



УДК 621.181

**С. А. ЛЕПУСТИН**, аспирант кафедры теплогазоснабжения; **А. Г. КОЧЕВ**, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой теплогазоснабжения; **М. М. СОКОЛОВ**, канд. техн. наук, доц. кафедры теплогазоснабжения

## **ИЗМЕНЕНИЕ ОБЪЁМА И ЭФФЕКТ «НАБУХАНИЯ» ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПРИ ПАРOKОНДЕНСАЦИОННОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ВАКУУМНЫХ КОТЛОВ**

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65.

Тел.: (831) 433-45-35; факс: (831) 430-03-82; эл. почта: kochev.1961@mail.ru

*Ключевые слова:* пароконденсационные вакуумные котлы, независимая схема теплоснабжения, теплообменники, водотрубное пространство, уровень теплоносителя, системы отопления.

---

*В статье приводятся экспериментальные данные и теоретические результаты исследования свойств теплоносителя при пароконденсационном режиме работы вакуумных котлов.*

---

Наряду с общими преимуществами работы вакуумных котлов в пароконденсационном режиме по сравнению с классическим «водогрейным» режимом работы (высокие значения коэффициентов теплоотдачи со стороны промежуточного теплоносителя к теплообменникам второго контура, отсутствие необходимости использования внешних теплообменников отопления и/или ГВС, питательных устройств), следует учитывать особенности самого вакуумного пароконденсационного режима, в котором теплоноситель работает в замкнутом сосуде при давлениях ниже атмосферного. В настоящей работе рассматриваются теплофизические свойства изменения объема и эффект «набухания» уровня промежуточного (внутрикотлового) теплоносителя вакуумных котлов.

Актуальность изучения данных вопросов обусловлена тем фактом, что неконтролируемое повышение уровня промежуточного теплоносителя в пароконденсационном режиме котла приводит к эффекту «захлестывания» или заливания поверхностей нагрева теплообменников второго контура (отопления и ГВС) теплоносителем, что, в свою очередь, приводит к значительному снижению коэффициента теплоотдачи (в 1,5 и более раз) [1], как следствие – значительному падению КПД котла, с последующим возможным выходом в аварийный режим и остановом.

К новым исследованиям в данной работе относятся:

- теоретические и экспериментальные исследования по выявлению зависимостей высоты уровня теплоносителя от давления в котле при вакуумном пароконденсационном режиме работы;

- причины возникновения «эффекта набухания» теплоносителя и его влияние на работу котла.

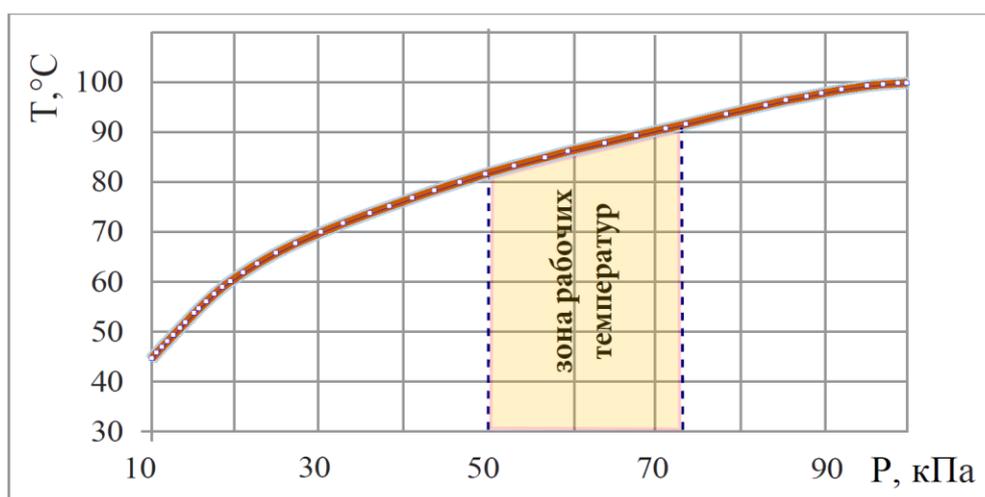
С целью изучения вопроса обратимся к источнику его возникновения, а именно – к кипению внутрикотлового теплоносителя.



Само кипение жидкости различают двух типов – кипение в объеме жидкости и кипение на твердой поверхности теплообмена, к которой подводится тепло извне. В свою очередь, при объемном кипении паровая фаза возникает самопроизвольно (спонтанно) непосредственно в объеме жидкости в виде отдельных пузырьков. В рабочих («штатных») режимах работы пароконденсационных вакуумных котлов происходит кипение только на твердой поверхности теплообмена (поверхности жаровой и дымогарных труб).

В качестве промежуточного внутрикотлового теплоносителя в современных пароконденсационных вакуумных котлах используется, как правило, подготовленная деминерализованная вода. В настоящей работе рассматривается данный тип теплоносителя.

Поскольку рабочее давление промежуточного теплоносителя составляет 50 кПа...73 кПа (или 0,49...0,72 атм.) [2–5], то в соответствии с полученной кривой зависимости точки кипения от давления воды, температура кипения составляет 81°C...92°C (рис. 1):



Величина	Давление теплоносителя (вода), кПа				
	8.8	22	42	73	103
$T_{\text{кипения}}, ^\circ\text{C}$	43.33	62.13	77.03	91.04	100.4
$\rho_{\text{ж}}, \text{кг/м}^3$	990.9	982.1	973.6	964.6	958.0

Рис. 1. Основные теплофизические свойства воды

До достижения температуры насыщения внутрикотлового теплоносителя тепловое расширение не оказывает значимого влияния на изменения уровня и составляет не более 4 % от первоначального объема (рис. 2):

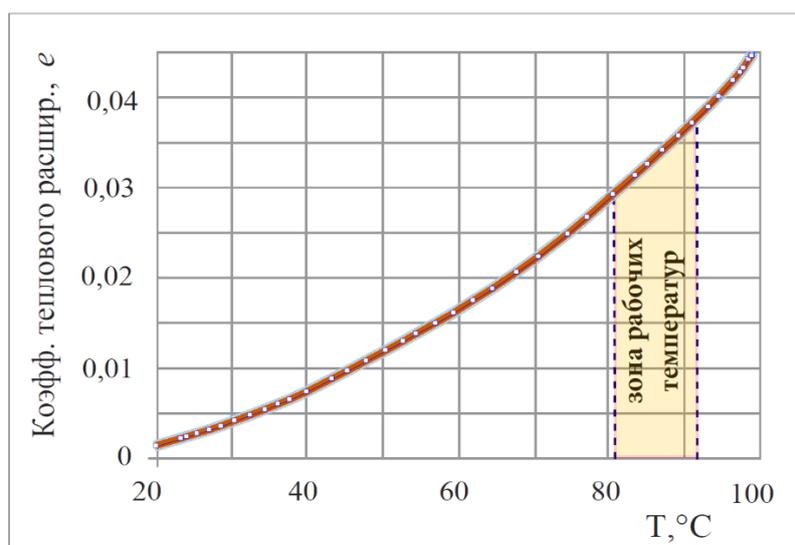


Рис. 2. Коэффициент объемного теплового расширения воды

При достижении температуры насыщения теплоносителя возникает паровая фаза в виде отдельных пузырьков на поверхностях жаровой и дымогарных труб. Одна из причин возникновения микророзродышей пузырьков – адсорбция растворенного в жидкости газа во впадинах шероховатости твердой поверхности (рис. 3):

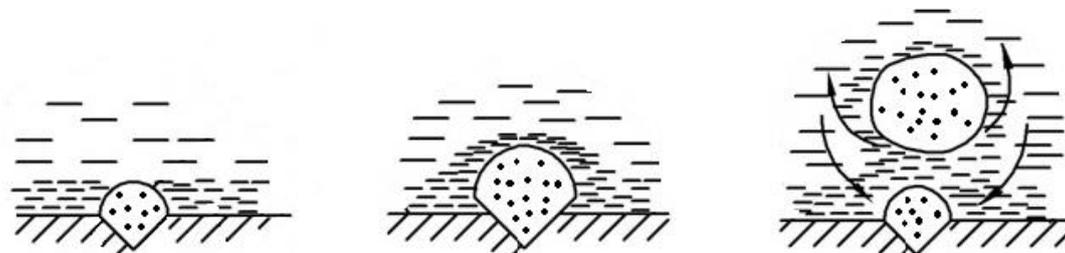


Рис. 3. Схема эволюции парового пузыря на поверхности (слева-направо: зарождение, рост и отрыв от поверхности)

Работоспособными центрами парообразования при кипении жидкости являются те впадины и углубления, которые способны удерживать пар или газ. Экспериментально установлено, что за счет увеличения центров парообразования применением трехмерного оребрения (зазоры шириной 120–180 мкм, высота ребер 340–570 мкм, продольный шаг 240–400 мкм) (рис. 4) достигается пятикратное увеличение коэффициента теплоотдачи (до значений, порядка  $3 \times 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> К) по сравнению с гладкими поверхностями [6].

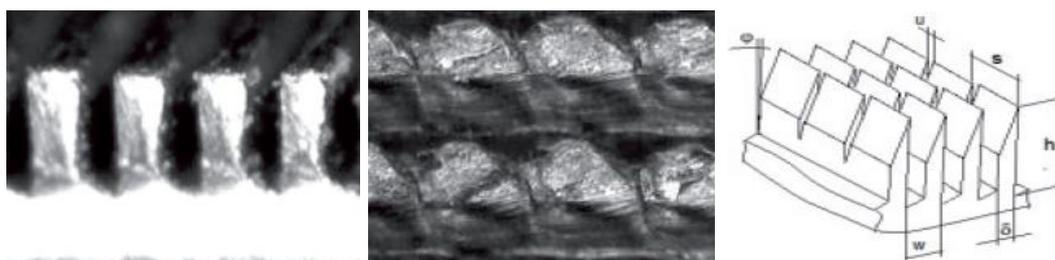


Рис. 4. Фотографии шлифа, внешнего вида и схемы микроорбренных поверхностей

Плотность центров парообразования на теплоотдающей поверхности котла влияет на количество одновременного нахождения паровых пузырьков в теплоносителе на стадиях их зарождения, роста, всплытия, что, в свою очередь, оказывает влияние на величину возрастания объема жидкости.

При кипении в каждый момент времени в жидкой фазе теплоносителя находится  $M_{\text{п}}$  пара в форме всплывающих пузырьков. Если масса остальной жидкости (теплоносителя) равна  $M_{\text{см}}$ , то общий объем кипящей смеси составит [7]:

$$V_{\text{см}} = (M_{\text{п}}/\rho_{\text{п}}) + (M_{\text{см}}/\rho_{\text{см}}) \quad (1)$$

Соотношение объема пара ( $M_{\text{п}}/\rho_{\text{п}}$ ) к объему смеси  $V_{\text{см}}$  принято называть «объемным паросодержанием»:

$$\varphi = \frac{M_{\text{п}}/\rho_{\text{п}}}{V_{\text{см}}} \quad (2)$$

Величина объемного паросодержания зависит от большого количества факторов, таких как: кипения (пузырьковое, пленочное или переходное), поверхности, давления, пр. и в ряде случаев может достигать 30 % и более [7]. Примерно настолько же увеличивается и высота кипящего двухфазного слоя (жидкость/пар). Такой процесс аналогичен процессу барботажа пара через слой жидкости.

На рис. 5 схематично показаны уровни внутрикотлового теплоносителя в работающем ( $h_{\text{р}}$ ) и в холодном ( $h_{\text{х}}$ ) вакуумном котле, которые также называются «зеркалом испарения».

Из-за объемного теплового расширения теплоносителя  $h_{\text{р}} > h_{\text{х}}$ , где разница уровней теплоносителя составит:

$$\Delta h = h_{\text{р}} - h_{\text{х}} \quad (3)$$

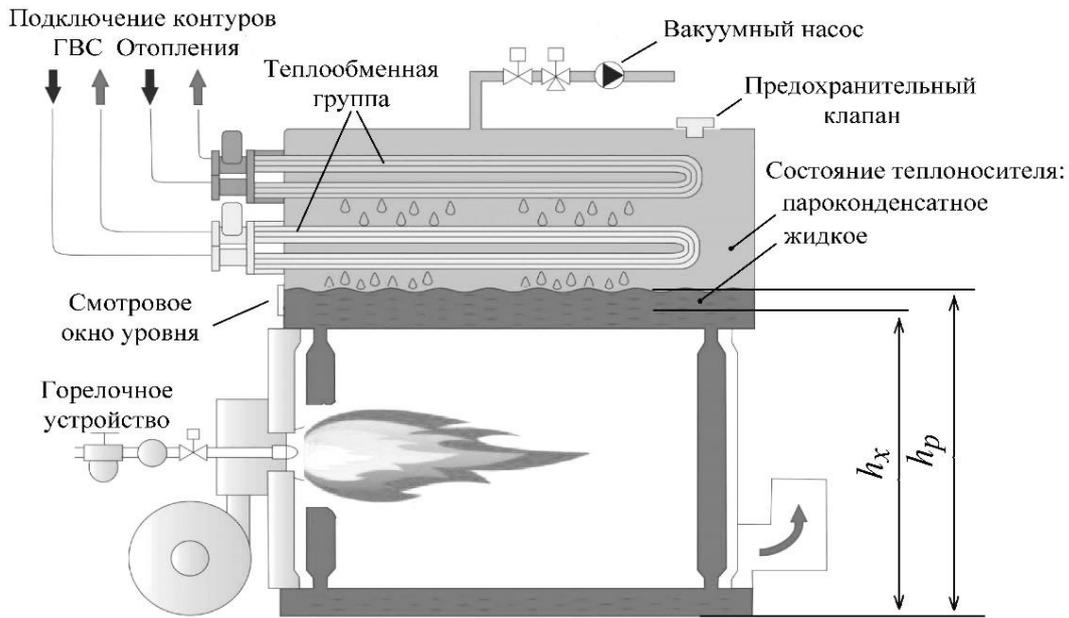


Рис. 5. Уровни теплоносителя холодного и работающего вакуумного пароконденсационного котла

Поскольку в холодном котле масса внутрикотлового теплоносителя (только в жидком состоянии) и масса внутрикотлового теплоносителя в работающем котле (в пароводяном состоянии) одинаковы, справедливо следующее уравнение [8]:

$$h_p \cdot \rho_{см} = h_x \cdot \rho_x, \quad (4)$$

где  $\rho_{см}$  – плотность пароводяной смеси,  $\rho_x$  – плотность холодного теплоносителя (равного температуре окружающего воздуха).

Соответственно,  $h_p$  из уравнения (4) определяем:

$$h_p = h_x \cdot \rho_x / \rho_{см} \quad (5)$$

Тогда, из уравнения (3), с учетом (5), разница уровней теплоносителя:

$$\Delta h = h_p - h_x = h_x \cdot \rho_x / \rho_{см} - h_x \quad (6)$$

Преобразовав уравнение (6), получаем следующее уравнение для определения разницы уровней теплоносителя:

$$\Delta h = h_x (\rho_x / \rho_{см} - 1) \quad (7)$$

На изменение  $h_p$  также влияет изменение рабочего давления в пароконденсационном пространстве котла. Поддержание пониженного рабочего давления в вакуумных котлах (порядка 0,49 атм. .... 0,72 атм. в зависимости от модели и производителя) обеспечивается работой штатного вакуумного насоса котла. При понижении давления характер кипения обусловлен снижением плотности центров парообразования при одновременном увеличении усредненного размера паровых пузырьков, увеличения динамики роста и отрыва пузырьков от поверхности жидкости (рис. 6):

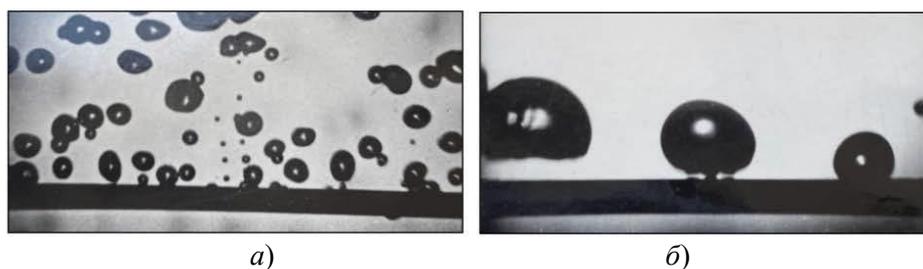


Рис. 6. Влияние понижения давления на характер кипения [9]:  
а)  $P = 101,3$  кПа; б)  $P = 50$  кПа

На плотность центров парообразования ( $NSD$ ) прямое влияние оказывает плотность тепловых потоков ( $q$ ):

$$NSD \sim q^n, \quad (8)$$

где  $n = 1,5 \div 2$  в диапазоне давлений 42–103 кПа [10].

В ходе выполнения работы экспериментально установлена следующая обратная зависимость (рис. 7) – понижение давления в рабочем пространстве котла приводит к увеличению  $\Delta h$ .

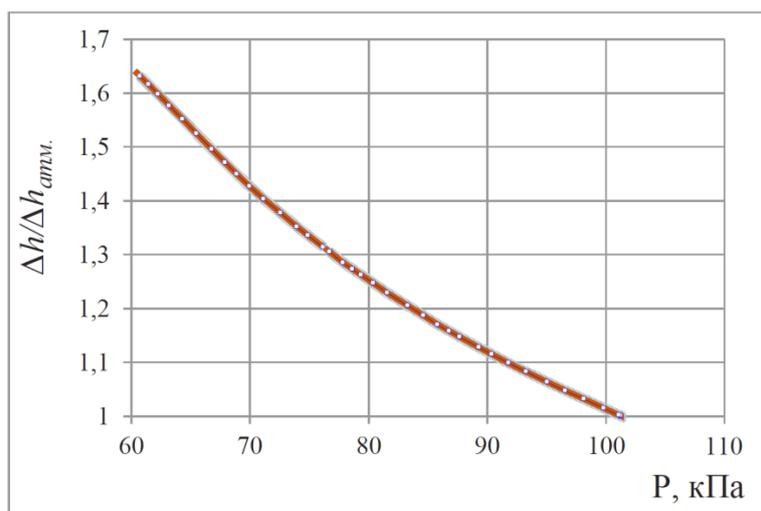


Рис. 7. График зависимости высоты уровня теплоносителя от давления в котле:  
 $\Delta h$  – изменение уровня воды в диапазоне пониженных давлений 60...103 кПа;  
 $\Delta h_{атм.}$  – изменение уровня воды при атмосферном давлении

При кипении и конденсации теплоносителя в емкости с ограниченным объемом может возникнуть сложный процесс резкого увеличения объема жидкости, который называется «набуханием» [11]. Собранный и проанализированный нами статистический материал по обслуживанию, наладке и эксплуатации свыше 70 котельных в Нижегородской области за последние 10 лет показывает, что данное явление происходит, как правило, при «нештатной» работе паровых и пароконденсационных котлов, вызванной – резким увеличением мощности или снижением расхода котла, падением внутрикотлового давления, повышением щелочности теплоносителя, попаданием масла и нефтепродуктов в теплоносителя и пр.



Для установившегося рабочего режима вакуумного пароконденсационного котла паровые пузырьки при кипении увлекают за собой часть воды, которая, поднявшись на определенную высоту, затем опускается, то есть происходит естественная внутренняя циркуляция жидкой фазы во внутрикотловом пространстве. Структура поверхностного слоя переходной зоны теплоносителя жидкости в пар при стабильном режиме находится в пределах небольшой высоты.

При значительном увеличении нагрузки котла и/или быстрого понижения давления промежуточного теплоносителя структура поверхностного слоя разрушается. Все большая часть жидкой фазы за счет скоростной энергии пара дробится на отдельные крупные и мелкие капли, образуется пароводяная эмульсия, значительно возрастает размер переходной зоны. Увеличение высоты переходной зоны приводит к росту общего уровня динамического двухфазного слоя и, соответственно, к сужению высоты парового пространства [12].

Отдельно следует учитывать большое количество «эксплуатационных» факторов, оказывающие влияние на изменения объема теплоносителя, в том числе:

- возможные солевые и минеральные отложения на поверхности жаровой и дымогарных труб котла в зависимости от качества и срока эксплуатации теплоносителя;
- изменение химического состава теплоносителя при его замене или доливке;
- характер режимов эксплуатации котла (величина нагрузки котла, разогрев, останов котла);

С точки зрения работы вакуумного котла данный процесс является крайне нежелателен, поскольку нарушается режим естественной циркуляции внутрикотлового теплоносителя и возможен пережог подъемных труб котла.

На практике контроль и поддержание требуемого уровня теплоносителя в современных вакуумных пароконденсационных котлах осуществляется в непрерывном режиме «штатной» системой автоматизации посредством КИП (датчики уровня, давления, температуры), работой вакуумного насоса, режимами горения горелочного устройства, запорно-регулирующей арматурой.

#### **Выводы:**

1. Проведенные экспериментальные исследования показывают зависимость высоты уровня теплоносителя для различных значений субатмосферного давления (рис. 7).
2. При понижении внутрикотлового давления вакуумного котла ниже атмосферного значительно меняется характер кипения, что приводит к дополнительному росту уровня теплоносителя в сравнении с объемным расширением при атмосферном давлении.
3. Дополнительный резкий рост высоты уровня теплоносителя в вакуумных котлах может быть вызван эффектом «набухания».
4. Рассмотренные причины его возникновения оказывают влияние на режимы работы вакуумных котлов.
5. Приведенная методика расчета может быть использована для определения характеристик при проектировании и конструкторских разработках вакуумных котлов.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Липин, А. А. Расчет теплообменных аппаратов. Кожухотрубчатые теплообменники : учебное пособие / А. А. Липин, Ю. Е. Романенко, А. В. Шибашов, А. Г. Липин ; Ивановский государственный химико-технологический университет. – Иваново, 2017. – 76 с.
2. Каталог котельного оборудования производства компании BOOSTER. – URL: <http://www.booster-rus.ru/>. – Текст : электронный.
3. Каталог котельного оборудования производства «Дорогобужкотломаш». – URL: <https://dkm.ru/>. – Текст : электронный.
4. Каталог котельного оборудования производства компании KD Navien. – URL: <http://en.kdnavien.com/>. – Текст : электронный.
5. Каталог котельного оборудования производства компании Nippon Thermoener. – URL: <https://www.n-thermo.com/product/index.html>. – Текст : электронный.
6. Интенсификация теплоотдачи и критические тепловые потоки при кипении на поверхностях с микрооребрением / И. А. Попов, А. В. Щелчков, Ю. Ф. Гортышов, Н. Н. Зубков // Теплофизика высоких температур (ТВТ). – 2017. – Том 55, выпуск 4. – С. 537–548.
7. Исаченко, В. П. Теплопередача : учебник для ВУЗов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – Москва : Энергия, 1975. – 488 с.
8. Жидилов, К. А. Исследование и разработка систем автономного теплоснабжения с двух контурными котлами : специальность 05.23.03 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Жидилов Константин Ариевич. – Нижний Новгород, 2009. – 185 с.
9. Мамонтова, Н. Н. Исследование критических тепловых потоков при кипении жидкостей в условиях свободной конвекции и давлениях ниже атмосферного : специальность 05.00.00 : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Мамонтова Нина Николаевна. – Новосибирск, 1966. – 169 с.
10. Сердюков, В. С. Экспериментальное исследование микрохарактеристик теплообмена при кипении жидкостей в условиях различных давлений : специальность 01.04.14 : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Сердюков Владимир Сергеевич. – Новосибирск, 2020. – 184 с.
11. Назаров, В. И. Автоматизированные системы регулирования тепловых процессов основного оборудования ТЭС и АЭС : учебное пособие / В. И. Назаров, В. В. Кравченко. – Минск : Высшая школа, 2022. – 215 с. – ISBN 978-985-06-3452-8.
12. Moh., Salem. Experimental Studies of Sub-Atmospheric Pressure Boiling of Water on Various Tubes and Plates : Submitted for the degree of Doctor of Philosophy / Salem Moh. M. Salem ; Heriot-Watt University, School of Engineering and Physical Sciences Institute of Mechanical Process and Energy Engineering, January 2020. – URL: <https://www.ros.hw.ac.uk/handle/10399/4439?show=full>.

**LEPUSTIN Sergey Aleksandrovich, post-graduate student of the chair of heat and gas supply; KOICHEV Aleksey Gennadevich, doctor of technical sciences, professor, holder of the chair of heat and gas supply; SOKOLOV Mikhail Mikhailovich, candidate of technical sciences, associate professor of the chair of heat and gas supply**

**CHANGE IN VOLUME AND THE "SWELLING" EFFECT OF THE HEAT TRANSFER FLUID DURING THE STEAM-CONDENSATION OPERATING MODE OF VACUUM BOILERS**



Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering.

65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia.

Tel.: (831) 433-45-35; fax: (831) 430-03-82; e-mail: kochev.1961@mail.ru

*Key words:* steam-condensation vacuum boilers, independent heat supply scheme, heat exchangers, water-tube space, heat transfer fluid level, heating systems.

---

*This article presents experimental data and theoretical results from an investigation into the properties of the heat transfer fluid during the steam-condensation operating mode of vacuum boilers.*

---

## REFERENCES

1. Lipin A. A., Romanenko Yu. E., Shibashov A. V., Lipin A. G. Raschet teploobmennyykh apparatov. Kozhukhotrubchatye teploobmenniki [Calculation of heat exchangers. Shell-and-tube heat exchangers]: uchebnoe posobie. Ivanovskiy gosudarstvennyy khimiko-tekhnologicheskiiy universitet. Ivanovo, 2017, 76 p.

2. Katalog kotelnogo oborudovaniya proizvodstva kompanii BOOSTER [Catalog of boiler equipment produced by BOOSTER company]. URL: <http://www.booster-rus.ru/>.

3. Katalog kotelnogo oborudovaniya proizvodstva «Dorogobuzhкотломаш» [Catalog of boiler equipment produced by "Dorogobuzhкотломаш"]. URL: <https://dkm.ru/>.

4. Katalog kotelnogo oborudovaniya proizvodstva kompanii KD Navien [Catalog of boiler equipment produced by KD Navien company]. URL: <http://en.kdnavien.com/>.

5. Katalog kotelnogo oborudovaniya proizvodstva kompanii Nippon Thermoener [Catalog of boiler equipment produced by Nippon Thermoener company]. URL: <https://www.n-thermo.com/product/index.html>.

6. Popov I. A., Shchelchikov A. V., Gortyshov Yu. F., Zubkov N. N. Intensifikatsiya teplootdachi i kriticheskie teplovye potoki pri kipenii na poverkhnostiakh s mikroobremeniem [Intensification of heat transfer and critical heat fluxes during boiling on surfaces with micro-finishing]. Teplofizika vysokikh temperatur (TVT) [High temperature thermophysics], 2017, Vol. 55, Issue 4, P. 537–548.

7. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. Teploperedacha [Heat transfer]: uchebnik dlia VUZov. Moscow, Energiya, 1975, 488 p.

8. Zhidilov K. A. Issledovanie i razrabotka sistem avtonomnogo teplosnabzheniya s dvukh konturnymi kotlami [Research and development of autonomous heat supply systems with double-circuit boilers]: spetsialnost 05.23.03 : diss. ... kand. tekhn. nauk. Nizhny Novgorod, 2009, 185 p.

9. Mamontova N. N. Issledovanie kriticheskikh teplovykh potokov pri kipenii zhidkostei v usloviyakh svobodnoy konveksii i davleniyakh nizhe atmosfernogo [Investigation of critical heat fluxes during liquid boiling under free convection conditions and pressures below atmospheric]: spetsialnost 05.00.00 : diss. ... kand. tekhn. nauk. Novosibirsk, 1966, 169 p.

10. Serdyukov V. S. Eksperimentalnoe issledovanie mikrokharakteristik teploobmena pri kipenii zhidkostey v usloviyakh razlichnykh davleniy [Experimental study of microcharacteristics of heat transfer during liquid boiling under various pressure conditions]: spetsialnost 01.04.14 : diss. ... kand. fiz.-mat. nauk. Novosibirsk, 2020, 184 p.

11. Nazarov V. I., Kravchenko V. V. Avtomatizirovannyye sistemy regulirovaniya teplovykh protsessov osnovnogo oborudovaniia TES i AES [Automated control systems for thermal processes of the main equipment of thermal and nuclear power plants]: uchebnoe posobie. Minsk, Vysshaya shkola, 2022, 215 p. ISBN 978-985-06-3452-8.

12. Moh., Salem. Experimental Studies of Sub-Atmospheric Pressure Boiling of Water on Various Tubes and Plates : Submitted for the degree of Doctor of Philosophy / Salem Moh. M. Salem ; Heriot-Watt University, School of Engineering and Physical Sciences



Institute of Mechanical Process and Energy Engineering, January 2020. URL:  
<https://www.ros.hw.ac.uk/handle/10399/4439?show=full>.

© **С. А. Лепустин, А. Г. Кочев, М. М. Соколов, 2025**  
Получено: 03.03.2025 г.