

УДК 536.24

*А.В. Овсянник, Е.Н. Волкова, Т.С. Наумова, В.Г. Якимченко*

Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П.О. Сухого», пр. Октябрия, 48, г. Гомель, Республика Беларусь, 246000

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РАЗВИТОМ ПУЗЫРЬКОВОМ КИПЕНИИ СМЕСЕВЫХ ОЗОНОБЕЗОПАСНЫХ ХЛАДАГЕНТОВ НА ГЛАДКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ***Представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена при кипении хладагентов R404a, R407c и R410a на гладкой технически шероховатой поверхности в условиях свободного движения в большом объеме. Установлены зависимости между количественными характеристиками процесса теплообмена при кипении, режимными параметрами и другими факторами, влияющими на интенсивность теплообмена.****Ключевые слова:** Теплообмен при кипении – Озонобезопасные хладагенты – Интенсивность теплообмена – Коэффициент теплоотдачи – Испаритель – Теплообменный аппарат.**А.В. Овсянник, Е.Н. Волкова, Т.С. Наумова, В.Г. Якимченко*

Установа освіти «Гомельський державний технічний університет імені П.О. Сухого», пр. Октябрия, 48, м. Гомель, Республіка Білорусь, 246000

**ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ РОЗВИНЕНОМУ БУЛЬБАШКОВОМУ КИПІННІ СУМІШЕВИХ ОЗОНОБЕЗПЕЧНИХ ХОЛОДОАГЕНТІВ НА ГЛАДКИХ ПОВЕРХНЯХ***Представлені результати експериментальних досліджень теплообміну при кипінні холодоагентів R404a, R407c та R410a на гладкій технічно шорсткій поверхні в умовах вільного руху у великому об'ємі. Встановлено залежності між кількісними характеристиками процесу теплообміну при кипінні, режимними параметрами та іншими факторами, що впливають на інтенсивність теплообміну.****Ключові слова:** Теплообмін при кипінні – Озонобезпечні холодоагенти – Інтенсивність теплообміну – Коефіцієнт тепловіддачі – Випарник – Теплообмінний апарат.***I. ВВЕДЕНИЕ**

Теплообменные аппараты испарительного типа широко применяются в различных отраслях промышленности, в холодильной и криогенной технике, в микроэлектронике для охлаждения элементов микроэлектронных схем, в теплонасосных установках, в жилищно-коммунальном секторе (отопление, горячее водоснабжение, кондиционирование) и т. д.

Использование имеющихся в литературе обобщенных уравнений для расчета теплоотдачи кипящих хладагентов без экспериментальной проверки неправомерно из-за специфических условий работы таких испарителей, а также особенностей теплотехнических свойств этих рабочих тел.

В настоящее время в качестве альтернативных, не содержащих хлора заменителей хладагента R22 используются такие фторуглеродороды, как R404a, R407c и R410a. У каждого из вышеупомянутых хладагентов имеются свои собственные достоинства и недостатки, что позволяет варьировать выбор оборудования в зависимости от того, какая из его характеристик (энергетическая эффективность, компактность, соотношение це-

на/производительность и др.) является для данного проекта наиболее значимой.

Целями данной работы являются: теоретическое и экспериментальное исследование процессов теплообмена при развитом пузырьковом кипении смесевых озонобезопасных хладагентов на гладких поверхностях с установлением зависимостей между количественными характеристиками процесса теплообмена при кипении, режимными параметрами и другими факторами, влияющими на интенсивность теплообмена, а также сравнение интенсивности теплообмена для трех исследуемых хладагентов (R404a, R407c, R410a).

**II. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХЛАДАГЕНТОВ R404A, R407C, R410A И R22**

Так как на сегодняшний день основными перспективными заменителями фреона R22 являются хладагенты R410a и R407c, то для выяснения области применения хладагентов необходимо провести сравнительный анализ их основных свойств и характеристик.

Глядя на первое отличие R410a от R407c – химическую структуру – очевидным становится

преимущество первого над вторым: R410a – это двухкомпонентный газ, а R407c состоит из трех компонентов. Как прямое следствие, заправку R410a осуществлять легче, чем R407c по двум причинам:

- фреон R407c должен полностью выводиться из оборудования и только после этого систему можно заправлять, повышая затраты на переработку и покупку нового фреона;
- фреон R407c нельзя заправлять после потери газа, так как более легкий элемент первым выходит из системы, делая остальные элементы не нужными.

Во-вторых, стоит отметить, что холодильная система работает лучше на фреоне R410a. Преимущества R410a:

- меньшие гидравлические сопротивления;
- на 34% меньше ёмкость заправляемого хладагента;

Благодаря этому фреон R410a гарантирует более интенсивный процесс теплоотдачи наряду с лучшим функционированием и уменьшением потребления энергии.

- при температуре конденсации ( $-6,7^{\circ}\text{C}$ ) холодопроизводительность хладагентов R410a и R407c практически одинаковая, а вот при повышении температуры ( $50^{\circ}\text{C}$ ) эффективность фреона R410a на 10 % выше, чем у фреона R407c;

- фреон R410a эффективнее при снижении давления, что позволяет оптимизировать теплообмен в холодильном контуре.

С этой точки зрения, уровень давления почти на 50 % выше, чем в любой другой холодильной системе. А если принять во внимание еще и более высокую плотность пара и высокоэффективную транспортировку фреона R410a, то все это приводит к повышению коэффициента теплопередачи. Более того, это позволяет использовать трубки меньшего диаметра, понижая связанные с этим затраты, и приводит к большему падению давления, что, в свою очередь, повышает скорость хла-

дагента. Применение фреона R410a приводит к лучшей работе основного оборудования (компрессор, конденсатор) и уменьшению потребления энергии. Так как более высокая эффективность компрессора приводит к меньшему потреблению энергии компрессором, то необходимо, чтобы хладагент обеспечивал высокий коэффициент теплоотдачи. И это достижимо благодаря хладагенту R410a [1].

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для проведения экспериментальных исследований по кипению озонобезопасных фреонов на гладкой поверхности был изготовлен экспериментальный образец, представляющий собой горизонтальную трубку из дюралюминия, выполненный путем фрезерования и прокатки (рисунок 1).

В работе представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена при кипении хладагентов R404a, R407c и R410a на гладкой технически шероховатой поверхности в условиях свободного движения в большом объеме. Кипение в большом объеме применяется в промышленных испарителях большой производительности, т.к. в условиях направленного движения жидкости внутри труб могут возникнуть затруднения с отводом пара при интенсивном парообразовании и, как следствие, снижение теплоотдачи.

Эксперименты проводились при различных значениях плотности теплового потока и давлений насыщения.

На рисунках 2, 3 и 4 приведены результаты экспериментального исследования теплообмена при кипении хладагентов R404a, R407c и R410a на гладкой технически шероховатой поверхности при различных давлениях насыщения. Плотность теплового потока изменялась в пределах  $3,7...48,8 \text{ кВт/м}^2$ , давление насыщения – в пределах  $0,92...1,4 \text{ МПа}$  ( $t_n = 13,8...27,5^{\circ}\text{C}$ ).

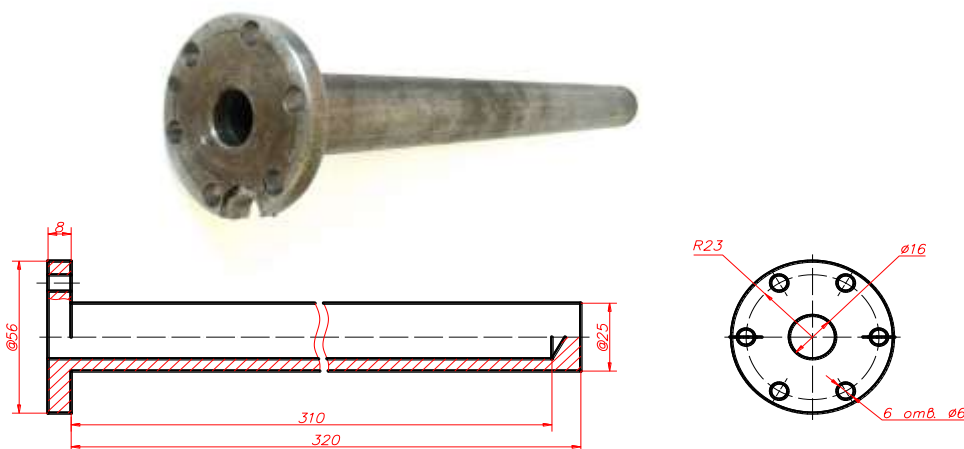


Рисунок 1 – Экспериментальный образец с гладкой поверхностью

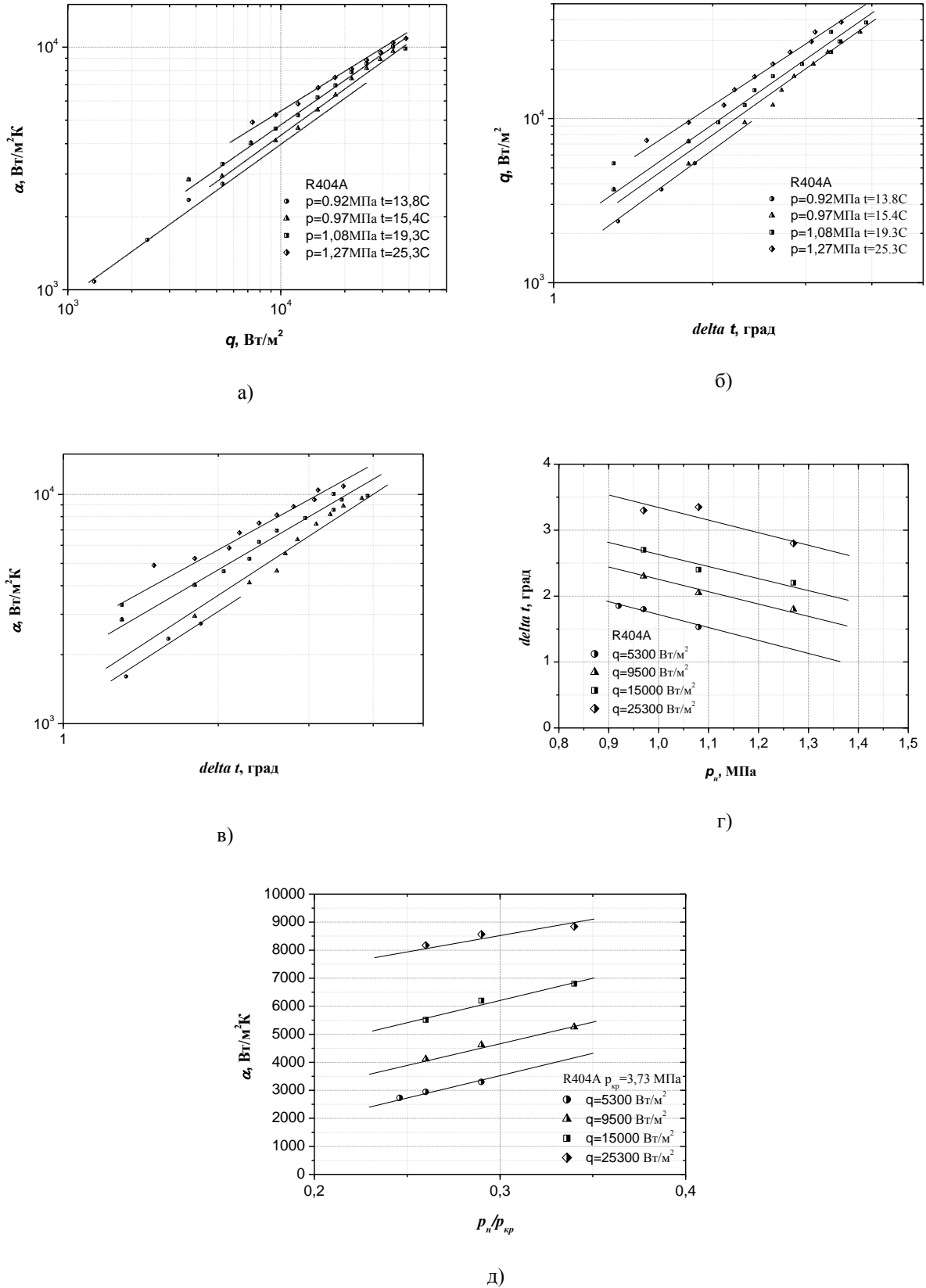
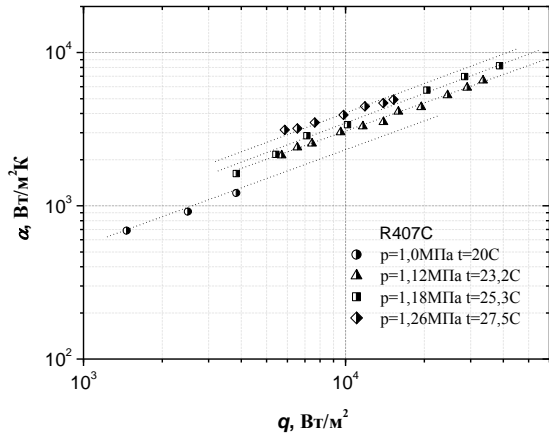
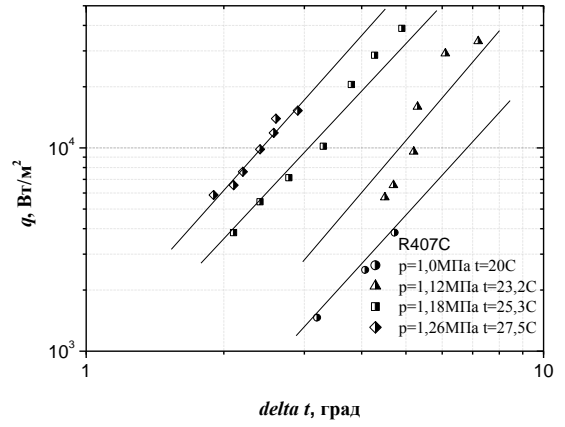


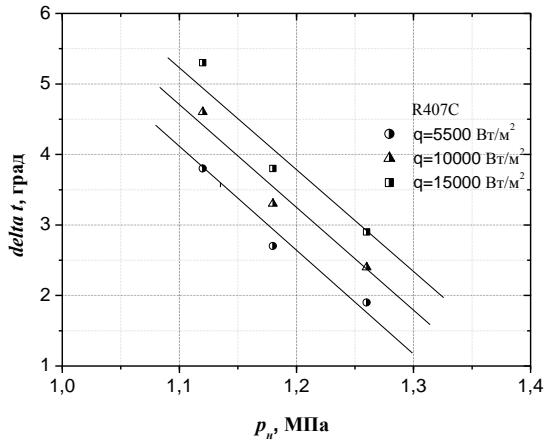
Рисунок 2 – Экспериментальные зависимости при кипении фреона R404a на гладкой технической шероховатой поверхности: а)  $\alpha=f(q)$ ; б)  $q=f(\Delta T)$ ; в)  $\alpha=f(\Delta T)$ ; г)  $\Delta T=f(p_r)$ ; д)  $\alpha=f(p_r/p_{кр})$



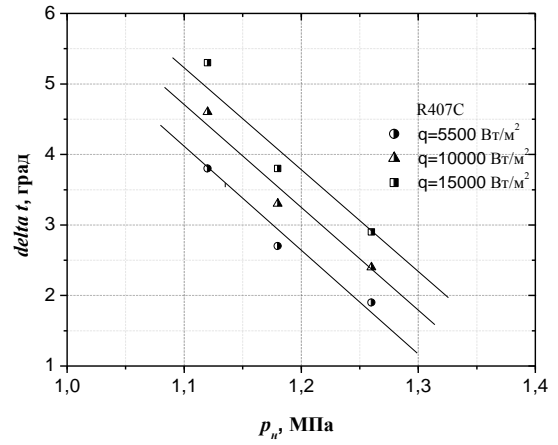
а)



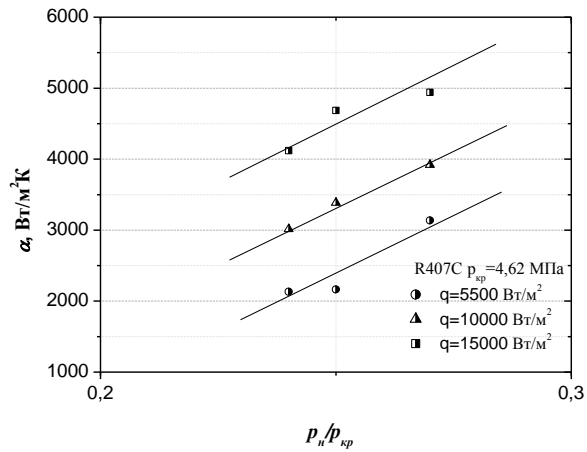
б)



в)



г)



д)

Рисунок 3 – Экспериментальные зависимости при кипении фреона R407c на гладкой технической шероховатой поверхности: а)  $\alpha=f(q)$ ; б)  $q=f(\Delta T)$ ; в)  $\alpha=f(\Delta T)$ ; г)  $\Delta T=f(p_n)$ ; д)  $\alpha=f(p_n/p_{кр})$

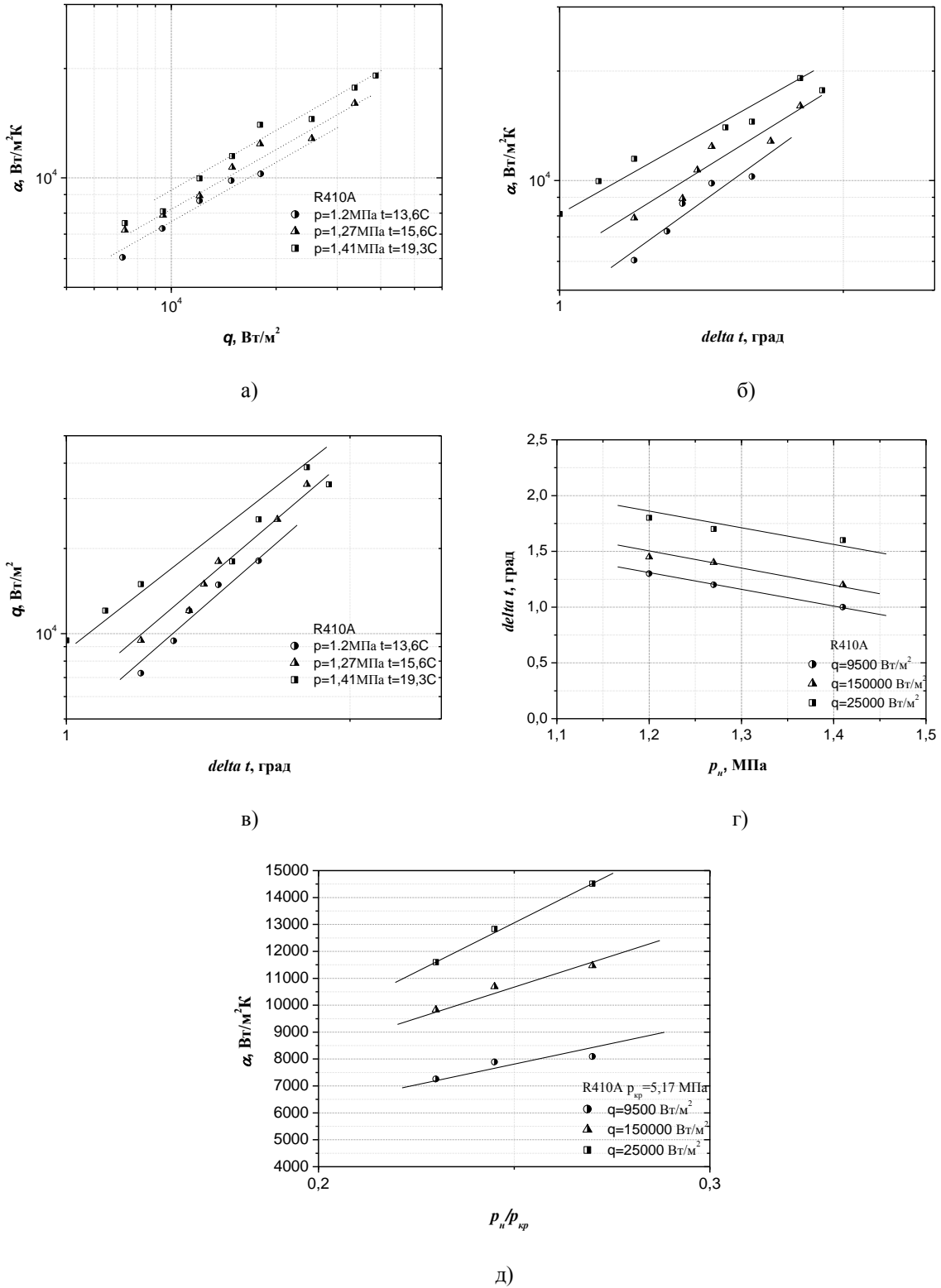


Рисунок 4 – Экспериментальные зависимости при кипении фреона R410a на гладкой технической шероховатой поверхности: а)  $\alpha=f(q)$ ; б)  $q=f(\Delta T)$ ; в)  $\alpha=f(\Delta T)$ ; г)  $\Delta T=f(p_n)$ ; д)  $\alpha=f(p_n/p_{кр})$

Эксперименты показывают, что значение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  увеличивается с ростом величины удельного теплового потока  $q$ , передаваемого кипящей жидкостью [2].

Из графиков следует, что при увеличении плотности теплового потока степень влияния давления насыщения снижается из-за увеличения величины перегрева, необходимого для вскипания жидкости и снижения степени увеличения числа активных центров парообразования.

С увеличением давления также наблюдается интенсификация теплообмена. С повышением давления облегчаются условия зарождения паровых пузырей на теплоотдающей поверхности и растет турбулизация потока паровой фазы.

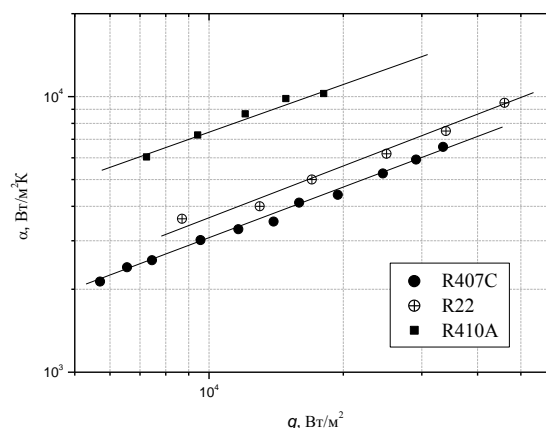
Характер кривых можно связать с тем, что по мере уменьшения критического радиуса пузырька, соответствующего началу кипения, с ростом давления количество работающих центров парообразования увеличивается, вследствие чего возрастает коэффициент теплоотдачи. Однако при достаточно больших плотностях теплового потока преобладающая часть потенциальных центров парообразования уже включена в работу по генерации паровых пузырей и дальнейшее увеличение давления не приводит к интенсификации теплообмена [3].

По мере увеличения температурного напора число действующих центров парообразования растет, процесс кипения становится более интенсивным. Паровые пузырьки периодически отрываются от теплоотдающей поверхности и, всплывая к свободной поверхности, продолжают расти в объеме. Последнее объясняется тем, что температура в объеме кипящей жидкости, как показывают опытные данные, не равна температуре насыщения, а несколько превышает её. При повышении температурного напора  $\Delta t$  значительно возрастает поток теплоты, который отводится от поверхности нагрева кипящей жидкостью.

Произвели сравнение интенсивности теплообмена при кипении хладагентов R22, R407c и R410a на гладкой технически шероховатой поверхности при одинаковых параметрах (рис. 5).

На рисунке 5 представлены экспериментальные зависимости коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока при кипении фреонов R22, R407c и R410a на гладкой технически шероховатой поверхности в сопоставимых условиях. Очевидно преимущество хладагента R410a, коэффициенты теплоотдачи которого примерно в 1,8 раза превышают коэффициенты теплоотдачи фреона R22. Однако следует учитывать то, что рабочее давление хладагента R410a на 35-40% выше, чем у двух других рассматриваемых фреонов. Коэффициенты теплоотдачи при кипении хладагента R22 превосходят полученные экспериментально коэффициенты теплоотдачи при кипении фреона R407c примерно в 1,15 раза, что необходимо иметь в виду при ретрофите холодильного оборудования. Такое отличие в коэффициентах теплоотдачи связано с разницей температур насыщения и теплофизических свойств хладагентов (в частности, коэффициентов теплопроводности). Интенсифицировать процесс теплообмена и уменьшить габариты установки в этом случае можно путем развития поверхности теплообмена [4].

Также было произведено сравнение характеристик теплообмена для трех исследованных озонобезопасных хладагентов (R410a, R404a и R407c) на гладкой технически шероховатой поверхности в области развитого пузырькового кипения. Сопоставление производилось при близких друг к другу давлениях  $p=1,26-1,27$  МПа и температурах насыщения жидкости  $t=19,3-20$  °С (рис. 6), т.к. теплофизические свойства указанных хладагентов, в частности температура кипения, существенно различаются.



**Рисунок 5** – Экспериментальные зависимости  $\alpha=f(q)$  в области развитого пузырькового кипения для фреонов R22, R410a и R407c на гладкой поверхности

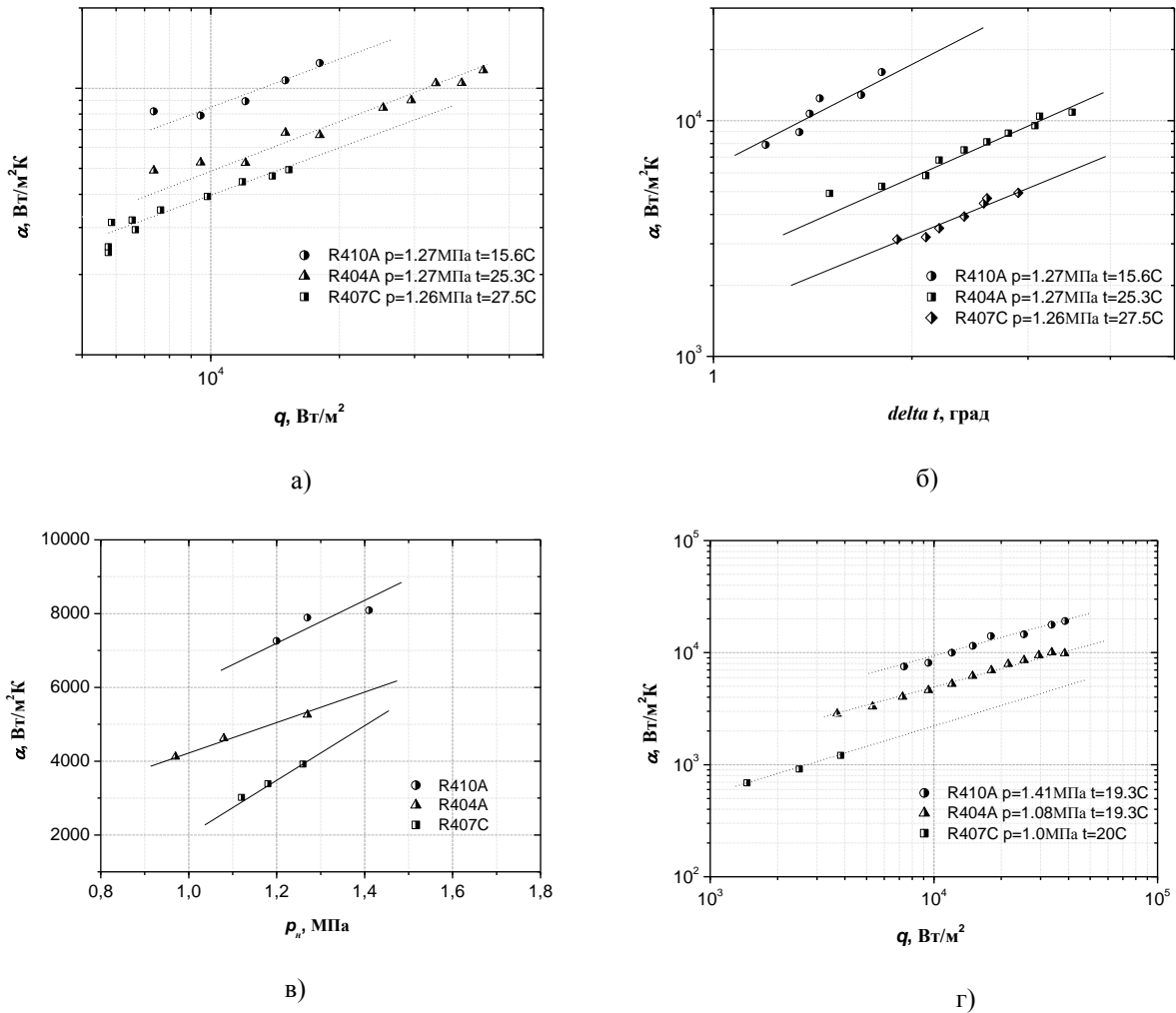


Рисунок 6 – Экспериментальные зависимости при развитом пузырьковом кипении хладагентов R404a, R407c и R410a: а)  $\alpha=f(q)$  при давлении 1,26-1,27 МПа; б)  $\alpha=f(\Delta T)$  при давлении 1,26-1,27 МПа; в)  $\alpha=f(p_n)$  при  $q=9500 \text{ Вт/м}^2$ ; г)  $\alpha=f(q)$  при температуре 19,3-20 °С

Из графиков видно, что интенсивность теплоотдачи при кипении фреона R410a выше, чем при кипении R404a и R407c, что при использовании первого повлечет за собой снижение массогабаритных показателей испарителя. Однако при разработке оборудования необходимо учитывать тот факт, что при использовании R410a процесс будет проходить при повышенных давлениях по сравнению с двумя другими хладагентами.

#### IV. ВЫВОДЫ

1. Представлены результаты экспериментальных исследований теплообмена при кипении смесевых хладагентов R404a, R407c и R410a на гладкой технически шероховатой поверхности в условиях свободного движения в большом объеме. Плотность теплового потока изменялась в пределах  $3,7...48,8 \text{ кВт/м}^2$ , давление насыщения – в пределах  $0,92...1,4 \text{ МПа}$  ( $t_n = 13,8...27,5^\circ\text{C}$ ).

2. Установлены зависимости между количественными характеристиками процесса теплообмена при кипении, режимными параметрами и другими факторами, влияющими на интенсивность теплообмена.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Бабакин, Б.С.** Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе / Б.С. Бабакин, В.И. Стефанчук, Е.Е. Ковтунов. М.: Колос, 2000. – 160 с.
2. **Овсянник А.В.** Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей. – Гомель: ГГТУ им. П.О. Сухого, 2012. – 284 с.
3. **Кутателадзе С.С.** Основы теории теплообмена. – М.: Атомиздат, 1979. – 415 с.
4. **Кутепов, А.М.** Гидродинамика и теплообмен при парообразовании / А.М. Кутепов, Л.С. Стерман, Н.Г. Стюшин. – М.: Высшая школа, 1977. – 352 с.

*A.V. Ovsyannik, E.N. Volkova, T.S. Naumova, V.G. Yakimchenko*

Educational establishment «Gomel State Technical University named after P.O.Sukhoi»

Ostyabrya str., 48, Gomel, Republic of Belarus, 246000

## **THEORETICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF HEAT TRANSFER PROCESSES AT THE DEVELOPED NUCLEATE BOILING OF MIXED OZONE-SAFE REFRIGERANTS ON A SMOOTH SURFACES**

*Heat exchange experimental research results during refrigerants R404a, R407c and R410a boiling on smooth technically roughened surface in free movement conditions in large volume are presented. The dependencies between the quantitative characteristics of the boiling heat transfer process, security settings, and other factors affecting the intensity of heat transfer are established.*

**Keywords:** *Heat exchange while boiling – Ozone-safe refrigerants – Heat exchange intensity – Thermolysis coefficient – Evaporator – Heat exchanger.*

### **REFERENCES**

1. **Babakin B.S.** Alternativnie hladagenti i servis holodilnih system na ih osnove / B.S. Babakin, V.I. Stefanchuk, E.E. Kovtunov. M.: Kolos, 2000. – 160 s.
2. **Ovsyannik A.V.** Modelirovanie processov teploobmena pri kipenii zhidkostey. – Gomel: GGTU im. P.O. Suhogo, 2012. – 284 s.
3. **Kutateladze S.S.** Osnovi teorii teploobmena. – M.: Atomizdat, 1979. – 415 s.
4. **Kutepov A.M.** Hidrodinamika i teploobmen pri paroobrasovanii / A.M. Kutepov, L.S. Sterman, N.G. Styushin. – M.: Visshaya shkola, 1977. – 352 s.

---

Отримана в редакції 25.06.2014, прийнята до друку 27.06.2014