

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 66-5

DOI 10.52928/2070-1616-2024-49-1-95-100

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА
В ПРОГРАММЕ ANSYS НА ПРИМЕРЕ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА
УСТАНОВКИ АВТ-2 ОАО «НАФТАН»**

*канд. техн. наук, доц. Е.В. САФРОНОВА, канд. техн. наук, доц. А.В. СПИРИДОНОВ,
канд. хим. наук, доц. Е.В. МОЛОТОК, В.А. ТРУС*

(Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой)

Приводится описание современных систем автоматизированного проектирования теплообменного оборудования, объединенных общими задачами и математическими методами. Их главные отличия: адаптивность к восприятию 3D-моделей из других программ, удобство использования для проектировщика и способ предоставления отчетных данных. Рассмотрен способ проектирования теплообменного оборудования с применением программы Ansys Workbench с моделированием потоков течения жидкости методом конечных элементов.

Ключевые слова: *моделирование, теплообмен, проектирование, течение жидкости, коэффициент теплопередачи, эффективность, химические процессы.*

Введение. Ни одно нефтехимическое и энергетическое производство не обходится без теплообменного оборудования – его доля составляет порядка 40%. И от правильности подобранного вида данных аппаратов напрямую зависит экономическая целесообразность и эффективность производств. В прошлом проектирование и конструирование осуществлялись вручную. Процесс был трудоемким и отнимал много времени, что косвенно увеличивало конечную стоимость проекта. Коэффициенты запаса, введенные для нивелирования дополнительных рисков, погрешностей и допущений в расчетах, увеличивали массу аппарата, его металлоемкость, что в итоге удорожало сами аппараты. Однако с появлением систем автоматизированного проектирования процесс разработки представилось возможным ускорить, а компьютерные мощности позволили моделировать теплообменные процессы и процессы течения жидкостей для нахождения оптимальной конструкции в соотношении цена и эффективность.

При проектировании и конструировании теплообменных аппаратов необходимо в максимально возможной степени удовлетворить многосторонние и часто противоречивые требования, предъявляемые к теплообменникам. Основные из них: соблюдение условий протекания технологического процесса; возможно более высокий коэффициент теплопередачи; низкое гидравлическое сопротивление аппарата; устойчивость теплообменных поверхностей против коррозии; доступность поверхности теплопередачи для чистки; технологичность конструкции с точки зрения ее изготовления; экономное использование материалов [1].

Основная часть. Различают проектный и поверочный расчеты теплообменников. Целью проектного расчета является определение необходимой поверхности теплообмена и режима работы теплообменника для обеспечения заданного переноса теплоты от одного теплоносителя к другому. Задача поверочного – определение количества передаваемой теплоты и конечных температур теплоносителей в данном теплообменнике с известной поверхностью теплообмена при заданных условиях его работы. Эти расчеты основываются на использовании уравнений теплопередачи и тепловых балансов [1].

При расчете теплообменника, как и любого другого аппарата для проведения химико-технологического процесса, не представляется возможным только на основе величин, имеющихся в задании на проектирование, однозначно определить все необходимые размеры и характеристики аппарата. Так, для расчета коэффициентов теплоотдачи необходимо задаться скоростью движения теплоносителя, диаметром труб и т.д. Значит, проектировщик при расчетах теплообменников к заданным (в проектном задании) величинам вынужден добавлять ряд других величин, которые часто выбираются произвольно. Поэтому приходится делать ряд вариантов расчета, для того чтобы выбрать наиболее рациональный. При таком методе расчета теплообменников объем расчетных вариантов, да и сам выбор аппарата, во многом зависит от субъективных факторов. Поэтому наиболее рационально расчет и выбор аппарата для проведения химико-технологического процесса, в т.ч. и теплообменного, рассматривать как задачу оптимизации. При этом все достоинства теплообменника выражаются только одной величиной – критерием оптимальности [1].

При оптимизации расчет направлен на поиск варианта, для которого критерий оптимальности будет иметь экстремальное значение (наибольшее или наименьшее в зависимости от содержания критерия). Проектирование теплообменников для этих установок должно быть подчинено основной задаче – обеспечению их высокой экономической эффективности [1].

С активным развитием технологий математического моделирования, в основе которых лежат фундаментальные уравнения гидродинамики, стало возможно расчетным путем определять параметры потока различных сред (давления, скорости) с определением характеристик конвективного теплообмена между твердой поверхностью теплопередающего элемента и текущего теплоносителя [2].

Для решения задач гидродинамики тепловых потоков в теплообменном и любом другом оборудовании существует ряд программ и систем, а именно Ansys CFD, программные модули в Kompas Flow, SolidWorks Flow Simulation, Autodesk Simulation CFD, FlowVision и др. Среда ANSYS Workbench является основным инструментом, на котором базируется концепция «Проектирование изделий на основании результатов инженерных расчетов» [3]. Ansys включает в себя множество модулей, которые разбиты на разделы.

Для выполнения расчета необходимы следующие исходные данные¹:

1) тип теплообменного аппарата (кожухотрубчатый, пластинчатый, ребристый, оросительный, погружной или др.);

2) теплоносители (газ, пар или жидкость);

3) теплопроизводительность аппарата: расход одного из теплоносителей, его начальная и конечная температуры.

По ходу выполнения расчета определяют¹:

1) физические параметры и скорости движения теплоносителей;

2) расход другого теплоносителя из уравнения теплового баланса;



3) среднюю разность температур;

4) коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи;

5) поверхность теплообмена;

6) конструктивные размеры аппарата;

7) диаметр патрубка для входа и выхода теплоносителей.

Любой расчет теплообмена стоит начинать с задания теплофизических свойств теплоносителей горячей и холодной сторон. Для этого создаем новый New Case. С помощью команды в поле программы выбираем  Hot Fluid Properties и  Cold Fluid Properties соответственно и в открывшемся окне нажимаем Property Generator. В появившемся меню выбираем вкладку Condition, где указываем диапазон работы аппарата, а именно давление и температуры, при которых потенциально может работать наш будущий теплообменник и для которых будут автоматически сгенерированы свойства теплоносителей при различных условиях (рисунок 1).

После задания границ по температуре и давлению задаем ориентировочный фракционный состав компонентов теплоносителей с помощью команды Composition. Исходя из этого состава, программа будет дробить компоненты на более мелкие фракции и вычислять для них плотность, вязкости, теплопроводность и т.д. (рисунок 2).

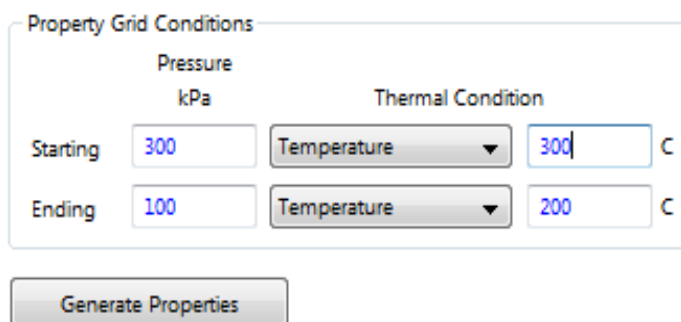


Рисунок 1. – Границы генерации свойств

	Percent Distilled	Temperature C
1	1.80	28.00
2	3.76	46.00
3	5.90	70.00
4	7.14	84.00
5	17.53	166.00
6	28.00	240.00
7	38.24	312.00
8	51.86	408.00
9	62.88	490.00

Рисунок 2. – Фракционный состав


После задания всех условий нажимаем на вкладку Results. В ней будут находиться все сгенерированные свойства при различных температурах и давлениях, которые будут использованы для расчета теплообмена (рисунок 3).

Аналогично горячему теплоносителю такой же набор действий необходимо сделать и для холодного теплоносителя с генерацией его свойств.

¹ Расчет теплообменных аппаратов. Методические указания к курсовому и дипломному проектированию [Электронный ресурс] / сост. Н.Ю. Карапузова, В.М. Фокин. – Волгоград: Волгогр. гос. архит.-строит. ун-т, 2013. URL: <http://www.vgasu.ru/publishing/on-line/>


Pressure: 300,000 kPa			Vapor Properties					Liquid Properties							
Temperature (C)	Enthalpy (kJ/kg)	Weight Fraction Vapor	Density (kg/m3)	Viscosity (mN-s/m2)	Heat Capacity (kJ/kg-C)	Thermal Cond. (W/m-C)	Mole. Weight (-)	Density (kg/m3)	Viscosity (mN-s/m2)	Heat Capacity (kJ/kg-C)	Thermal Cond. (W/m-C)	Surface Tension (mN/m)	Critical Pres. (kPa)	Critical Temp. (C)	Mole. Weight (-)
1	300,000	0,21466	10,4768	0,0107	2,4079	0,0358	153,78	735,663	0,5347	2,7287	0,0690	11,7417	2030,40	517,31	268,78
2	298,812	0,20699	10,4668	0,0107	2,4046	0,0357	153,30	735,389	0,5332	2,7257	0,0692	11,7519	2037,00	515,81	267,23
3	297,633	0,19933	10,4567	0,0107	2,4013	0,0356	152,83	735,121	0,5318	2,7227	0,0693	11,7622	2043,57	514,33	265,70
4	296,462	0,19166	10,4462	0,0107	2,3980	0,0355	152,35	734,858	0,5305	2,7198	0,0695	11,7726	2050,09	512,87	264,19
5	295,298	0,18400	10,4356	0,0107	2,3947	0,0354	151,87	734,601	0,5292	2,7168	0,0697	11,7831	2056,58	511,41	262,70
6	294,140	0,17633	10,4246	0,0107	2,3915	0,0353	151,39	734,349	0,5264	2,7139	0,0698	11,7938	2063,04	509,97	261,23
7	292,988	0,16866	10,4133	0,0107	2,3883	0,0352	150,91	734,104	0,5225	2,7110	0,0699	11,8047	2069,46	508,54	259,78
8	291,841	0,16100	10,4017	0,0106	2,3851	0,0351	150,43	733,864	0,5212	2,7081	0,0701	11,8159	2075,85	507,13	258,35
9	290,507	0,15205	10,3878	0,0106	2,3814	0,0350	149,87	733,594	0,5197	2,7047	0,0702	11,8292	2083,26	505,49	256,71
10	289,178	0,14311	10,3733	0,0106	2,3777	0,0349	149,30	733,333	0,5184	2,7014	0,0703	11,8429	2090,64	503,87	255,09
11	287,852	0,13416	10,3584	0,0106	2,3740	0,0348	148,73	733,082	0,5172	2,6980	0,0705	11,8570	2097,97	502,26	253,49
12	286,527	0,12522	10,3430	0,0106	2,3703	0,0347	148,15	732,842	0,5162	2,6946	0,0706	11,8715	2105,28	500,66	251,91
13	285,202	0,11627	10,3270	0,0106	2,3667	0,0346	147,57	732,613	0,5152	2,6912	0,0708	11,8866	2112,56	499,07	250,36
14	283,875	0,10733	10,3105	0,0106	2,3630	0,0345	146,98	732,395	0,5143	2,6878	0,0709	11,9022	2119,82	497,50	248,83
15	282,735	0,09966	10,2958	0,0106	2,3599	0,0344	146,47	732,218	0,5137	2,6849	0,0710	11,9161	2126,02	496,15	247,53
16	281,592	0,09200	10,2807	0,0106	2,3568	0,0343	145,95	732,049	0,5131	2,6819	0,0711	11,9304	2132,21	494,81	246,24
17	280,445	0,08433	10,2651	0,0105	2,3536	0,0343	145,43	731,890	0,5122	2,6790	0,0712	11,9452	2138,40	493,48	244,97
18	279,293	0,07666	10,2491	0,0105	2,3505	0,0342	144,91	731,741	0,5107	2,6760	0,0713	11,9606	2144,58	492,15	243,71
19	278,134	0,06900	10,2326	0,0105	2,3473	0,0341	144,37	731,601	0,5103	2,6730	0,0715	11,9764	2150,76	490,83	242,46

Рисунок 3. – Результаты генерации свойств

Далее на вкладке  Process необходимо задать расходы теплоносителей G , вписав их (в кг/с) в графу Flow rate 32,6364; начальное и конечное значения температуры (если нет конечной, то программа посчитает, но для этого необходимо для первого приближения дать ей геометрические размеры теплообменника) в соответствующие графы Temperature 231 °C и 209 °C; допустимый перепад давления в аппарате Allowable pressure drop 50 кПа; рабочее давление теплоносителя на входе в аппарат Operating pressure 190 кПа. В графе Phase необходимо выбрать из выдвигающегося списка фазовое состояние теплоносителя: All liquid будет означать, что входит и выходит из аппарата только жидкость без фазового перехода; Condensing – в теплообменнике происходит конденсация данного теплоносителя, и если на входе поток был газообразным, то на выходе либо жидкостью либо газожидкостная смесь; All vapor назначается в случае, если в теплообменник входит и выходит газ; Two phase\ No phase change – в аппарат входит и выходит двухфазный поток, меняться могут только соотношения газа и жидкости (рисунок 4).

	Hot Fluid		Cold Fluid	
Fluid name	<input type="text"/>		<input type="text"/>	
Phase	All liquid		All liquid	
Flow rate	32.6364		12.854 kg/s	
	Inlet	Outlet	Inlet	Outlet
Weight fraction vapor	0	0	0	0
Temperature	231	209	132	168 C
Operating pressure	190		230 kPa	

Рисунок 4. – Условия процесса

После задания всех вышеперечисленных исходных данных появляется возможность задать геометрию аппарата. При первом приближении этим можно пренебречь и запустить расчет в режиме Design. Для этого необходимо нажать на кнопку  и подождать, пока программа подберет оптимальное решение поставленной задачи. После завершения расчета на вкладке Reports будет выдан отчет расчета, проанализировав который можно, меняя геометрию аппарата, повысить эффективность теплообменника (рисунок 5).

Данная техническая спецификация демонстрирует основные параметры работы аппарата и может служить в качестве опросного листа для поставщика оборудования. Исходя из результатов расчета, видим крайне низкую скорость движения теплоносителя в межтрубном пространстве теплообменника 0,14 м/с, что не соответствует рекомендованной скорости 1,5–2 м/с [5]. В нижней части теплообменника наблюдается застойная зона с малыми скоростями потока и плохой теплопередачей, в верхней части поток не доходит до теплообменных трубок и, минуя их, устремляется к выходу. Низкая скорость потока обуславливается тем, что жидкости нужно большее время контакта с трубами для достижения необходимой температуры на выходе. Нормальный теплообмен протекает только в центральной части, где трубки омываются полностью.

PERFORMANCE OF ONE UNIT				
Fluid Allocation	Shell Side		Tube Side	
Fluid Name				
Fluid Quantity, Total	117491		46275	
Vapor (In/Out)			1063,2	
Liquid	117491	117491	46275	45211
Steam				
Water				
Noncondensables				
Temperature (In/Out)	C	231,00	209,00	132,00
Specific Gravity		0,7645	0,7823	0,8363
Viscosity	mN-s/m ²	0,8456	1,1981	50,420
Molecular Weight, Vapor			V/L 15,592	
Molecular Weight, Noncondensables				
Specific Heat	kJ/kg-C	2,5146	2,4368	2,2445
Thermal Conductivity	W/m-C	0,0790	0,0824	0,0944
Latent Heat	kJ/kg			V/L 0,0893
Inlet Pressure	kPa	190,00		230,00
Velocity	m/s	0,14		1,33
Pressure Drop, Allow/Calc	kPa	0,000	2,498	0,000
Fouling Resistance (min)	m ² -K/W	0,000000		0,000000
Heat Exchanged	1465064 W			MYD (Corrected) 65,8 C
Transfer Rate, Service	53,21 W/m ² -K	Clean 57,51	W/m ² -K	Actual 57,51 W/m ² -K

Рисунок 5. – Результаты расчета в режиме Design

Для наглядности выведем полученную геометрию из модуля Workbench в модуль Fluent и проанализируем пространственное распределение тепловых потоков в полученном теплообменнике. Для этого перейдем на вкладку **Drawings** и откроем опцию **3D Bundle Layout**. Получим анимацию движения теплоносителей и распределение тепловых потоков по объему теплообменника (рисунок 6).

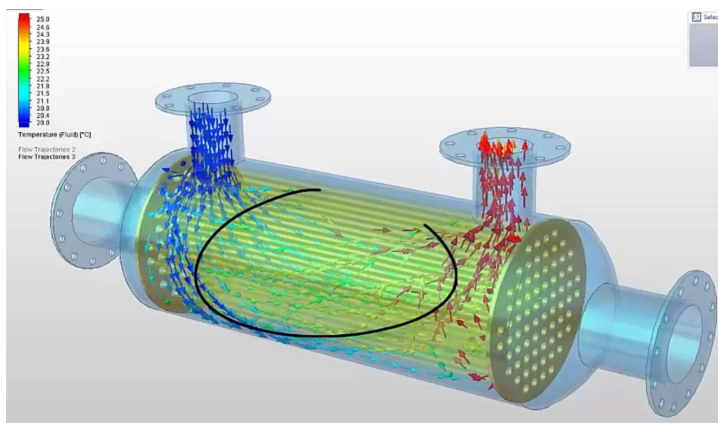


Рисунок 6. – Динамическая модель 3D вида теплообменника

На данном рисунке продемонстрированы тепловые потоки, движущиеся в аппарате; в левом верхнем углу расположена шкала температур с цветовым распределением, им соответствует цвет стрелок потока в аппарате. Для турбулизации потока изменим конструкцию теплообменника, расставив сегментные перегородки².

Для этого следует зайти во вкладку **Geometry** и в открывшемся списке выбрать **Baffles**. Открывается меню настройки перегородок межтрубного пространства (рисунок 7).

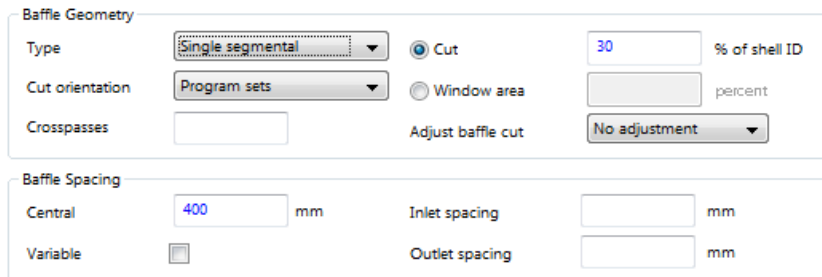


Рисунок 7. – Меню настройки перегородок межтрубного пространства

² Тимонин А.С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования: справ. В 3 т. – Калуга: изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – Т. 2. – С. 646–770.

На рисунке видны настройки выреза сегмента – 30%. Расстояние между перегородками назначаем исходя из рекомендаций – 400 мм. Программа дает возможность выбрать и другие варианты перегородок, таких как: Double segmental (двойной сегмент), Rods (стрельневая), Single helical (одинарная спираль). Однако в наших условиях достаточно простой в изготовлении односегментной перегородки.

В выбранном режиме расчета программа сразу предоставляет оптимальную скорость по трубному пространству.

Но рассмотрим случай, когда появляется необходимость решать аналогичную проблему для труб. Для изменения геометрии трубного пространства воспользуемся функцией **Tubes**. В ней есть возможность задать внутренний диаметр труб Tube OD, толщину стенки труб Average wall thickness, шаг труб Pitch, а также угол их расположения Tube layout angle. Варьируя эти параметры, можно достичь необходимых показателей скоростей и увеличить общий коэффициент теплопередачи. Повторяем расчет и просматриваем отчет расчета измененной конструкции (рисунок 8).

HEAT EXCHANGER SPECIFICATION SHEET					
Ansys			Job No.		
Customer			Reference No.		
Address			Proposal No.		
Plant Location			Date 17.03.2023		
Service of Unit			Rev		
Item No.			Connected In 1 Parallel 1 Series		
Size 977,77 x 6096 mm			Type AES Horizontal		
Surf/Unit (Gross/Eff) 432,69 / 419,62 m ²			Shell/Unit 1 Surf/Shell (Gross/Eff) 432,69 / 419,62 m ²		
PERFORMANCE OF ONE UNIT					
Fluid Allocation		Shell Side		Tube Side	
Fluid Name					
Fluid Quantity, Total kg/hr		117491		48275	
Vapor (In/Out)					
Liquid		117491		48275	
Steam				1062,7	
Water				45212	
Noncondensables					
Temperature (In/Out) C		231,00 209,00		132,00 168,00	
Specific Gravity		0,7645 0,7823		0,8363 0,8191	
Viscosity mN-s/m ²		0,8456 1,1981		50,420 V/L 15,591	
Molecular Weight, Vapor					
Molecular Weight, Noncondensables					
Specific Heat kJ/kg-C		2,5146 2,4368		2,2445 V/L 2,3586	
Thermal Conductivity W/m-C		0,0790 0,0824		0,0944 V/L 0,0893	
Latent Heat kJ/kg					
Inlet Pressure kPa		190,00		230,00	
Velocity m/s		1,28		1,33	
Pressure Drop, Allow/Calc kPa		0,000 8,523		0,000 20,882	
Fouling Resistance (min) m ² -K/W		0,000000		0,000000	
Heat Exchanged 1365054 W		Clean 75,30 W/m ² -K		MTD (Corrected) 85,5 C	
Transfer Rate, Service 52,21 W/m ² -K		Actual 75,30 W/m ² -K			
CONSTRUCTION OF ONE SHELL					
		Shell Side		Tube Side	
Design/Test Pressure kPaG		517,11 /		517,11 /	
Design Temperature C		260,00		198,89	
No Passes per Shell		1		1	
Corrosion Allowance mm		3,175		3,175	
Connections		1 @ 187,30		1 @ 187,30	
Size & Out mm		1 @ 337,30		1 @ 187,30	
Rating		@		@	
Sketch (Bundle/Nozzle Orientation)					

Рисунок 8. – Результаты расчета измененной конструкции

В динамической модели данное изменение представлено на рисунке 9.

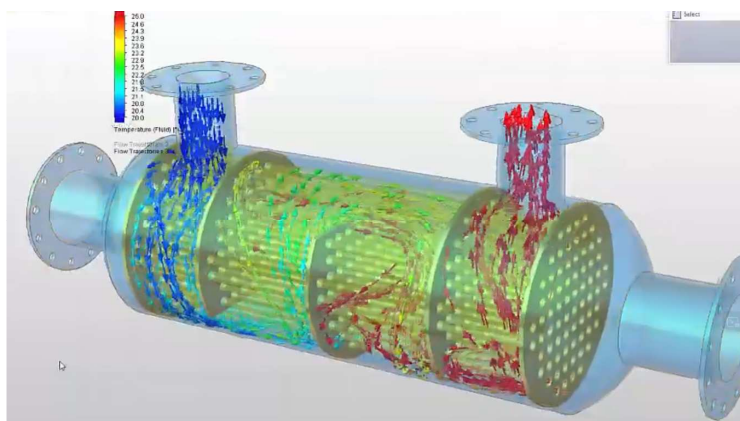


Рисунок 9. – Динамическая модель 3D вида измененного теплообменника

Заключение. Анализ данных показал увеличение коэффициента теплопередачи с 57 до 75 Вт/м²*К, к рекомендованным значениям приведена скорость потока с 0,14 до 1,28 м/с. Из негативных моментов изменения конструкции наблюдается увеличения перепада давлений вследствие увеличения гидравлического сопротивления, однако перепад не превышает заложенных допустимых значений в 50 кПа. Таким образом, программа Ansys позволяет проводить моделирование и оптимизацию работы теплообменных аппаратов, что необходимо при проектировании, изготовлении и эксплуатации.

Показано преимущество программы Ansys и рекомендовано ее использование при проектировании и оптимизации теплообменного оборудования. Может быть использована проектными организациями, проектно-конструкторскими отделами нефтехимических производств, а также студентами вузов в ходе курсового и дипломного проектирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: учеб. для вузов. В 2 кн. – М.: Химия, 1995. – Кн. 1: Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты. – 400 с.
2. Сравнительный анализ параметров противоточного теплообменника, полученных по методике компьютерной гидродинамики и практической методике проектирования теплообменных аппаратов / А.В. Жаров, А.А. Павлов, В.В. Власов и др. // Фундам. исслед. – 2013. – № 11-3. – С. 423–429.
3. Шилиев С.А., Екатериничева Е.И. Расчет конструкции матрицы пресс-формы с запрессованными знаками в программном комплексе Ansys Workbench / Вестн ИжГТУ. – 2018. – № 12-2. – С. 123–125.
4. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – 10-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Химия, 1987. – 576 с.

REFERENCES

1. Dytnerkii, Yu.I. (1995). *Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii*: v 2 kn. Kn. 1. *Teoreticheskie osnovy protsessov khimicheskoi tekhnologii. Gidromekhanicheskie i teplovyie protsessy i apparaty*. Moscow: Khimiya. (In Russ.)
2. Zharov, A.V., Pavlov, A.A., Vlasov, V.V., Favstov, V.S. & Gorshkov, R.V. (2013). Sravnitel'nyi analiz parametrov protivotochno-go teploobmennika, poluchennykh po metodike komp'yuterno gidrogazodinamiki i prakticheskoi metodike proektirovaniya teploobmennyykh apparatov. *Fundamental'nye issledovaniya*, 11-3, 423–429. (In Russ.)
3. Shilyaev, S.A. & Ekaterinicheva, E.I. (2018). Raschet konstruktssii matritsy press-formy s zapressovannymi znakami v programnom komplekse Ansys Workbench [Calculation of the design of a mold matrix with pressed signs in the Ansys Workbench software package]. *Vestnik IzhGTU [Vestnik IzhSTU]*, 12-2, 123–125. (In Russ., abstr. in Engl.)
4. Pavlov, K.F., Romankov, P.G. & Noskov, A.A. (1987). *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoi tekhnologii*. Leningrad: Khimiya. (In Russ.)

Поступила 21.11.2023

COMPUTER SIMULATION AND OPTIMIZATION OF HEAT TRANSFER PROCESSES IN ANSYS SOFTWARE USING THE EXAMPLE OF HEAT EXCHANGER INSTALLATION AVT-2 JSC “NAFTAN”

E. SAFRONOVA, A. SPIRIDONOV, E. MOLOTOK, V. TRUS
(*Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*)

The article provides a description of modern computer-aided design systems for heat exchange equipment, which are united by common tasks and mathematical methods; their most important differences will be adaptability to the perception of 3D models from other programs, ease of use for the designer and the method of providing reporting data. This article discusses a method for designing heat exchange equipment using the Ansys Workbench program with fluid flow modeling using the finite element method.

Keywords: modeling, heat transfer, design, fluid flow, heat transfer coefficient, efficiency, chemical processes.