



УДК 621.181

## АНАЛИЗ РАБОТЫ ПАРОГЕНЕРАТОРА СО СТАТИЧЕСКИМ РАСПЫЛИТЕЛЕМ ЖИДКОСТИ

### ANALYSIS OF STEAM GENERATOR OPERATION WITH STATIC LIQUID SPRAYER

**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

**Рева Леонид Саввич**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Процессы и аппараты химических  
и пищевых производств»,  
Волгоградский государственный технический университет  
leonidreva46@mail.ru

**Аннотация.** На основе теоретического анализа процесса капельного кипения определены оптимальные геометрические размеры и технологические параметры работы электрического парогенератора со статическим распылителем жидкости.

**Ключевые слова:** водяной пар, капельное кипение, технологический аппарат, статический распылитель.

**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

**Reva Leonid Savvich**

Ph. D., associate professor of the department  
«Processes and Apparatus of Chemical  
and Food Production»,  
Volgograd State Technical University  
leonidreva46@mail.ru

**Annotation.** Based on a theoretical analysis of the drip boiling process, the optimal geometric dimensions and technological parameters of the electric steam generator with a static liquid sprayer are determined.

**Keywords:** water vapor, drip boiling, technological apparatus, static sprayer.

Водяной пар является ключевым теплоносителем, обеспечивающим работу ТЭЦ в химической, нефтяной и газовой отраслях промышленности. Кроме того, его закачивают в нефтяные пласты для повышения выработки остаточных запасов нефти в месторождениях, находящихся в поздней стадии разработки, а также в начальной стадии в условиях крайнего севера [1]. Для выработки водяного пара в больших объёмах необходимо наличие высокопроизводительных парогенераторов, обладающих значительными габаритами и металлоёмкостью, что увеличивает их стоимость, а также тепловые потери в окружающую среду.

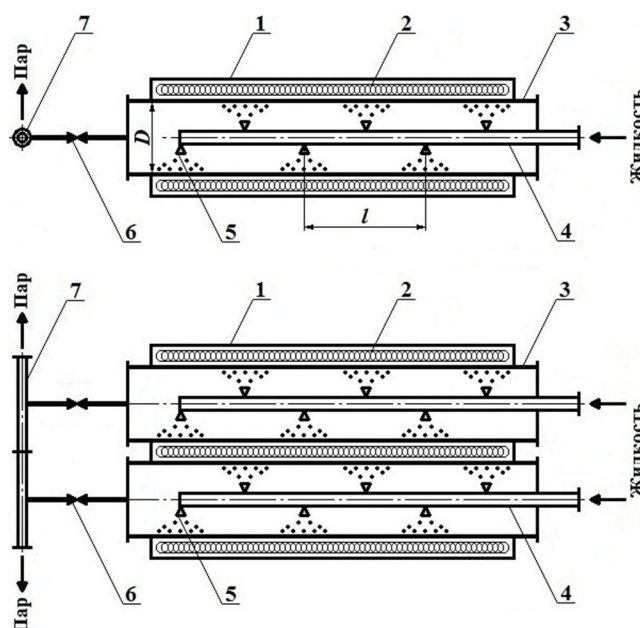
На рисунке 1 представлена схема конструкции электрического парогенератора, работающего по технологии капельного кипения, со статическим распылителем жидкости в виде соосно расположенной питающей трубы с установленными на ней форсунками, расстояние между которыми определяется соотношением  $l = (0,5 \div 1,5) \cdot D$ .

Необходимо отметить, что для капельного кипения воды под атмосферным давлением максимальные значения температурного напора составляют  $140 \div 160$  °С, коэффициента теплоотдачи  $90 \div 100$  кВт/(м<sup>2</sup>·К), а удельного теплового потока  $10 \div 12$  МВт/м<sup>2</sup>. Это обстоятельство позволяет поддерживать высокую интенсивность процесса парообразования, обеспечивающую уменьшение габаритов, металлоёмкости и стоимости парогенераторов [2–4].

В таблице приведены основные исходные данные и результаты теоретического анализа работы представленного на рисунке 1 парогенератора с центробежными форсунками при  $l = D$ , выполненного с использованием расчётных зависимостей [2–6] на производительность по насыщенному водяному пару 5000 кг/ч.

На основании данных таблицы можно сделать вывод о том, что предлагаемый парогенератор обеспечивает значения температурного напора порядка 100 °С, коэффициента теплоотдачи порядка 60 кВт/(м<sup>2</sup>·К) и удельного теплового потока порядка 9 МВт/м<sup>2</sup>, в результате чего имеет очень компактные габариты и крайне невысокую металлоёмкость при весьма умеренных энергетических затратах на распыливание жидкости.

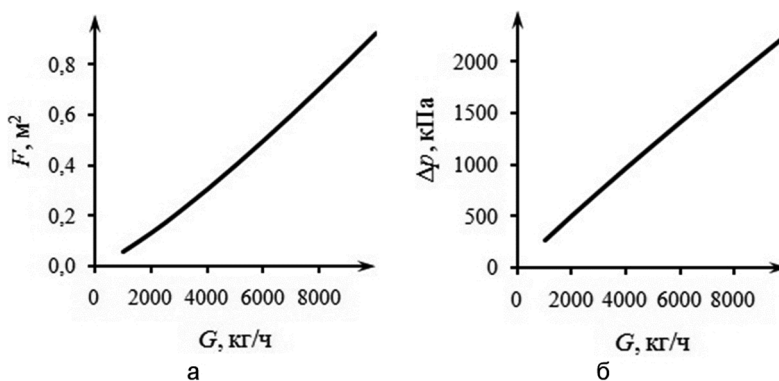
На рисунке 2 – основные результаты модельного расчёта парогенератора представлены в графическом виде.



**Рисунок 1** – Схема электрического парогенератора со статическим распылителем жидкости:  
 1 – корпус; 2 – электрический нагреватель; 3 – поверхность нагрева; 4 – питающая труба; 5 – форсунки; 6 – дроссельное устройство; 7 – паровой коллектор

**Таблица** – Основные исходные данные и результаты модельного расчёта парогенератора со статическим распылителем жидкости

Исходные данные			
1. Производительность по насыщенному водяному пару	кг/ч	G	5000
2. Температура кипения воды	°С	t <sub>кип</sub>	100
3. Начальная температура воды	°С	t <sub>н</sub>	20
4. Краевой угол смачивания стальной поверхности нагрева водой [3]	град.	θ	46
5. Среднее арифметическое отклонение профиля стальной поверхности нагрева (горячий листовой прокат) [3]	мкм	Ra	2,3
6. Средний шаг неровностей профиля стальной поверхности нагрева (горячий листовой прокат) по средней линии [3]	мкм	Sm	170
7. Характеристический диаметр капель воды при её распыле центробежной форсункой с винтовым завихрителем [5]	мм	dk	0,22
8. Скорость подачи капель воды на поверхность нагрева с помощью центробежной форсунки с винтовым завихрителем [5]	м/с	w	32,1
9. Коэффициент плотности укладки капель воды на поверхности нагрева [6]	–	εк	0,4
10. Единичная площадь поверхности нагрева [6]	м <sup>2</sup>	F1	1
11. Внутренний диаметр испарительной трубы	м	D	0,2
Расчётные параметры			
12. Рабочая температура поверхности нагрева [4]	°С	t <sub>ст</sub>	202
13. Диаметр пятна контакта кипящих на поверхности нагрева капель воды [3]	мм	dп	0,64
14. Время испарения капель воды с поверхности нагрева [2]	с	τ	2,5·10 <sup>-3</sup>
15. Коэффициент теплоотдачи при капельном кипении воды [4]	кВт/(м <sup>2</sup> ·К)	α	58,3
16. Площадь поверхности нагрева [6]	м <sup>2</sup>	F	0,41
17. Тепловая нагрузка	кВт	Q	3600
18. Удельный тепловой поток	кВт/м <sup>2</sup>	q	8780
19. Длина испарительной трубы	м	L	0,65
20. Число испарительных труб	–	nт	1
21. Число центробежных форсунок [5]	–	nф	6
22. Гидравлическое сопротивление при распыливании воды [5]	кПа	Δр	1200



**Рисунок 2** – Основные результаты расчёта ( $n\phi = 6$ ):  
а – график зависимости  $F = f(G)$ ; б – график зависимости  $\Delta p = f(G)$

Из рисунка 2 видно, что площадь поверхности нагрева и гидравлическое сопротивление при распыливании воды линейно зависят от расхода насыщенного водяного пара, что делает процесс проектирования предлагаемого парогенератора менее затратным по времени.

Таким образом, использование технологии капельного кипения обеспечивает работу предлагаемого парогенератора со статическим распылителем жидкости в эффективном режиме, что позволяет рекомендовать его к использованию в различных отраслях промышленности.

**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».**

#### Список литературы:

1. Шурак А.А., Васильев П.С., Рева Л.С. Повышение энергоэффективности и экологичности процесса разработки нефтяных месторождений за счёт утилизации тепла попутного нефтяного газа // Сборник докладов IV международной научно-практической конференции «Повышение эффективности сопровождения нефтегазовых активов» (г. Пермь, 19–21 октября 2022 г.) / под ред. Н.В. Мельниковой; ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг». – Сыктывкар, 2022. – С. 271–275.
2. Определение времени испарения кипящей на поверхности нагрева капли жидкости / П.С. Васильев [и др.] // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 5. – С. 121–126.
3. 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.
4. 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.
5. Геллер З.И. Мазут как топливо. – М.: Недра, 1965. – 496 с.
6. Энергоэффективная конструкция испарителя в производстве стирола / П.С. Васильев [и др.] // Булатовские чтения. – 2022. – Т. 2. – С. 52–56.

#### List of references:

1. Shurak A.A., Vasiliev P.S., Reva L.S. Improvement of energy efficiency and environmental friendliness of the oil field development process through utilization of associated petroleum gas heat // Collection of reports of the IV International Scientific-Practical Conference «Improving the efficiency of oil and gas assets support» (Perm, 19–21 October 2022) / edited by N.V. Melnikova; LLC «LUKOIL–Engineering». – Syktyvkar, 2022. – P. 271–275.
2. Determination of the evaporation time of boiling on the heating surface of the liquid drop / P.S. Vasiliev [et al.] // Bulletin of technological university. – 2016. – V. 19. – № 5. – P. 121–126.
3. Determination of the contact area of the liquid droplet boiling on the heating surface / P.S. Vasiliev [et al.] // Bulletin of technological university. – 2016. – V. 19. – № 13. – P. 116–123.
4. Experimental study of heat transfer at boiling a liquid drop on the heating surface / P.S. Vasiliev [et al.] // Bulletin of technological university. – 2017. – V. 20. – № 22. – P. 28–33.
5. Geller Z.I. Fuel oil as fuel. – Moscow: Nedra, 1965. – 496 p.
6. Energy Efficient Evaporator Design in Styrene Production / P.S. Vasiliev [et al.] // Bulatov Readings. – 2022. – V. 2. – P. 52–56.