

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ / ENGINEERING TECHNOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.76>

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ГАБАРИТНЫХ РАЗМЕРОВ УЛОВИТЕЛЯ ИСПАРИТЕЛЯ ЖИДКОГО ХЛОРА

Научная статья

Петросян О.П.<sup>1,\*</sup>, Горбунов А.К.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0002-9568-2547;

<sup>1,2</sup> Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (petrosyan-kravt[at]mail.ru)

**Аннотация**

В соответствии с нормативными документами современные вакуумные хлораторы являются одним из основных узлов в технологии потребления хлора для обеззараживания питьевой и оборотной воды на объектах водоподготовки. Требования, установленные «Правилами безопасности производства хлора и хлорсодержащих сред», утвержденными приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20.11.2013 № 554 и другими нормативными актами, обеспечивают безопасное функционирование оборудования, установленного на опасных объектах. Одним из условий безаварийной работы вакуумных хлораторов является исключение попадания в его узлы жидкой фракции хлора. С этой целью разработано устройство «уловитель испаритель жидкого хлора». Произведены расчет, лабораторные и производственные испытания оптимальных соотношений температуры и размеров камеры «уловителя испарителя».

**Ключевые слова:** жидкий хлор, испаритель, хлоратор, температура.

A CALCULATION OF OPTIMAL TEMPERATURE AND DIMENSIONAL PARAMETERS OF A LIQUID CHLORINE VAPORIZER CATCHER

Research article

Petrosyan O.P.<sup>1,\*</sup>, Gorbunov A.K.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ORCID : 0000-0002-9568-2547;

<sup>1,2</sup> Kaluga branch of MSTU im. N.E. Bauman, Kaluga, Russian Federation

\* Corresponding author (petrosyan-kravt[at]mail.ru)

**Abstract**

In accordance with regulatory documents, modern vacuum chlorinators are one of the main units in the technology of chlorine consumption for disinfection of drinking and recycled water at waste water treatment facilities. The requirements established by the "Safety rules for chlorine and chlorine-containing media industry" approved by the Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision from 20.11.2013 № 554 and other regulations ensure the safe operation of equipment installed at hazardous facilities. One of the conditions for accident-free operation of vacuum chlorinators is to prevent liquid chlorine fraction from getting into its components. For this purpose, the "liquid chlorine vaporizer" device has been developed. Calculation, laboratory and production tests of optimal temperature and size ratios of the "vaporizer catcher" chamber were performed.

**Keywords:** liquid chlorine, vaporizer, chlorinator, temperature.

**Введение**

Хлораторы непрерывного действия в основном являются стационарными аппаратами. Наиболее эффективными из них являются вакуумные хлораторы, в которых дозируемый газ находится под разрежением. Это предотвращает проникновение газа в помещение, что возможно при использовании напорных хлораторов.

Поскольку используемый хлор является опасным токсическим газом, его перевозка, хранение и использование регламентируются «Правилами безопасности производства хлора и хлорсодержащих сред», утвержденными приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20.11.2013 № 554 [1], которые приняты в 2013 году и учитывают и включают в себя мировой опыт эксплуатации хлора. В частности, правилами предусмотрено, что хлораторы должны содержать узлы обеспечивающие непрерывное поддержание заданной величины разрежения газа (вакуума) на входе дозатора при изменении в широких пределах следующих характеристик: давления хлора в резервуаре, нормы расхода газа, уровня разрежения, создаваемого эжектором, защиту от проникновения в хлоропроводы и узлы хлоратора воды из эжектора, автоматическое прекращение подачи хлора хлоратором при прекращении подачи питающей воды в эжектор [2], [4], [6], [8]. Так как в хлоратор должен подаваться только газообразный хлор, во избежание проскока жидкой фракции или замерзания хлора, подача хлора из одного баллона без подогрева не должна превышать 0,5—0,7 кг/ч. В противном случае для исключения аварий используются устройства, в которых происходит испарение жидкой фракции хлора.

**Основная часть**

Качество работы хлораторов зависит от схемы подключения хлоратора и условий съема газообразной фракции хлора с баллонов, контейнеров или других емкостей, содержащих жидкий хлор, так как проскок капель жидкого хлора,

образовавшегося в хлоропроводах, может также происходить вследствие перепада температур, временного отключения подачи хлора и т.п. (рис. 1), что может привести к нарушению работы хлораторов.

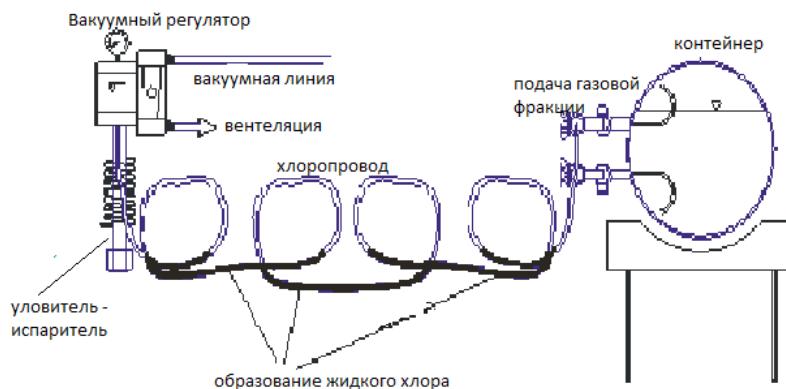


Рисунок 1 - Образование жидкого хлора в соединительных хлоропроводах  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.76.1>

Для исключения попадания жидкого хлора в таких случаях хлораторы должны комплектоваться устройствами, которые назовем уловителями-испарителями жидкого хлора (рис. 2). При таком подключении, даже если в хлоропроводе образуется некоторое количество жидкого хлора, при запуске он попадет в уловитель-испаритель, при этом мощность нагревателя должна обеспечивать испарение капель проскока.



Рисунок 2 - Уловитель-испаритель жидкого хлора M100C  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.76.2>

Жидкий хлор, поступая на дозирующее устройство (хлоратор) из баллона или контейнера, разделяется устройством (уловителем-испарителем) на две фракции – газообразная фракция поступает в хлоратор, а жидкая – оседает в уловитель. Корпус уловителя прогревается термоэлектрическим нагревателем, что приводит к испарению жидкого хлора с последующим поступлением его в хлоратор. Расчет оптимальной температуры и размеров испарителя жидкого хлора, для обоснования мощности нагревательного элемента уловителя-испарителя производится из предположения, что жидкая фракция попадает в грязевик в виде капли. Рассчитаем время полного испарения капли (время жизни капли).

В случае стационарного испарения диффузионный поток пара вещества капли через concentрическую с каплей сферическую поверхность с радиусом  $d$  есть величина постоянная, выражаемая уравнением [2]

$$I = -4\pi d^2 \frac{d\rho}{dd} D (\text{г.сек}^{-1}) \quad (1)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии пара,  $\rho$  – его плотность ( $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$ ).  
Интегрирование уравнения (1) дает

$$\rho = \frac{I}{4\pi d D} + \text{const} \quad (2)$$

Если обозначить через  $\rho_\infty$  плотность пара на бесконечно большом расстоянии от капли, то имеем следующие граничные условия:

$$\rho = \rho_\infty \text{ при } d = \infty \quad (3)$$

и, согласно упомянутому выше предположению,

$$\rho = \rho_\infty \text{ при } d = r, \quad (4)$$

где  $r$  – радиус капли.

Из условий (3) следует:

$$\rho - \rho_\infty = \frac{I}{4\pi d D} \quad (5)$$

Подстановка условия (1 - 4) приводит к формуле Максвелла:

$$I = 4\pi r D (\rho_0 - \rho_\infty) (\text{г.сек}^{-1}) \quad (6)$$

Таким образом, скорость испарения капель при соблюдении условия (4) полностью определяется скоростью диффузии пара в окружающей среде, т. е. мы имеем здесь только диффузионный режим испарения. Из формулы (6) следует, что в рассматриваемом случае скорость испарения капель в газообразной сфере пропорциональна не поверхности капли, как при испарении в вакууме (т. е. при кинетическом режиме испарения), а радиусу капли.

Если принять, что пар вещества подчиняется законам идеальных газов, и выразить концентрацию через парциальное давление пара  $p$ :

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (7)$$

то формула Максвелла примет вид

$$I = \frac{4\pi r D M (\rho_0 - \rho_\infty)}{RT},$$

где  $M$  – молекулярный вес испаряющегося вещества в газообразном состоянии. При этом, если выражать давление в мм рт. ст., а плотность в  $\text{г}/\text{см}^3$ , для газовой постоянной надо взять значение  $R=82,05\cdot 760=62\ 360$  ( $\text{см}^3\cdot\text{мм рт. ст.}\cdot\text{град}^{-1}\cdot\text{моль}^{-1}$ ).

Строго говоря, испарение капель не может быть стационарным процессом, так как радиус капель, а, следовательно, и скорость испарения непрерывно уменьшаются. Однако при соблюдении условия  $\rho_0 \ll \rho_k$  ( $\rho_k$  – плотность капли) можно считать испарение квазистационарным, т. е. принять, что скорость испарения в каждый данный момент выражается формулой (6). Так как по смыслу величины

$$I = -\frac{dm}{dt}$$

где  $t$  – время, а  $m=4/3\pi r^2 \rho_k$  – масса капли, формулу (6) можно представить в виде

$$-\frac{dr^2}{dt} = \frac{2D(\rho_0 - \rho_\infty)}{\rho_k},$$

или в виде

$$-\frac{dS}{dt} = \frac{8\pi D(\rho_0 - \rho_\infty)}{\rho_k},$$

Где  $S=4\pi r^2 \rho_k$  — поверхность капли.

Интегрирование этих уравнений дает

$$r_0^2 - r^2 = \frac{2D(\rho_0 - \rho_\infty)}{\rho_k} t \quad (8)$$

$$S_0 - S = \frac{8\pi D(\rho_0 - \rho_\infty)}{\rho_k} t \quad (9)$$

где  $r_0$  и  $S_0$  — радиус и поверхность капли в начальный момент. Таким образом, поверхность капли есть линейная функция времени.

За  $t_0$  время капля полностью испаряется, т.е.  $r$  становится равным 0

$$t_0 = \frac{r_0^2 \gamma}{2D(\rho_0 - \rho_\infty)} = \frac{r_0^2 \rho_k}{2D(\rho_0 - \rho_\infty) \frac{M}{RT}} \quad (10)$$

В соответствии с теорией молекулярной физики [10], зависимость давления насыщенного газа от температуры можно выразить по формуле:

$$\ln p = A - \frac{B}{T} - C \ln T \quad (11)$$

где  $p$  – давление насыщенного пара, зависимость которого от температуры приведена в таблице 1.

Таблица 1 - Зависимость давления насыщенного газа от температуры

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.76.3>

T, К	189	216,3	260,7	283	316,3	349,6	394,1
$P_0$ , кПа	3,479	32,24	233,2	484,9	1180,6	2419,0	5273,1

Для нахождения и из таблицы выберем 3 значения, поставим их в (4.11) и решим систему линейных уравнений от 3-х переменных A, B и C.

A=21,9465; B=2718,1220; C=1,0908.

Тогда формула (11) примет вид

$$\ln p = 21,9465 - \frac{2718,1220}{T} - 1,0908 \ln T \quad (12)$$

Рассчитаем минимальную температуру необходимую для испарения капли хлора. Для того чтобы капля испарилась необходимо, чтобы давление газа (хлора) в трубе (грязевике) было меньше чем давление насыщенного газа поверхности капли, т.е.  $p_0 \geq p$ . В процессе эксплуатации оборудования давление газа в системе находится в диапазоне 0,5÷5 атм. или 50,66÷506,63 кПа.

Тогда получаем неравенство  $p_0 \geq 506,63$  кПа или,  $e^{21,9465 - \frac{2718,1220}{T} - 1,0908 \ln T} \geq 506,63$  численное решение, которого дает необходимое значение для температуры.

Таким образом,  $T \geq 284,47$  или  $t \geq 11,47^\circ\text{C}$ , т.е. при определенном значении температуры и давлении 5 атм. начинается процесс испарения хлора.

Оптимальная температура для работы испарителя рассчитывается из предположения, что капля за время падения ее в грязевике должна испариться. Пусть капля в испарителе свободно падает с ускорением  $g$ , тогда время падения капля определяется

$$t_n = \sqrt{\frac{2H}{g}} \quad (13)$$

где  $H$  высота трубы испарителя (грязевика)

Пусть  $H=15$  см,  $g=9,8(\text{м}/\text{с}^2)$ .

Поставляя данные в (13) получаем  $t_n=0,175$  с.

В реальности капля падает не свободно, на нее действует сила сопротивления хлорного газа и архимедова сила. Поэтому время падения капли больше чем вычисленное значение.

Из введенного критерия оптимальной работы уловителя-испарителя, что капля хлора полностью испаряется, не опустившись до дна трубы испарителя, следует,

$$t_0 = \frac{r_0^2 \rho_k}{2D(\rho_0 - \rho_\infty)} = \frac{r_0^2 \rho_k}{2D(\rho_0 - \rho_\infty) \frac{M}{RT}} = t_n \quad (14)$$

Это уравнение можно решить любым численным или графическим методом. В качестве примера введем следующие данные

$r_0=0,5 \cdot 10^{-3}$  м (параметр для каждой задачи нужно уточнять),

$\rho_k=1,4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>

$D=0,033$  м<sup>2</sup>/час (параметр уточнить)

$\rho_\infty=5$  атм=5066625 кПа

$R=82,05 \cdot 101,325=8313,715 \cdot 10^{-6}(\text{м}^3 \cdot \text{кПа} \cdot \text{град}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1})$

$M=71(\text{г}/\text{моль})=71 \cdot 10^{-3}(\text{кг}/\text{моль})$

Поставляя данные в (14) получаем время полного испарения капли жидкого хлора.

$$t_0 = \frac{2,2T}{e^{21,9465 - \frac{2718,1220}{T} - 1,0908 \ln T} - 506,32}$$

$T$  здесь абсолютная температура (273+градус по Цельсию).

На рис. 4. представлен полученный график зависимости времени полного испарения капли жидкого хлора от температуры трубы.

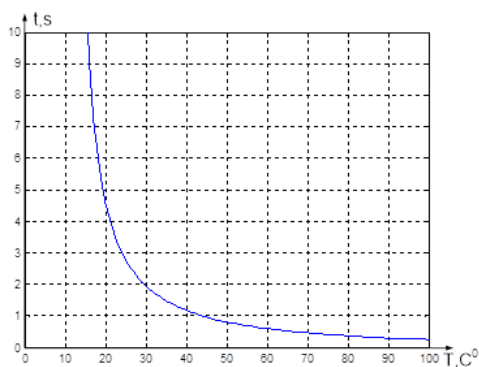


Рисунок 3 - График зависимости времени полного испарения капли жидкого хлора от температуры трубы  
DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.76.4>

### Заключение

Произведенный расчет позволяет обосновать выбор параметров (габаритных размеров, мощность нагревательного элемента, материалы грязевика уловителя-испарителя). Полученные технические характеристики для корректной работы уловителя-испарителя жидкого хлора представлены в таблице 2. Созданная по полученным данным опытная модель (см. рис.2) подтвердила расчётные результаты и была внедрена в производство.

Таблица 2 - Технические характеристики уловителя-испарителя жидкого хлора М100С

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2023.127.76.5>

Параметр	Ед. изм.	Значение
Напряжение термоэлектрического нагревателя	В	24
Потребляемая мощность нагревателя	Вт/м	25
Температура нагревателя	°С, не более	85
Масса	кг, не более	5,5
Габаритные размеры	м	0,51 x 0,12

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20.11.2013. — № 554.
2. Кожевников А.Б. Современное оборудование хлораторных станций водоподготовки / А.Б. Кожевников, О.П. Петросян // Правила безопасности производства хлора и хлорсодержащих сред. — 2006. — 9.
3. Кожевников А.Б. Надежное обеззараживание воды — защита от эпидемий / А.Б. Кожевников, О.П. Петросян // Водоочистка, Водоподготовка, Водоснабжение. — 2008. — 10.
4. Ягуд Б.Ю. Проблемы химической безопасности хлорных объектов ЖКХ / Б.Ю. Ягуд. — Уфа: РусХлор, 2009.
5. Кожевников А.Б. Хлор и эффект последствия / А.Б. Кожевников, О.П. Петросян // ЖКХ. Экономика и управление предприятиями ЖКХ. — 2008. — 10. — Ч. 1.
6. Кожевников А.Б. Проблемы экологической и санитарной безопасности плавательных бассейнов / А.Б. Кожевников, О.П. Петросян // Водоснабжение и санитарная техника. — 2008. — 1.
7. Кожевников А.Б. Хлорирование — микробиологическая и техническая безопасность водоподготовки / А.Б. Кожевников, О.П. Петросян // Материалы XII Международной научно-практической конференции «Проблемы управления качеством городской среды». Водная безопасность поселений России. — Москва. — 2008.

8. Кожевников А.Б. Эжекция и сушка материалов в режиме пневмотранспорта / А.Б. Кожевников, О.П. Петросян. — М: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. — 142 с.
9. Фукс Н.А. Испарение и рост капель в газообразной среде / Н.А. Фукс. — М., 1958.
10. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Термодинамика и молекулярная физика / Д.В. Сивухин.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Prikaz Federal'noj sluzhby po jekologicheskomu, tehnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 20.11.2013 [Order of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of 20.11.2013]. — № 554. [in Russian]
2. Kozhevnikov A.B. Sovremennoe oborudovanie hloratornyh stancij vodopodgotovki [Modern Chlorination Plant Equipment for Water Treatment Plants] / A.B. Kozhevnikov, O.P. Petrosjan // Pravila bezopasnosti proizvodstva hlora i hlorsoderzhashhih sred [Safety Regulations for the Production of Chlorine and Chlorinated Media]. — 2006. — 9. [in Russian]
3. Kozhevnikov A.B. Nadezhnoe obezrazhivanie vody — zashhita ot jepidemij [Reliable Water Disinfection — Protection against Epidemics] / A.B. Kozhevnikov, O.P. Petrosjan // Vodoochistka, Vodopodgotovka, Vodosnabzhenie [Water Purification, Water Treatment, Water Supply]. — 2008. — 10. [in Russian]
4. Jagud B.Ju. Problemy himicheskoj bezopasnosti hlornyh ob'ektov ZhKH [Chemical Safety Problems in Chlorine Facilities of the Housing and Utilities Sector] / B.Ju. Jagud. — Ufa: RusHlor, 2009. [in Russian]
5. Kozhevnikov A.B. Hlor i jeffekt posledestvija [Chlorine and After-effects] / A.B. Kozhevnikov, O.P. Petrosjan // ZhKH. Jekonomika i upravlenie predpriyatijami ZhKH [Economics and Management of the Housing and Utility Sector]. — 2008. — 10. — Pt. 1. [in Russian]
6. Kozhevnikov A.B. Problemy jekologicheskoj i sanitarnoj bezopasnosti plavatel'nyh bassejnov [Environmental and Health Problems in Swimming Pools] / A.B. Kozhevnikov, O.P. Petrosjan // Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika [Water Supply and Sanitary Engineering]. — 2008.— 1. [in Russian]
7. Kozhevnikov A.B. Hlorirovanie — mikrobiologicheskaja i tehničeskaja bezopasnost' vodopodgotovki [Chlorination — Microbiological and Technical Safety of Water Treatment] / A.B. Kozhevnikov, O.P. Petrosjan // Materialy XII Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii «Problemy upravlenija kachestvom gorodskoj sredy». Vodnaja bezopasnost' poselenij Rossii [Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference "Problems of Urban Environment Quality Management". Water Security of Settlements in Russia]. — Moscow. — 2008. [in Russian]
8. Kozhevnikov A.B. Jezhekcija i sushka materialov v rezhime pnevmotransporta [Injection and Drying of Materials in Pneumatic Conveying Mode] / A.B. Kozhevnikov, O.P. Petrosjan. — M: Publishing house of the Bauman Moscow State Technical University, 2010. — 142 p. [in Russian]
9. Fuks N.A. Isparenie i rost kapel' v gazoobraznoj srede [Evaporation and Droplet Growth in a Gas Medium] / N.A. Fuks. — M., 1958. [in Russian]
10. Sivuhin D.V. Obshhij kurs fiziki. Termodinamika i molekularnaja fizika [General Physics Course. Thermodynamics and Molecular Physics] / D.V. Sivuhin. [in Russian]