transfer Over an Inline Cylinder Array Using LES // *Engineering Turbulence Modelling and Experiments*. – 2005. – Т. 6. – С. 813–822. doi:10.1016/b978-008044544-1/50078-9.

9. Жукаускас А., Макарявичюс В., Шланчяускас А. Теплоотдача пучков труб в поперечном потоке жидкости. – Вильнюс: Изд. Мокслас, 1968. – 192 с.

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**МАТЕРИАЛЫ
УШНАЦИОНАЛЬНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ
КОНФЕРЕНЦИИ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ**

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОИНФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

В авторской редакции

Подписано в печать. Формат 60 x 84 1/16
Усл. печ. л. 36,685. Тираж 100 экз. Заказ №
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»
(ФГБОУ ВО «ВГУИТ»)
Отдел полиграфии ФГБОУ ВО «ВГУИТ»
Адрес университета и отдела полиграфии:
394036, Воронеж, пр. Революции, 19