



УДК 66.048.911

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ИСПАРИТЕЛЯ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТИРОЛА¹

ENERGY EFFICIENT EVAPORATOR DESIGN IN STYRENE PRODUCTION²

Васильев Пётр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент.
доцент кафедры «Процессы и аппараты химических
и пищевых производств»,
Волгоградский государственный технический университет
nestorvv@mail.ru

Шурак Антон Анатольевич

старший преподаватель кафедры
«Процессы и аппараты химических и пищевых производств»,
Волгоградский государственный технический университет
a-shurak2@mail.ru

Ежиков Антон Алексеевич

студент кафедры
«Процессы и аппараты химических и пищевых производств»,
Волгоградский государственный технический университет
iezhikov.anton@mail.ru

Рева Леонид Саввич

кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры
«Процессы и аппараты химических и пищевых производств»,
Волгоградский государственный технический университет
pahp@vstu.ru

Аннотация. В работе приводится описание конструкции и пример расчёта энергоэффективного испарителя этилбензола, работающего по технологии капельного кипения.

Ключевые слова: стирол, этилбензол, испаритель, капельное кипение.

Vasilyev Pyotr Sergeevich

Ph. D., Associate Professor
of the Department «Processes and
Apparatus of Chemical and Food Production»,
Volgograd State Technical University
nestorvv@mail.ru

Shurak Anton Anatolevich

Senior Lecturer of the Department
«Processes and Apparatus of Chemical
and Food Production»,
Volgograd State Technical University
a-shurak2@mail.ru

Iezhikov Anton Alekseevich

Student of the Department «Processes and
Apparatus of Chemical and Food Production»,
Volgograd State Technical University
iezhikov.anton@mail.ru

Reva Leonid Savvich

Ph. D., Associate Professor
of the Department «Processes and
Apparatus of Chemical and Food Production»,
Volgograd State Technical University
pahp@vstu.ru

Annotation. The paper gives a description of the design and an example of calculating an energy-efficient ethylbenzene evaporator operating in the drip boiling technology.

Keywords: styrene, ethylbenzene, evaporator, drip boiling.

Стирол – ценный многотоннажный продукт нефтехимического синтеза. В химической промышленности он широко применяется в качестве растворителя органических веществ и мономера для получения полимеров широкого спектра назначения, обладающих высокими ударопрочностью, теплостойкостью и химической стойкостью.

Одним из самых распространённых способов получения стирола в промышленных масштабах является дегидратация этилбензола [1].

Однако такие объёмы производства требуют наличия высокопроизводительного оборудования, в том числе испарителей исходного сырья – теплообменных аппаратов преимущественно кожухотрубчатого типа, в которых осуществляется объёмное кипение этилбензола. Подобные аппараты обладают весьма значительными габаритами и металлоёмкостью, что увеличивает их стоимость, а также тепловые потери в окружающую среду.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-1603.2022.4 «Разработка энергоресурсоэффективного оборудования для реализации тепломассообменных процессов с использованием множественного капельного кипения и высокопористых материалов на основе экспериментально-теоретических исследований»

² This research was supported by the grant of the President of the Russian Federation MK-1603.2022.4 «Development of energy and resource efficient equipment for the implementation of heat and mass transfer processes using multiple drop boiling and highly porous materials based on experimental and theoretical studies»



В связи с этим интенсификация процесса теплоотдачи при кипении для уменьшения габаритов и металлоёмкости теплообменного оборудования является актуальной задачей.

В работе [2] рассматривался вопрос повышения энергоэффективности производства этилового спирта прямой гидратацией этилена, и было показано, что проведение процесса конденсации паров этанола в капельном режиме теоретически позволяет реализовать значения коэффициентов теплоотдачи 280000 Вт/(м²·К) и в несколько раз уменьшить габариты и металлоёмкость дефлегматоров ректификационных колонн. При обратном капельной конденсации процессе капельного кипения также можно получить значительно более высокие коэффициенты теплоотдачи, чем при кипении жидкости в большом объёме: более 100000 Вт/(м²·К) по воде согласно проведенным экспериментальным исследованиям [3–5].

Однако в отличие от объёмного кипения, капельное кипение зависит от гораздо большего количества влияющих на процесс факторов, основные параметры которого определяются следующим образом.

Диаметр пятна контакта кипящих на поверхности нагрева капель жидкости d_p рассчитывается по уравнению [4]:

$$\Gamma = 14,829 \cdot Ra^{0,045} \cdot Oh^{0,498} \cdot Re^{0,127} \cdot \left(\frac{t_{кип} - t_n}{\Delta t} \right)^{0,019} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a} \right)^{-0,024} \cdot \left(\frac{W_a}{W_k} \right)^{0,312}, \quad (1)$$

где $\Gamma = \frac{d_p}{d_k}$ – геометрический симплекс;

d_k – средний диаметр капель;

$Ra = \frac{g \cdot d_k^3 \cdot \rho^2 \cdot c_p \cdot \beta \cdot \Delta t}{\mu \cdot \lambda}$ – число Рэлея;

$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\sigma \cdot \rho} \cdot d_k}$ – число Онезорге;

$Re = \frac{w \cdot d_k \cdot \rho}{\mu}$ – число Рейнольдса;

$\left(\frac{t_{кип} - t_n}{\Delta t} \right)$ – температурный симплекс;

$\left(\frac{S_m}{R_a} \right)$ – симплекс шероховатости поверхности нагрева;

$\left(\frac{W_a}{W_k} \right)$ – симплекс степени смачивания поверхности нагрева;

w – скорость подачи капель жидкости в момент их соударения с поверхностью нагрева;

t_n – начальная температура жидкости в каплях;

$\Delta t = t_{ст} - t_{кип}$ – температурный напор;

$t_{ст}$ – температура поверхности нагрева;

R_a – среднее арифметическое отклонение профиля поверхности нагрева;

S_m – средний шаг неровностей профиля поверхности нагрева по средней линии;

$W_a = \sigma \cdot (1 + \cos \theta)$ – работа адгезии;

$W_k = 2 \cdot \sigma$ – работа когезии;

θ – краевой угол смачивания поверхности нагрева.

Теплофизические свойства жидкости, взятые при температуре её кипения $t_{кип}$: ρ – плотность, μ – динамический коэффициент вязкости, β – коэффициент объёмного расширения, c_p – удельная массовая теплоёмкость, λ – коэффициент теплопроводности, σ – коэффициент поверхностного натяжения.

Коэффициент теплоотдачи при капельном кипении жидкости α рассчитывается по уравнению [5]:

$$Nu = 2,924 \cdot 10^9 \cdot Ra^{0,906} \cdot Oh^{3,688} \cdot Re^{-0,073} \cdot \left(\frac{t_{кип} - t_n}{\Delta t} \right)^{-0,106} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a} \right)^{-0,138} \cdot \left(\frac{W_a}{W_k} \right)^{0,700}, \quad (2)$$

где $Nu = \frac{\alpha \cdot d_k}{\lambda}$ – число Нуссельта.



Время испарения капле жидкости с поверхности нагрева рассчитывается следующим образом:

$$\tau = \frac{G \cdot [c_p \cdot (t_{кип} - t_n) + r]}{\alpha \cdot \Delta t \cdot (1 - \epsilon_k) \cdot F_1}, \tag{3}$$

где G – производительность по испаряемой жидкости;
 r – удельная теплота фазового перехода жидкости;
 ϵ_k – коэффициент плотности укладки капле на поверхности нагрева;
 F_1 – единичная площадь поверхности нагрева.

Рабочая температура поверхности нагрева рассчитывается по уравнению [5]:

$$t_{ст} = 0,9 \cdot \left[t_{кип} + \sqrt{\frac{(t_{кип} - t_n) \cdot \Delta t}{9,671 \cdot 10^{13} \cdot Ra \cdot Oh^{6,100} \cdot Re^{0,317} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a}\right)^{-1,165} \cdot \left(\frac{W_a}{W_k}\right)^{-2,198}}} \right]. \tag{4}$$

Площадь поверхности нагрева рассчитывается следующим образом:

$$F = \frac{1,8 \cdot d_{п}^2 \cdot G \cdot \tau}{(1 - \epsilon_k) \cdot d_k^3 \cdot F_1 \cdot \rho}. \tag{5}$$

В качестве наиболее совершенной и эффективной конструкции теплообменного аппарата для испарения этилбензола в производстве стирола предлагается использовать электрический испаритель трубчатого типа, работающий по технологии капельного кипения (рис. 1) [6].

Необходимо отметить, что работа такого аппарата не сопровождается крайне нежелательными технологическими последствиями, характерными для объёмного кипения жидкости: резкое падение коэффициента теплоотдачи, перегрев поверхности нагрева, паровой взрыв [5].

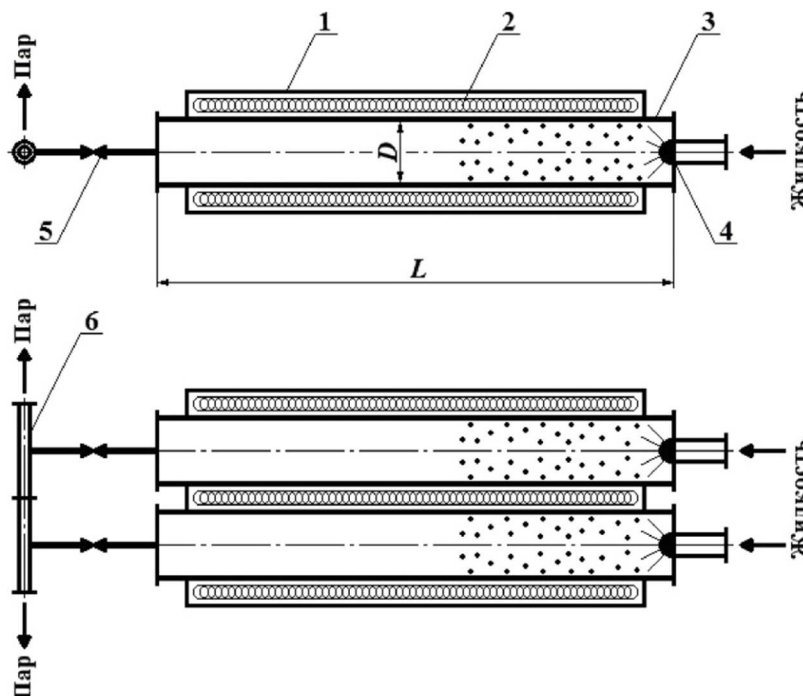


Рисунок 1 – Схема электрического испарителя трубчатого типа [6]:
 1 – корпус; 2 – электрический нагреватель; 3 – поверхность нагрева;
 4 – форсунка; 5 – дроссельное устройство; 6 – паровой коллектор

Для определения основных технологических параметров и геометрических размеров представленного на рисунке 1 испарителя с использованием формул (1)-(5) была разработана инженерная методика расчёта. Основные результаты модельного расчёта представлены в таблице и на рисунке 2.



Анализируя данные таблицы, можно сказать, что при одинаковой производительности по испаряемой жидкости электрический испаритель трубчатого типа, работающий по технологии капельного кипения, имеет примерно в 10 раза меньшую массу (около 400 кг с электрическим нагревателем, теплоизоляцией и металлическим корпусом) по сравнению со стандартным парогенератором фирмы Clayton SE-304 (4100 кг) и примерно вдвое меньшие габаритные размеры.

Анализируя графические зависимости рисунка 2, можно сказать, что, исходя из практических соображений, оптимальная длина испарительных труб должна лежать в районе 1 м при чётном их количестве. То есть из рисунка 2, а можно определить оптимальную длину испарительных труб $L = 1,185$ м, а из рисунка 2, б – их оптимальное число $n = 6$.

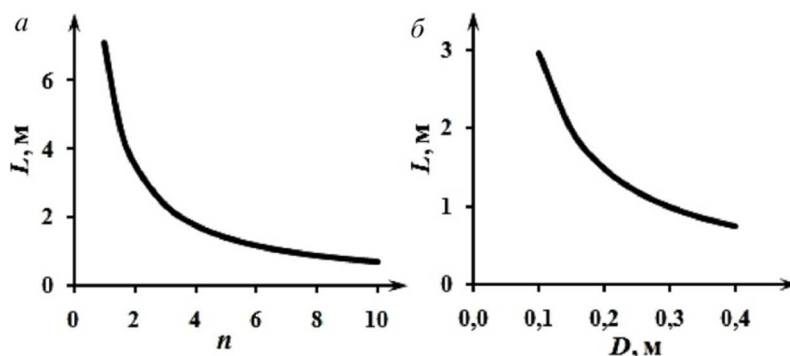


Рисунок 2 – Основные результаты расчёта:

а – зависимость длины испарительных труб от их числа $L = f(n)$ (диаметр труб $D=0,25$ м);

б – зависимость длины испарительных трубы от их диаметра $L = f(D)$ (число труб $n = 6$)

Таблица – Основные результаты расчёта

Исходные данные			
1. Производительность по этилбензолу	кг/час	G	5000
2. Температура кипения этилбензола	°С	$t_{кип}$	136
3. Начальная температура этилбензола в каплях	°С	t_H	20
4. Краевой угол смачивания поверхности нагрева этилбензолом	град.	θ	0
5. Диаметр капель	мм	d_k	3
6. Скорость подачи капель этилбензола на поверхность нагрева	м/с	w	2,36
7. Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности нагрева	мкм	R_a	0,5
8. Средний шаг неровностей профиля поверхности нагрева по средней линии	мкм	S_m	430
9. Коэффициент плотности укладки капель этилбензола на поверхности нагрева	–	ϵ_k	0,4
10. Единичная площадь поверхности нагрева	м ²	F_1	1
11. Толщина поверхности нагрева	мм	$\delta_{ст}$	4
12. Коэффициент теплопроводности материала поверхности нагрева	Вт/(м·К)	$\lambda_{ст}$	17,5
13. Плотность материала поверхности нагрева	кг/м ³	$\rho_{ст}$	7850
Расчётные параметры			
14. Рабочая температура поверхности нагрева	°С	$t_{ст}$	188
15. Геометрический симплекс	–	Г	2,98
16. Диаметр пятна контакта кипящих на поверхности нагрева капель этилбензола	мм	d_k	8,94
17. Число Нуссельта	–	Nu	2020
18. Коэффициент теплоотдачи при капельном кипении этилбензола	Вт/(м ² ·К)	α	68500
19. Время испарения капель этилбензола с поверхности нагрева	с	τ	0,47
20. Площадь поверхности нагрева	м ²	F	5,57
21. Тепловая нагрузка	кВт	Q	835
22. Удельный тепловой поток	кВт/м ²	q	150
23. Диаметр испарительных труб	м	D	0,25
24. Число испарительных труб	–	n	6
25. Длина испарительной трубы	м	L	1,185
26. Общая масса испарительных труб	кг	M	175

Таким образом, с помощью разработанной инженерной методики расчёта энергоэффективного теплообменника, работающего по технологии капельного кипения в качестве испарителя этилбензола в производстве стирола, можно определить оптимальные габариты его конструкции в зависимости от технологических условий.



Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-1603.2022.4 «Разработка энергоресурсоэффективного оборудования для реализации теплообменных процессов с использованием множественного капельного кипения и высокопористых материалов на основе экспериментально-теоретических исследований»

Литература:

1. Лебедев Н.Н. Химия и технология основного органического и нефтехимического синтеза: учебник, 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1988. – 592 с.
2. Васильев П.С., Ежиков А.А., Рева Л.С. Энергоэффективная конструкция дефлегматора в производстве этилового спирта прямой гидратацией этилена // Булатовские чтения: материалы IV Международной научно-практической конференции (31 марта 2020 г.): в 7 т. Т. 5. Химическая технология и экология в нефтяной и газовой промышленности / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенюк. – Краснодар : Издательский Дом – Юг, 2020. – С. 43–47.
3. Effects of nano-fluid and surfaces with nano structure on the increase of CHF / S. Kim [et al.] // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2010. – Vol. 34. – P. 487–495.
4. Определение площади пятна контакта кипящей на поверхности нагрева капли жидкости / П.С. Васильев [и др.] // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 13. – С. 116–123.
5. Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении капли жидкости на поверхности нагрева / П.С. Васильев [и др.] // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 22. – С. 28–33.
6. П.м. № 186246 РФ, МПК В01D1/22. Испаритель / Л.С. Рева [и др.]; заявитель и патентообладатель ВолгГТУ. – 2018131767; заявлен 03.09.2018; опубликован 14.01.2019.

References:

1. Lebedev N.N. Chemistry and technology of basic organic and petrochemical synthesis: textbook, 4th ed., revised. and add. – M. : Chemistry, 1988. – 592 p.
2. Vasilyev P.S., Iezhikov A.A., Reva L.S Energy efficient dephlegmator design in ethanol production by direct ethylene hydration // Readings of A.I. Bulatov: Materials of IV International scientific and practical conference (On March 31, 2020): in 7 v. V. 5. Chemical technology and ecology in the oil and gas industry / Under the general editor, Doctor of Technical Sciences, Professor O.V. Savenok. – Krasnodar : Publishing House – South, 2020. – P. 43–47.
3. Effects of nano-fluid and surfaces with nano structure on the increase of CHF / S. Kim [et al.] // Experimental Thermal and Fluid Science. – 2010. – Vol. 34. – P. 487–495.
4. The calculation of the evaporation time for a droplet boiling on a heated surface / P.S. Vasilyev [et al.] // Bulletin of the Technological University. – 2016. – Vol. 19. – № 13. – P. 116–123.
5. The experimental research of the heat transfer during the boiling of a liquid droplet on the heated surface / P.S. Vasilyev [et al.] // Bulletin of the Technological University. – 2017. – Vol. 20. – № 22. – P. 28–33.
6. U.m. № 186246 RU, IPC B01D1/22. Evaporator / L.S. Reva [et al.] ; declarer and patentee VSTU. – 2018131767; declared 03.09.2018; published 14.01.2019.