

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 621.577

С. В. ФЕДОСОВ^{1,2}, академик РААСН, д-р техн. наук, проф. кафедры технологии и организации строительства; **В. Н. ФЕДОСЕЕВ³**, д-р техн. наук, проф. кафедры организации производства и городского хозяйства

ТЕПЛООБМЕН И ДЕСУБЛИМАЦИЯ В ИСПАРИТЕЛЬНОЙ ЛИНИИ ВОЗДУШНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА

¹ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26. Тел.: (980) 694-81-41; эл. почта: fedosov-academic53@mail.ru

²ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет»

Россия, 424000, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, д. 3. Тел.: (980) 694-81-41; эл. почта: fedosov-academic53@mail.ru

³ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

Россия, 153000, г. Иваново, Шереметевский пр., д. 21. Тел.: (960) 506-40-23; эл. почта: 4932421318@mail.ru

Ключевые слова: воздушный тепловой насос, хладагент, испарительно-конденсационный блок, испарение, конденсация, теплоотдача, кинетика, сублимация.

Настоящая работа является продолжением разработок авторов в направлении исследований тепловых процессов в испарительно-конденсационном контуре воздушного теплового насоса ВТН.

Введение

Мировое развитие промышленности в XX веке требовало обеспечения производительных сил соответствующей поддержкой от отраслей энергетики. Ситуация еще более усугубилась военными целями, требующими от машиностроительных и людских ресурсов ускоренного развития энергетики. Все это привело к мощному импульсу развития гидротехники, ветроэнергетики, в дополнение к интенсивному развитию нефтегазодобывающей отрасли. Однако здравый смысл подсказывал и политикам, и ученым, что богатства недр Земли не беспредельны и требуют поиска и развития новых источников энергии. Таким образом и возник термин «альтернативной энергетики». Соответственно этому появились и новые понятия «биоэнергетика», «водородная энергетика».

Полученные человечеством знания о теплоте и холоде ветра и огромном количестве энергии, извергаемой изнутри Земли в виде лавы вулканов, привели к необходимости научиться использовать эту «бесплатную» энергию для нужд человечества. Отсюда в дальнейшем возникло понятие «тепловые насосы» и как частный случай – «воздушные тепловые насосы».

Возникшие из требования получения тепла и холода они быстро получили свое практическое развитие в прошлом столетии. Своеобразие ситуации заключается в том, что конструкторские разработки теплохолодильной техники опережают развитие теоретических исследований в данном направлении.

Практические вопросы жизни человечества, связанные с необходимостью со-

хранения продуктов питания, по-видимому, на «заре» своего развития показали человеку преимущество холода. Развитие научных исследований в области термодинамики теплохолодильных процессов и, в первую очередь, С. Карно [1, 2] установил физические особенности и научные основы процессов получения холода. Сегодня трудно представить отрасли промышленности, которые в разной степени не использовали бы холод. Своеобразная «уникальность» ситуации проявляется в том, что выполненных научных исследований и инженерных изысканий оказалось достаточно для развития конструкторских разработок.

На рис. 1 и 2 схематично представлен функциональный компрессорно-вакуумный контур тепло/холодовоздушной теплонасосной системы.

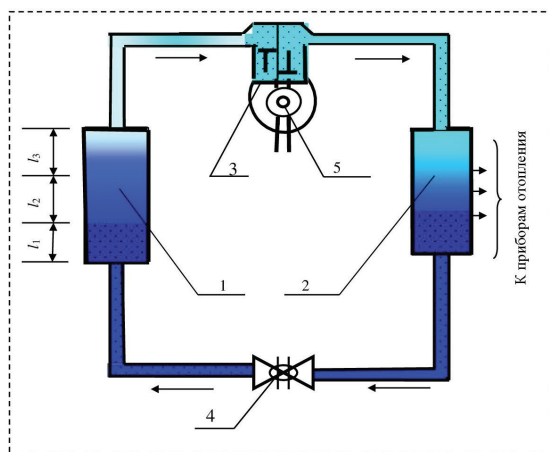


Рис. 1. Функциональный компрессорный контур системы воздушного теплового насоса: 1 – испаритель, 2 – конденсатор; 3 – компрессор; 4 – терморегулирующий вентиль (ТРВ-дрессель); 5 – электрический двигатель

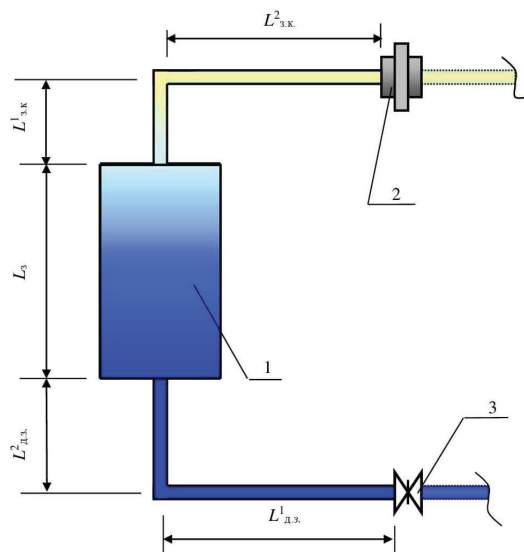


Рис. 2. Функциональный компрессорный контур – испарительная часть: 1 – испаритель; 2 – компрессор; 3 – терморегулирующий вентиль (ТРВ-дрессель)

В отечественной [3–6] и зарубежной литературе [7, 8] детально проанализированы особенности работы воздушного теплового насоса (ВТН) на основе термодинамики обратного цикла Карно [9]. Заметим, что разработанные методики расчета соответствующего состояния контура, программные продукты [10–13] позволяют рассчитывать теплофизические и технико-экономические показатели технологических процессов для условий стационарных (установившихся) параметров.

Однако в условиях реальной работы теплохолодильного оборудования рабочий цикл состоит из периодов: включение и выход установки на рабочий режим; работа оборудования в диапазоне установленных рабочих параметров; отключение и остановка функционирования рабочих элементов системы ВТН при достижении допустимых нижних пределов; регенерация поверхностей теплообменных элементов посредством механических или тепловых методов очистки от обледенения («шубы»), рис. 3.

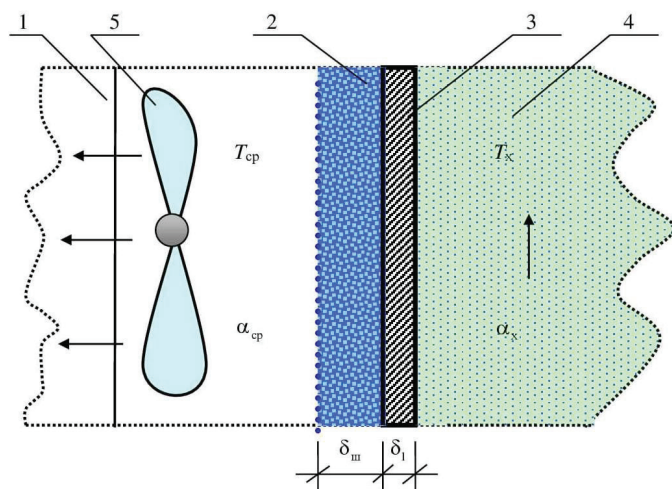


Рис. 3. Фрагмент теплосыдающей поверхности испарителя в условиях нарастания «шубы» (наледи): 1 – внешняя среда; 2 – слой «шубы» (наледи); 3 – теплосыдающая поверхность испарителя; 4 – хладагент; 5 – вентилятор; T_{cp} – температура воздуха; T_x – температура хладагента; α_{cp} – коэффициент теплоотдачи от потока внешней среды к наружной поверхности теплообменной трубки; α_x – коэффициент теплоотдачи от хладагента к внутренней поверхности трубки; δ_l – толщина стенки трубки испарителя; $\delta_{ш}$ – толщина слоя «шубы» (наледи)

В этих условиях режим работы воздушного теплового насоса в полном цикле можно лишь условно назвать «установившимся», точнее – «квазистационарным».

Для разработки более точных методов расчета теплонасосного оборудования, а также приборов управления и программного обеспечения, способов оптимизации стадий технологического процесса для целей сокращения энерго-, ресурсо- и финансовых затрат целесообразно более подробно рассмотреть условия технологии, состояния и организации гидравлических и тепломассообменных процессов, протекающих на каждом этапе с учетом их теплофизических, реологических и фазовых особенностей.

В работе [13] приведено решение одной из составляющих частей проблемы:



разработка математической модели кинетики испарения капель хладагента в контуре ВТН. Настоящая работа является продолжением разработок авторов в данном направлении.

Первый этап (заполнение вакуумированной линии хладагентом)

В соответствии с инструкциями [14, 15], перед началом работы ВТН обе линии его контура «высокого и «низкого давления» заполняются хладагентом в количестве:

$$G_o = G_{o.n.} + G_{o.k.}, \quad (1)$$

где G_o – общая масса хладагента, поступившего в общий контур предварительно вакуумированной линии ВТН из резервуара хладагента, кг; $G_{o.n.}$, $G_{o.k.}$ – количество вещества в линиях испарения и конденсата, кг, соответственно.

Нельзя трудно определить объемы хладагента, находящегося в жидкой (V) и паровой ($\hat{V}$) фазах:

$$V_{o.n.} = \frac{G_{o.n.}}{\rho_{o.x.}}; \quad V_{o.k.} = \frac{G_{o.k.}}{\rho_{o.x.}}; \quad (2)$$

$$\hat{V}_{o.n.} = V_n - \frac{G_{o.k.}}{\rho_{o.x.}}; \quad \hat{V}_{o.k.} = V_k - \frac{G_{o.k.}}{\rho_{o.x.}}, \quad (3)$$

где V_n , V_k – геометрические объемы линий испарения и конденсации, м³.

При этом, как правило, температуры хладагента во всем контуре ВТН и окружающей воздушной среды равны:

$$T_{cp} = T_{ox} = T_o. \quad (4)$$

В системе устанавливается равновесие между фазами в соответствии с законом Клапейрона–Клаузиуса [16–17]:

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = \frac{r^*}{R_y} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right). \quad (5)$$

Эта запись означает, что в диапазоне температур $[T_1-T_2]$ и соответствующих им давлений $[P_1-P_2]$ определяется значение теплоты фазового перехода (десублимации непосредственного перехода «пар – твердое тело», минуя жидкое состояние). Продолжительность первого этапа в зависимости от типоразмера установки составляет от нескольких секунд до минуты.

Второй этап (запуск компрессора, включение дросселя)

В момент времени, принимаемый за начало отчета, $\tau = 0$, осуществляется запуск компрессора и начинается двухпараметрический процесс: откачивание паровой фазы из линии испарения и нагнетание сжатого воздуха в линию конденсации.

Отметим один важный практический аспект, не отражающийся в научно-технической литературе. Обычно полагается, что после пуска компрессора некоторое время дроссель (терморегулирующий вентиль) остается закрытым до того момента, пока давление в линии всасывания не опустится до требуемого рабочего давления. Проведенные нами исследования [18] показали целесообразность вывода ВТН на рабочий режим при одновременном включении и компрессора, и открытия минимального угла дроссельной заслонки. Таким образом предупреждается возможность гидравлического удара при нарушении сплошности (неразрывности) потока.

Структура двухфазного парожидкостного потока в испарительной линии при этом может быть проиллюстрирована следующей моделью (рис. 4).

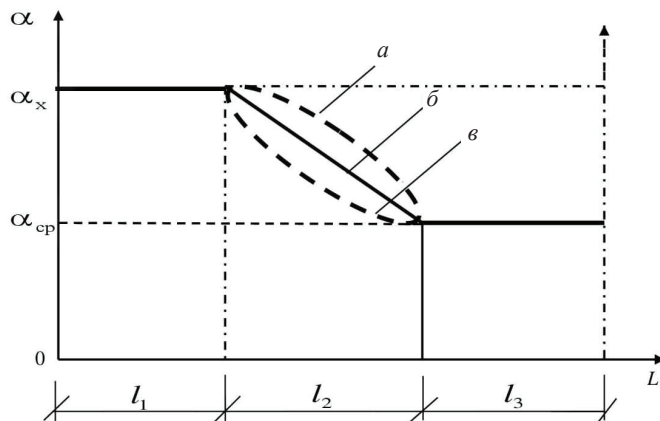


Рис. 4. Модель структуры двухфазного парожидкостного потока в испарительной линии: *a* – кривая выпуклого участка характерна для медленного начального образования пузырьков; *б* – постоянное нарастание объема пузырьков по каналу течения; *в* – медленное начальное образование пузырьков, затем их быстрый рост

Во-первых, условие теплоотдачи от потока хладагента к внутренней поверхности трубы испарительной линии будет определяться режимом течения (ламинарным или турбулентным). При этом на начальном участке l_1 – это преимущественно течение жидкой фазы с зарождающейся пузырьковой газовой (паровой) фазой.

Во-вторых, на центральном участке l_2 происходит инверсия фаз, нарастание паросодержания в системе и переход жидкости в дисперсно-капельное состояние.

В-третьих, на завершающем участке l_3 по контуру движется только пар.

Попадание капель жидкости в зону повышенного давления (линию конденсации) недопустимо, т. к. может приводить к кавитации и выходу из строя оборудования. При этом в системе осуществляется динамическое равновесие, определяемое функциональными зависимостями вида:

$$\rho_x = f(P, T); P = \varphi(T, \rho); T = \psi(P, \rho). \quad (6)$$

Примером такой зависимости может быть аппроксимационная формула для хладагента марки R410A, полученная на основании обработки результатов табличных данных:

$$\rho_x = 4,257P^{1,063} \left(\frac{T}{100} \right)^{-0,28}. \quad (7)$$

Естественно, что производительность компрессора определяется типом и принципом его работы [19–23]. Еще одним важным фактом является характеристика сети; в любом случае в расчетах процессов сжатия и перемещения газов необходимо учитывать рабочую характеристику компрессора и характеристику сети.

Выражение для определения объемной производительности компрессора имеет вид:

$$V^* = \lambda_o \cdot V_T, \quad (8)$$

где λ_o – объемный коэффициент производительности; V_T – теоретически рассчитанная объемная производительность, определяемая по конструктивным при-



знакам камер сжатия.

Значения коэффициента производительности зависят от степени сжатия и рассчитываются, например, для ротационно-пластинчатого центробежного агрегата, как [24, 25]:

$$\lambda_o = 1 - 0,05 \frac{P_k}{P_n}, \quad (9)$$

где P_k, P_n – давление в линиях конденсации и испарения, бар.

Необходимо обратить внимание и на тот факт, что в пусковой период характеристика сети также является величиной переменной. При этом для изменения плотности пара можно записать:

$$\frac{d\rho_{x,n}(\tau)}{d\tau} = -\lambda_o \frac{V_T}{V_n} \rho_{x,n}(\tau). \quad (10)$$

Не вдаваясь в особенности гидродинамики течения парожидкостного потока, запишем краевую задачу теплопроводности для стенки испарительного контура:

$$\frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[a_1(x, T) \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x} \right]; \quad \delta \geq 0; \quad 0 \leq x \leq \delta_1; \quad (11)$$

$$T_1(x, \tau)|_{\tau=0} = T_{1,0}(x); \quad (12)$$

$$-\lambda_x(x, T) \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x} \bigg|_{x=0} = \alpha_x [T_x - T_{1,0}(x, \tau)] \bigg|_{x=0} = q_x(\tau); \quad (13)$$

$$-\lambda_1(x, T) \frac{\partial T_1(x, \tau)}{\partial x} \bigg|_{x=\delta_1} = \alpha_{cp} [T_{cp} - T_1(x, \tau)] \bigg|_{x=\delta_1} = q_{cp}(\tau), \quad (14)$$

где индекс «1» относится к характеристикам материала теплообменной трубки; α_x – коэффициент теплоотдачи от хладагента к внутренней поверхности трубки; α_{cp} – коэффициент теплоотдачи от потока внешней среды к наружной поверхности теплообменной трубки.

Объем внутреннего пространства испарительной линии ВТН, исходя из геометрических параметров, определяется формулой:

$$V_{исп} = 0,785 \cdot d_n^2 \cdot L_\Sigma. \quad (15)$$

Если обозначить, что ϵ_o – начальная степень заполнения ВТН хладагентом, то количество жидкой фазы в линии испарения будет:

$$G_{o.и.} = 0,785 \cdot d_n^2 \cdot L_\Sigma \cdot \epsilon_o \cdot \rho_{o,x}, \quad (16)$$

где $L_\Sigma = L_{д.з.} + L_3 + L_{з.к.}$ – общая длина хладопровода, состоящего из участков: «дрозсель – мзеевик», «мзеевик», «мзеевик – компрессор».

Соответственно этому, выражения (5) и (6) будут определять значения давлений и температур в системе, а также с применением (11–14) позволят рассчитывать кинетику полей температур в системе. В частности, для постоянных значений теплофизических коэффициентов (λ, ρ, a, c) и коэффициентов теплоотдачи, решение краевой задачи теплопроводности в безразмерных переменных имеет следующий вид [26–29]:



$$\begin{aligned} \theta_{\text{н}}(\bar{x}, \text{Fo}) &= \frac{T_{\text{сп}} - T_{\text{н}}(r, \tau)}{T^*} = \frac{1}{2} Ki_{\text{сп}} \left[(1 - \bar{x}^2) - \frac{1}{3} \right] - \frac{1}{2} Ki_{\text{x}} \left(\bar{x}^2 - \frac{1}{3} \right) + \\ &+ \int_0^1 \theta_{\text{x.o.}}(\xi) d\xi + (Ki_{\text{сп}} - Ki_{\text{x}}) \cdot \text{Fo} - \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} [Ki_{\text{сп}} - (-1)^n \cdot Ki_{\text{x}}] \cdot \cos(\pi n \bar{r}) \cdot \exp(-\pi^2 n^2 \text{Fo}) - \\ &- 2 \sum_{n=1}^{\infty} \cos(\pi n \bar{x}) \cdot \int_0^1 \theta_{\text{x.o.}}(\xi) \cdot \cos(\pi n \xi) d\xi \cdot \exp(-\pi^2 n^2 \text{Fo}). \end{aligned} \quad (17)$$

$$Ki_{\text{x}} = \frac{q_{\text{x}}(\tau) \cdot \delta_1}{\lambda_{\text{x}} \cdot T^*}; \quad Ki_{\text{сп}} = \frac{q_{\text{сп}}(\tau) \cdot \delta_1}{\lambda_{\text{сп}} \cdot T^*}. \quad (18)$$

Третий этап (сублимация)

В процессе последующей откачки пара хладагента продолжается дальнейшее падение давления и снижение температуры. При достижении значения физической температуры 0 °С (273 К) начинается процесс поверхностной десублимации влаги, содержащейся в воздушном потоке окружающей среды, омывающей трубки и оребрение испарительного прибора.

С этого момента тепловая задача приобретает «новый статус». Она усложняется и дополняется уравнением теплопроводности с граничными условиями, учитывающими фазовый переход «пар – твердое тело» на внешней поверхности труб:

$$\frac{\partial T_{\text{м}}(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[a_{\text{м}}(x, T) \frac{\partial T_{\text{м}}(x, \tau)}{\partial x} \right], \quad \tau > \tau_1; \quad \delta_1 \leq x \leq \delta_{\text{м}}(\tau). \quad (19)$$

Условие теплообмена на внешней границе «шуба – воздушная среда», будет записано следующим образом:

$$-\lambda_{\text{м}}(x, T) \frac{\partial T_{\text{м}}(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_{\text{м}}(\tau)} = \alpha_{\text{сп}} [T_{\text{сп}} - T_{\text{м}}(x, \tau)] \Big|_{x=\delta_{\text{м}}(\tau)} + r_{\text{д}}^* \rho_{\text{м}}(\tau) \frac{d\xi}{d\tau}, \quad (20)$$

где $r_{\text{д}}^*$ – тепловой эффект десублимации, Дж/кг.

Отмечаем, что с появлением «шубы» (наледи) общая задача теплообмена между воздушной средой и хладагентом переходит в проблему с граничными условиями IV рода. Условия на границе раздела твердых фаз будут иметь вид:

$$T_{\text{н}}(x, \tau) \Big|_{x=\delta_1} = T_{\text{м}}(x, \tau) \Big|_{x=\delta_1}, \quad (21)$$

$$-\lambda_{\text{н}}(x, T_{\text{н}}) \frac{\partial T_{\text{н}}(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1} = -\lambda_{\text{м}}(x, T_{\text{м}}) \frac{\partial T_{\text{м}}(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1}. \quad (22)$$

Обратим внимание на некоторые особенности физики явления десублимации [30].

На наружной поверхности и элементах оребрения теплообменных труб испарителя ВТН возникает так называемое явление «поверхностной» десублимации. Ее отличительной особенностью является то, что теплота фазового перехода отводится от затвердевающего десублимата охлаждающей и в то же время охлаждаемой поверхностью. При этом существенна разница температур паровой фазы и поверхности охлаждения. Важно также и то, что образование кристаллов льда, хотя и носит объемный характер, но этот объем чрезвычайно мал, тем более в условиях интенсивного внешнего обогрева воздухом. Немаловажно и то, что форма и размеры кристаллов зависят от большого числа факторов различной природы, таких как: гидромеханические (интенсивность перемешивания потока, масштаб турбулентных пульсаций); термодинамические (давление, температура); тепло-



физические (плотность, теплоемкость, теплопроводность, теплота фазового перехода); физико-химические (химический потенциал, равновесие фаз, диффузия, способ создания пересыщения).

Отмечено [31, 32], что при десублимации происходит образование кристаллов льда с весьма развитой поверхностью и формой (пластинки, иголки, шипы). При этом, как правило, на внешней поверхности теплообменных трубок испарителя формируется пористый слой материала, и размеры этого слоя непрерывно изменяются в течение всего процесса.

Вначале на охлаждающей поверхности возникает тонкий слой инея с высокой порозностью, состоящей из игольчатых и дендритных кристаллов. Толщина этого слоя сначала растет с высокой скоростью, а затем снижается вплоть до нуля (по мнению авторов [33–37]). Одновременно с ростом толщины слоя идет его уплотнение, при этом происходит перекристаллизация вещества: первично образовавшиеся кристаллы неправильной формы переходят в более устойчивые формы, имеющие и иные показатели теплофизических характеристик.

Вместе с этим процесс десублимации сопровождается выделением значительного количества теплоты фазового перехода $r^*_д$. Отмечается [38], что именно дендритный рост кристаллов превалирует при протекании процесса в неподвижной среде на охлаждающей поверхности. В случае интенсивного перемешивания паровой фазы в основном наблюдается рост «плоских» дендритных кристаллов. В определенных условиях это может приводить к снижению порозности слоя десублимата, вплоть до образования монолита. В ходе процесса десублимации происходит и возрастание сил адгезионного сцепления кристаллов с охлаждаемой поверхностью. Это следует учитывать, как при расчете основного цикла работы ВТН (поскольку сопровождается ростом термического сопротивления слоя десублимата), так и при организации процесса очистки рабочих поверхностей испарительного контура от наросшей внешней «шубы». Указывается [30], что при поверхностной десублимации величина коэффициента теплоотдачи от воздушного потока к десублимату составляет порядка 3–10 Вт/(м² · К).

Изменение значений коэффициента теплоотдачи от потока хладагента к поверхности трубки испарителя имеет более сложный характер (рис. 4) и может изменяться от 2000–4000 Вт/(м² · К) (от жидкой фазы) и до 20–50 Вт/(м² · К) (от парообразного хладагента). Разумеется, для выполнения качественного расчета необходимо дополнить выражения приведенных выше математических моделей теплопереноса уравнениями, описывающими гидродинамику двухфазного потока в трубопроводной линии, и на их основе находить значения коэффициентов теплоотдачи [39].

На этом авторы считают возможным завершить изложение настоящей статьи. В следующей публикации предлагается осветить результаты моделирования тепловых процессов в конденсационной линии ВТН, а также предоставить оценку цифрового анализа и примеров расчета тепловых процессов во всем контуре воздушного теплового насоса в динамических условиях взаимодействия испарительного и конденсационного контуров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фен, Д. Б. Машины, энергия, энтропия / Д. Б. Фен. – Москва : Мир, 1986. – 336 с. – Текст : непосредственный.
2. Румер, Ю. Б. Термодинамика, статистическая физика и кинетика / Ю. Б. Румер,



М. Ш. Рывкин. – Москва : Наука, 1972. – 400 с. – Текст : непосредственный.

3. Попов, А. В. Новейшие возможности использования тепловых насосов / А. В. Попов. – Текст : непосредственный // Промышленная энергетика. – 2010. – № 4. – С. 46–50.

4. Райх, В. Специфика использования тепловых насосов в России: климат, эксплуатация, условия / В. Райх. – Текст : непосредственный // С.О.К.: Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2006. – № 3.

5. Филиппов, С. В. Перспективы применения воздушных тепловых насосов для теплоснабжения жилых зданий в различных климатических условиях / С. В. Филиппов, М. С. Ионов, М. Д. Дильман. – Текст : непосредственный // Теплоэнергетика. – 2012. – № 11. – С. 11–18.

6. Поздновский, А. П. Тепловые насосы: опыт внедрения и эксплуатации / А. П. Поздновский. – Текст : непосредственный // С.О.К.: Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2005. – № 8. – С. 50–52.

7. Рей, Д. Тепловые насосы : перевод с английского / Д. Рей, Д. Маймакл. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 224 с. – Текст : непосредственный.

8. Перяла, Р. Тепловые насосы / Р. Перяла. – Санкт-Петербург : Алфамер Паблишинг, 2011. – 108 с. – ISBN 978-5-93392-213-1. – Текст : непосредственный.

9. Второе начало термодинамики / Сади Карно, В. Томсон-Кельвин, Р. Клаузиус, Л. Больцман, М. Смолуховский ; под редакцией А. К. Тимирязева. – Москва ; Ленинград : Государственное технико-теоретическое издательство, 1934. – 311 с. – Текст : непосредственный.

10. Особенности функционирования фреонового контура малоэтажного здания с воздушным тепловым насосом в отопительный период / С. В. Федосов, В. Н. Федосеев, В. Е. Шебашев [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2019. – 4 (12). – С. 142–150.

11. Федосов, С. В. Эффективное энергосбережение малоэтажных строений воздушным тепловым насосом / С. В. Федосов, В. Н. Федосеев, А. Б. Петрухин. – Текст : непосредственный // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2020. – № 2 (1026). – С. 50–53.

12. Федосов, С. В. Многокритериальный процесс моделирования тепломассопереноса в воздушных теплонасосных системах с целью энергосберегающих решений Методом анализа иерархий / С. В. Федосов, В. Н. Федосеев, И. А. Зайцева. – Текст : непосредственный // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2020. – № 3(63). – С. 98–111.

13. Федосов, С. В. Тепловые процессы в испарительно-конденсационном контуре воздушного теплового насоса / С. В. Федосов, В. Н. Федосеев, С. В. Логинова. – Текст : непосредственный // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – Нижний Новгород, 2022. – № 1(61). – С. 104–110.

14. Инструкция по эксплуатации теплового насоса с передачей тепла от воздуха к воде. – URL: https://solardom.com/upload/iblock/287/Meeting_user_manual_MD_RU_.pdf. – Текст : электронный.

15. Рекомендации по экспериментальному проектированию систем теплохладоснабжения с использованием серийно выпускаемых холодильных машин, работающих в режиме тепловых насосов / Центр. н.-и. и проект.-эксперим. ин-т инж. оборуд. городов, жилых и обществ. зданий. – Москва : ЦНИИЭП, 1986. – 42 с. – Текст : непосредственный.

16. Термодинамика равновесия жидкость-пар / А. Г. Морачевский, Н. А. Смирнова, Е. М. Пиотровская [и др.]. – Ленинград : Химия, 1989. – 344 с. – ISBN 5-7245-0363-8. – Текст : непосредственный.

17. Сивухин, Д. В. Общий курс физики. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин. – Издание 3-е, исправленное и дополненное. – Москва : Наука, 1990. – 592 с. – Текст : непосредственный.

18. Тепловой насос как элемент энергосберегающей политики для энергоемких предприятий текстильной и легкой промышленности / С. В. Федосов, В. Н. Федосеев, А. Б. Петрухин [и др.]. – Текст : непосредственный // Текстильная и легкая промышлен-



ность. – 2018. – № 2. – С. 10–12.

19. Техничко-экономическое обоснование применения энергоэффективных теплонасосных компрессорных устройств в текстильных строениях / С. В. Федосов, В. Н. Федосеев, И. А. Зайцева [и др.]. – Текст : непосредственный // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2019. – № 4 (12). – С. 111–119.

20. Федосов, С. В. Эффективность компрессора в теплохолодильном компрессионном цикле воздушного теплового насоса / С. В. Федосов, В. Н. Федосеев, И. А. Зайцева. – Текст : непосредственный // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2020. № 4 (64). – С. 82–89.

21. Пономарев, В. Н. Анализ характеристик компрессора теплонасосной установки: работа на различных рабочих телах / В. Н. Пономарев, А. В. Шолохов. – Текст : непосредственный // Монтаж и специальные работы в строительстве. – 1993. – № 10. – С. 9–11.

22. Виды и типы компрессорного оборудования / В. Н. Федосеев, А. Г. Печникова, И. А. Зайцева, О. Р. Андреева. – Текст : непосредственный // Теория и практика технических, организационно-технологических и экономических решений : сборник научных трудов. – Иваново, 2016. – С. 199–211.

23. Патент № 177875 Российская Федерация, МПК F 04 В 45/04. Мембранный компрессор : № 2017125839 : заявл. 18.07.2017 : опубл. 15.03.2018 / Алоян Р. М., Федосеев В. Н., Емелин В. А., Воронов В. А., Свиридов И. А. ; заявитель и патентообладатель Ивановский государственный политехнический университет. – 4 с. : ил. – Текст : непосредственный.

24. Ротационные компрессоры / А. Г. Головинцов, В. А. Румянцев, В. И. Ардашев [и др.]. – Москва : Машиностроение, 1964. – 315 с. : ил. – Текст : непосредственный.

25. Хлумский, В. Ротационные компрессоры и вакуум – насосы : перевод с чешского / В. Хлумский. – Москва : Машиностроение, 1971. – 127 с. – Текст : непосредственный.

26. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – Издание 5-е перераб. и доп. – Москва : Атомиздат, 1979. – 416 с. – Текст : непосредственный.

27. Себиси, Т. Конвективный теплообмен / Т. Себиси, П. Брэдшоу. – Москва : Мир, 1987. – 592 с. – Текст : непосредственный.

28. Напалков, Г. Н. Тепломассоперенос в условиях инееобразования / Г. Н. Напалков. – Москва : Машиностроение, 1983. – 189 с. – Текст : непосредственный.

29. Александров, И. С. Прогнозирование коэффициента теплоотдачи при кипении хладагента в испарителе теплового насоса с помощью искусственных нейронных сетей / И. С. Александров, А. А. Герасимов. – Текст : непосредственный // Известия КГТУ. – 2015. – № 38. – С. 138–147.

30. Горелик, А. Г. Десублимация в химической промышленности / А. Г. Горелик, А. В. Амитин. – Москва : Химия, 1986. – 272 с. – Текст : непосредственный.

31. Баранов, Д. А. Процессы и аппараты : учебник для студентов учреждений среднего профессионального образования / Д. А. Баранов, А. М. Кутепов. – Москва : Академия, 2004. – 304 с. – ISBN 5-7695-2367-0. – Текст : непосредственный.

32. Процессы и аппараты химической технологии. Явления переноса, макрокинетика, подобию, моделирование, проектирование. В 5 томах. Том 1. Основы теории процессов химической технологии / Д. А. Баранов, А. В. Вязьмин, А. А. Гухман [и др.]. – Москва : Логос, 2000. – 480 с. – Текст : непосредственный.

33. Бабакин, Б. С. Интенсификация работы приборов охлаждения при инееобразовании : обзорная информация / Б. С. Бабакин, М. А. Еркин. – Москва : АгроНИИТЭИММП, 1987. – 28 с. – Текст : непосредственный.

34. Кремерс, К. Д. Образование инея на вертикальных цилиндрах в условиях свободной конвекции / К. Д. Кремерс, В. К. Мера. – Текст : непосредственный // Теплопередача. – 1982. – № 2. – С. 1–7.

35. Румянцев, Ю. Д. Повышение эффективности работы охлаждающих устройств при инееобразовании : обзорная информация / Ю. Д. Румянцев, И. А. Скоробогатов. – Москва : ЦНИИТЭИмаш, 1985. – 32 с. – Текст : непосредственный.

36. Птухин, И. Н. Экспериментальные исследования работы ТНУ при частичном



обмерзании испарителя / И. Н. Птухин, В. И. Максимов. – Текст : непосредственный // Теплофизические основы энергетических технологий : сборник научных трудов IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Томск, 10-12 окт. 2013. – Томск : ТПУ, 2013. – С.104–107.

37. Володин, О. А. Интенсификация теплообмена при кипении и испарении жидкостей на модифицированных поверхностях / О. А. Володин, Н. И. Печеркин, А. Н. Павленко. – Текст : непосредственный // Теплофизика высоких температур. – 2021. – Том 59, № 2. – С. 280–312.

38. Кафаров, В. В. Процессы массовой кристаллизации из растворов и газовой фазы / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, Э. М. Кольцова. – Москва : Наука, 1983. – 368 с. – Текст : непосредственный.

39. Елин, Н. Н. Разработка и эксплуатация математических моделей систем добычи и обустройство нефтяных месторождений / Н. Н. Елин, Ю. В. Насонов, А. П. Попов. – Москва : Наука, 2006. – 366 с. – Текст : непосредственный.

FEDOSOV Sergey Viktorovich^{1,2}, academician of RAACS, doctor of technical sciences, professor of the chair of technology of binders and concretes; FEDOSEEV³ Vadim Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor of the chair of organization of production and urban economy

HEAT EXCHANGE AND DESUBLIMATION IN THE EVAPORATION LINE OF AN AIR HEAT PUMP

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering

26, Yaroslavskoe Ave., Moscow, 308012, Russia. Tel.: +7 (980) 694-81-41; e-mail: fedosov-academic53@mail.ru

²Volga State Technological University

3, Lenin Square, Yoshkar-Ola, 424000, Russia. Tel.: +7 (980) 694-81-41; e-mail: fedosov-academic53@mail.ru

³Ivanovo State Polytechnic University

21, Sheremetev Ave., Ivanovo, 153000, Russia. Тел.: +7 (960) 506-40-23; e-mail: 4932421318@mail.ru

Key words: air heat pump, refrigerant, evaporation and condensation unit, evaporation, condensation, heat transfer, kinetics, sublimation.

This work is a continuation of the authors' developments in the research of thermal processes in the evaporation-condensation circuit of an air heat pump AHP.

REFERENCES

1. Fenn J. B. Mashiny, energiya, entropiya [Engines, Energy and Entropy]. – Moscow: Mir, 1986. – 336 p.

2. Rumer Yu. B., Rvkin M. Sh. Termodinamika, statisticheskaya fizika i kinetika [Thermodynamics, statistical physics and kinetics]. Moscow: Nauka, 1972. – 400 p.

3. Popov A. V. Noveyshie vozmozhnosti ispolzovaniya teplovykh nasosov [The latest possibilities of using heat pumps] // Promyshlennaya energetika [Industrial energy]. – 2010. – № 4. – P. 46–50.

4. Raykh V. Spetsifika ispolzovaniya teplovykh nasosov v Rossii: klimat, ekspluatatsiya, usloviya [Specifics of the use of heat pumps in Russia: climate, operation, conditions] // S.O.K.: Sankhnikh, otoplenie, konditsionirovanie [S.O.K.: Plumbing, heating, air conditioning]. – 2006. – № 3.

5. Filippov S. V., Ionov M. S., Dilman M. D. Perspektivy primeneniya vozdukhnykh teplovykh nasosov dlya teplosnabzheniya zhilykh zdaniy v razlichnykh klimaticheskikh usloviyakh [Prospects of application of air heat pumps for heat supply of residential buildings in



various climatic conditions]. *Teploenergetika* [Thermal power engineering]. 2012. № 11. P. 11–18.

6. Pozdnovsky A. P. *Teplovye nasosy: opyt vnedreniya i ekspluatatsii* [Heat pumps: implementation and operation experience] // S.O.K.: Santechnika, otoplenie, kondicionirovanie [S.O.K.: Plumbing, heating, air conditioning]. – 2005. – № 8. – P. 50–52.

7. Reay D., Macmichael D. *Teplovye nasosy* [Heat pumps]. Moscow : Energoizdat, 1982. – 224 p.

8. Peryala R. *Teplovye nasosy* [Heat pumps]. – Saint-Petersburg : Alfamer Publishing, 2011. – 108 p. – ISBN 978-5-93392-213-1.

9. Vtoroe nachalo termodinamiki [The second law of thermodynamics]. (Sadi Carno, V. Tomson-Kelvin, R. Clausius, L. Boltzman, M. Smolukhovskiy) / Pod. red. A. K. Timiryazeva. – Moscow; Leningrad : Gosudarstvennoe tekhniko-teoreticheskoe izdatelstvo, 1934. – 311 p.

10. Fedosov S. V., Fedoseev V. N., Shebashev V. E., [et al.]. Osobennosti funktsionirovaniya freonovogo kontura maloetazhnogo zdaniya s vozdushnym teplovym nasosom v otopitelny period [Features of the functioning of the freon circuit of a low-rise building with an air heat pump during the heating period]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii* [Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies]. 2019. 4 (12). P. 142–150.

11. Fedosov S. V., Fedoseev V. N., Petrukhin A. B. Effektivnoe energosberezhenie maloetazhnykh stroeniy vozdushnym teplovym nasosom [Efficient energy saving of low-rise buildings with an air heat pump]. *BST: Byulleten stroitelnoy tekhniki* [BST: Bulletin of Construction Machinery]. 2020. № 2 (1026). P. 50–53.

12. Fedosov S. V., Fedoseev V. N., Zaytseva I. A. Mnogokriterialny protsess modelirovaniya teplomassoperenosa v vozdushnykh teplonasosnykh sistemakh s tselyu energoresursosberegayushchikh resheniy metodom analiza ierarkhiy [Multi-criteria process of modeling heat and mass transfer in air heat pump systems for the purpose of energy-saving solutions by the method of hierarchy analysis]. *Sovremennye naukoymkie tekhnologii. Regionalnoe prilozhenie* [Modern high-tech technologies. Regional application]. 2020. № 3 (63). P. 98–111.

13. Fedosov S. V., Fedoseev V. N., Loginova S. A. Teplovye protsessy v isparitelno-kondensatsionnom konture vozdušnogo teplovogo nasosa [Thermal processes in the evaporating-condensing circuit of the air heat pump system]. – *Privolzhskiy nauchny zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal. Nizhegorod. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. Nizhny Novgorod, 2022. № 1(61). P. 104–110.

14. Instruktsiya po ekspluatatsii teplovogo nasosa s peredachey tepla ot vozdukh k vode [Operating instructions for a heat pump with heat transfer from air to water]. URL: https://solardom.com/upload/iblock/287/Meeting_user_manual_MD_RU_.pdf.

15. Rekomendatsii po eksperimentalnomu proektirovaniyu sistem teplokhladonasabzheniya s ispolzovaniem seriyno vypuskaemykh kholodilnykh mashin, rabotayushchikh v rezhime teplovykh nasosov [Recommendations for the experimental design of heat and cooling systems using mass-produced refrigerating machines operating in the mode of heat pumps] / Tsentr. n.-i. i proekt.-eksperim. in-t inzh. oborud. gorodov, zhilykh i obschestv. Zdanij. – Moscow : TsNIIEP, 1986. – 42 p.

16. Morachevsky A. G., Smirnova N. A., Piotrovskaya E. M. [et al.]. *Termodinamika ravnesiya zhidkost-par* [Thermodynamics of liquid-vapor equilibrium]. – Leningrad : Khimiya, 1989. – 344 p. – ISBN 5-7245-0363-8.

17. Sivukhin D. V. *Obschiy kurs fiziki. T. II. Termodinamika i molekulyarnaya fizika* [General course of physics. Vol. II. Thermodynamics and molecular physics]. Izdanie 3-e, ispravlennoe i dopolnennoe. – Moscow : Nauka, 1990. – 592 p.

18. Fedosov S. V., Fedoseev V. N., Petrukhin A. B. [et al.]. *Teplovoy nasos kak element energosberegayushey politiki dlya energoyomkikh predpriyatiy tekstilnoy i lyogkoy promyshlennosti* [Heat pump as an element of energy-saving policy for energy-intensive textile and light industry enterprises] / *Tekstilnaya i lyogkaya promyshlennost* [Textile and light industry] – 2018. – № 2. – P. 10–12.

19. Fedosov S. V., Fedoseev V. N., Zaytseva I. A. [et al.]. *Tekhniko-ekonomicheskoe obosnovanie primeneniya energoefektivnykh teplonasosnykh kompressornykh ustroystv v*



tekstilnykh stroeniyakh [Feasibility study of the use of energy-efficient heat pump compressor devices in textile buildings]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii [Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies]. 2019. 4 (12). P. 111–119.

20. Fedosov S. V., Fedoseev V. N., Zaytseva I. A. Effektivnost kompressora v teplokhodilnom kompressionnom tsikle vozdušnogo teplovogo nasosa [Compressor efficiency in the heat-cooling compression cycle of an air heat pump]. Sovremennye naukoymkie tekhnologii. Regionalnoe prilozhenie [Modern high-tech technologies. Regional application]. 2020. № 4 (64). P. 82–89.

21. Ponomaryov V. N., Sholokhov A. V. Analiz kharakteristik kompressora teplonasosnoy ustanovki: rabota na razlichnykh rabochikh telakh [Analysis of the characteristics of the compressor of a heat pump unit: work on various working bodies] // Montazh i spetsialnye raboty v stroitelstve [Installation and special works in construction]. – 1993. – № 10. P. 9–11.

22. Fedoseev V. N., Pechnikova A. G., Zaytseva I. A., Andreeva O. R. Vidy i tipy kompressornogo oborudovaniya [Kinds and types of compressor equipment]. Teoriya i praktika tekhnicheskikh, organizatsionno-tekhnologicheskikh i ekonomicheskikh resheniy. [Theory and practice of technical, organizational, technological and economic solutions]. Sbornik nauchnykh trudov. – Ivanovo, 2016. P. 199–211.

23. Aloyan R. M., Fedoseev V. N., Emelin V. A., Voronov V. A., Sviridov I. A. Membranny kompressor [Diaphragm compressor]: № 2017125839 : zayav. 18.07.2017 : opubl. 15.03.2018 / zayavit. i patentooblad. Ivanovskiy gos. politekh. un-t. – 4 p. : il.

24. Golovintsov A. G., Rummyantsev, V. A. Ardashev V. I. [et al.]. Rotatsionnye kompressory [Rotary compressors]. Moscow : Mashinostroenie, 1964. – 315 p. : il.

25. Khlumsky V. Rotatsionnye kompressory i vakuum-nasosy [Rotary compressors and vacuum pumps]. Per. s cheschk. Moscow : Mashinostroenie, 1971. – 127 p.

26. Kutateladze S. S. Osnovy teorii teploobmena [Fundamentals of the theory of heat transfer]. – Izdanie 5-e pererab. i dop. – Moscow : Atomizdat, 1979. – 416 p.

27. Sebisi T., Bredshou P. Konvektivny teploobmen [Convective heat exchange]. – Moscow : Mir, 1987. – 592 p.

28. Napalkov G. N. Teplomassoperenos v usloviyakh ineeobrazovaniya [Heat and mass transfer in conditions of frost formation]. – Moscow : Mashinostroenie. 1983. – 189 p.

29. Aleksandrov I. S., Gerasimov A. A. Prognozirovanie koeffitsienta teplootdachi pri kipenii khladagenta v isparitele teplovogo nasosa s pomoschyu iskusstvennykh neyronnykh setey [Prediction of the heat transfer coefficient during the boiling of the refrigerant in the heat pump evaporator using artificial neural networks]. – Izvestiya KGTU [News of KSTU]. 2015, № 38. P. 138–147.

30. Gorelik A. G., Amitin A. V. Desublimatsiya v khimicheskoy promyshlennosti [Desublimation in the chemical industry]. Moscow : Khimiya. 1986. – 272 p.

31. Baranov D. A., Kutepov A. M. Protsessy i apparaty [Processes and apparatuses]. Uchebnik dlya stud. uchrezhdeniy sred. prof. obrazovaniya. – Moscow : Akademiya, 2004. – 304 p. – ISBN 5-7695-2367-0.

32. Baranov D. A., Vyazmin A. V., Gukhman A. A. [et al.]. Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. Yavleniya perenosa, makrokinetika, podobie, modelirovanie, proektirovanie: V 5 t. T.1. Osnovy teorii protsessov khimicheskoy tekhnologii [Processes and devices of chemical technology. Transfer phenomena, macrokinetics, similarity, modeling, design. In 5 vol. Vol. 1. Fundamentals of the theory of chemical technology processes]. – Moscow : Logos, 2000. – 480 p.

33. Babakin B. S., Erkin M. A. Intensifikatsiya raboty priborov okhlazhdeniya pri ineeobrazovanii: Obzornaya informatsiya [Intensification of the operation of cooling devices during frost formation: Overview] – Moscow : AgroNIITEIMMP. 1987. – 28 p.

34. Kremers K. D., Mera V. K. Obrazovanie ineya na vertikalnykh tsilindrakh v usloviyakh svobodnoy konveksii [Frost formation on vertical cylinders under conditions of free convection] // Teploperedacha [Heat transfer]. – 1982. – № 2. P. 1–7.

35. Rumyantsev Yu. D., Skorobogatov I. A. Povyshenie effektivnosti raboty okhlazhdayushchikh ustroystv pri ineeobrazovanii: Obzornaya informatsiya [Improving the efficiency of cooling devices during frost formation: Overview]. – Moscow :



TsNIITEImyasomolprom. 1985. – 32 p.

36. Ptukhin I. N., Maksimov V. I. Eksperimentalnye issledovaniya raboty TNU pri chastichnom obmerzanii isparatelya [Experimental studies of TNU operation during partial freezing of the evaporator] // Teplofizicheskie osnovy energeticheskikh tekhnologiy [Thermophysical fundamentals of Energy technologies] : sbornik nauchnykh trudov IV Vseros. nauch.-prakt. konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Tomsk, 10-12 okt. 2013 – Tomsk : TPU, 2013. – P. 104–107.

37. Volodin O. A., Pecherkin N. I., Pavlenko A. N. Intensifikatsiya teploobmena pri kipenii i isparenii zhidkostey na modifitsirovannykh poverkhnostyakh [Intensification of heat exchange during boiling and evaporation of liquids on modified surfaces] // Teplofizika vysokikh temperature [Thermophysics of high temperatures]. 2021. Vol. 59. № 2. P. 280–312.

38. Kafarov V. V., Dorokhov I. N., Koltsova E. M. Protsessy massovoy kristallizatsii iz rastvorov i gazovoy fazy [Processes of mass crystallization from solutions and gas phase]. – Moscow : Nauka, 1983. – 368 p.

39. Elin N. N., Nassonov Yu. V., Popov A. P. Razrabotka i ekspluatatsiya matematicheskikh modeley sistem dobychi i obustroystvo neftyanykh mestorozhdeniy [Development and operation of mathematical models of production systems and development of oil fields]. – Moscow : Nauka. 2006. – 366 p.

© С. В. Федосов, В. Н. Федосеев, 2022

Получено: 13.04.2022 г.

УДК 621.438:62-681

М. Н. ЧЕКАРДОВСКИЙ, д-р техн. наук, проф., кафедры инженерных систем и сооружений; **К. Н. ИЛЮХИН**, канд. техн. наук, доц. кафедры инженерных систем и сооружений; **С. М. ЧЕКАРДОВСКИЙ** канд. техн. наук, доц. кафедры транспорта углеводородных ресурсов; **А. Ф. ШАПОВАЛ**, д-р техн. наук, проф., кафедры инженерных систем и сооружений

АЛГОРИТМ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ ГАЗОВОЙ МИКРОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет»

Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, д. 38. Тел.: (3452) 28-39-40; эл. почта: misha.tchekardovskij@yandex.ru

Ключевые слова: газовые микротурбины, когенерация, исследование режимов работы, диагностика оборудования.

Рассматривается взаимосвязь между надежностью, эффективностью и диагностическим обслуживанием газовых микротурбинных установок (ГМТУ), исследованиями номинальных и эксплуатационных условий ГМТУ, разработкой и совершенствованием методов расчета номинальных и эксплуатационных термодинамических и диагностических параметров установки. Это привело к разработке паспорта термодинамических параметров, которые можно сравнить с параметрами тех же агрегатов, когда они работают, с целью диагностики их состояния.

Газовые микротурбинные установки (ГМТУ) создают надежное, круглогодичное энергообеспечение торгово-развлекательных центров (ТРЦ), гостиниц,