

УДК 621.56–52

Расчет капиллярных трубок по безразмерным уравнениям

Канд. техн. наук В. Л. КОШЕЛЕВ

ООО «ФАВВ рефимпэкс»

236000, г. Калининград, Гвардейский проспект, 15

Канд. техн. наук А. И. ЕЙДЕЮС, М. Ю. НИКИШИН

Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота (БГАРФ)

236029, Калининград, ул. Молодежная, 6

Five equations for calculation of length of capillary tube or flow of throttling refrigerant and parameters of a critical current on the outlet of the tube, such as pressure, mass quality, speed, are presented in this article. The coefficients of the equations, which determine the relation between dimensionless variables, are received by regression analysis of multivariate calculations for throttling of the nine refrigerants. Concrete example of procedure of calculation using engineering calculator is shown. Influence of boiling pressure on length of tube and flow of refrigerant is considered.

Keywords: refrigerant, capillary tube, drosselirovaniye, steam quality, pressure.

Ключевые слова: хладагент, капиллярная трубка, дросселирование, паросодержание, давление.

При проектировании малых холодильных машин (ХМ) приходится подбирать капиллярные трубки (КТ), размеры которых зависят от многих факторов. Анализ работы ХМ в нерасчетных режимах предполагает наличие данных о пропускной способности конкретной КТ, т.к. установившийся режим наступает лишь при равенстве массовых расходов хладагента, проходящего через компрессор, конденсатор, дросселирующее устройство и испаритель.

Существуют разные методы расчета КТ [1]. Большинство из них базируется на определенной серии опытов и имеет ограниченную область применения. Ограничения обусловлены трудностями экспериментального определения параметров критического режима течения хладагента на выходе КТ. Весьма сложно опытным путем установить даже сам факт наступления критического течения, при котором скорость двухфазного потока достигает скорости распространения звука в нем, а понижение давления после КТ перестает влиять на расход дросселируемого хладагента.

Методика гидродинамического расчета КТ по коротким участкам [2] позволяет находить длину трубки принятого диаметра и параметры критического течения без использования данных о скорости распространения звука в дросселируемом потоке хладагента. Для облегчения расчетов составлена компьютерная программа *RefCap*. Полученные по ней результаты расчета длины КТ при известном расходе хладагента и определения расхода хладагента при заданных размерах трубки сопоставлялись с доступными данными зарубежных исследователей [1]. Совпадение данных свидетельствует о достоверности методики расчета.

Для практических расчетов КТ лучше всего подходят готовые формулы. Получают распространение обобщенные уравнения в виде степенных зависимостей между безразмерными переменными. Попытки зарубежных специалистов получить одно

обобщенное уравнение по дросселированию в КТ всех хладагентов представляются неперспективными ввиду существенного различия свойств хладагентов. Более оправдано обобщение данных по дросселированию каждого хладагента в отдельности. В данном обобщении используются результаты многовариантных расчетов КТ по программе *RefCap*. Путем регрессионного их анализа определяются коэффициенты безразмерных уравнений.

В статье [3] по шести хладагентам приводятся коэффициенты уравнений регрессии для расчета длины трубки и расхода дросселируемого хладагента. К настоящему времени перечень рассматриваемых хладагентов расширен до девяти и увеличено количество вариантов расчета при дросселировании каждого из них, что повышает точность аппроксимации. Кроме того, получены безразмерные уравнения для расчета параметров критического течения: давления $p_{кр}$, массового паросодержания $x_{кр}$ и скорости парожидкостной смеси $w_{кр}$.

При обобщении результатов расчета по дросселированию каждого хладагента использованы следующие безразмерные переменные:

$$\pi_1 = l/d_t; \pi_2 = 3600G/[(\pi d_t^2/4)(p_k/v_c)^{0.5}];$$

$$\pi_3 = v''/v_c; \pi_4 = d_t(p_k/v_c)^{0.5}/\mu_c;$$

$$\pi_5 = 1-100(\Delta/d_t); \pi_6 = 1 + \Delta t_n/t_k;$$

$$\pi_7 = p_{кр}/p_k; \pi_8 = 1 - x_{кр}; \pi_9 = w_{кр}/w_0,$$

где l , d_t — длина и внутренний диаметр капиллярной трубки; G — массовый расход хладагента; p_k , t_k — давление и температура конденсации; v'' — удельный объем насыщенного пара при давлении p_k ; v_c , μ_c — удельный объем и динамическая вязкость парожидкостной смеси на входе в капиллярную трубку; Δ/d_t — относительная шероховатость КТ; Δt_n — переохлаждение хладагента; w_0 — скорость хладагента на входе в КТ.

Все упомянутые величины подставляются в размерности СИ. Расчет следует проводить с учетом состояния дросселируемого хладагента на входе в КТ. При дросселировании насыщенного хладагента в качестве параметров парожидкостной смеси v_c и μ_c применяются значения удельного объема v' и динамической вязкости μ' жидкости на линии насыщения, зависящие от t_k или p_k . Если дросселируется переохлажденная жидкость с температурой $t_{ж}$, то переохлаждение $\Delta t_{п} = t_k - t_{ж}$. В этом случае найденные по температуре $t_{ж}$ значения удельного объема v' и динамической вязкости μ' используются вместо соответствующих значений v_c и μ_c . Когда на дросселирование поступает смесь жидкости и пара, начальное ее паросодержание x_0 определяется отношением:

$$x_0 = (i_c - i') / (i'' - i'),$$

где i_c — энтальпия смеси; i' , i'' — энтальпия жидкости и пара на линии насыщения при давлении p_k .

Паросодержание x_0 в явном виде не присутствует в безразмерных переменных. Оно используется при определении параметров парожидкостной смеси на входе в КТ:

$$v_c = v'(1 - x_0) + v''x_0 = v' + (v'' - v')x_0,$$

$$\mu_c = \mu'(1 - \beta_0) + \mu''\beta_0 = \mu' - (\mu' - \mu'')\beta_0,$$

где β_0 — расходное объемное паросодержание.

Величину β_0 можно и не вводить, т. к. она зависит от массового паросодержания x_0 и отношения удельных объемов v'/v'' :

$$\beta_0 = x_0 / [x_0 + (1 - x_0)(v'/v'')] = v''x_0 / v_c.$$

Скорость хладагента на входе в КТ для переменной π_9 определяется как $w_0 = 4Gv_c / (\pi d^2)$.

Переменные $\pi_1, \pi_2, \pi_7, \pi_8, \pi_9$ содержат искомые величины: длину l , расход G , давление $p_{кр}$, паросодержание $x_{кр}$, скорость $w_{кр}$. Для определения этих переменных по результатам многовариантных расчетов КТ использованы степенные зависимости:

$$\pi_1 = e^{b_1} \pi_2^{n_2} \pi_3^{n_3} \pi_4^{n_4} \pi_5^{n_5} \pi_6^{n_6}; \quad (1)$$

$$\pi_2 = e^{b_2} \pi_1^{m_1} \pi_3^{m_3} \pi_4^{m_4} \pi_5^{m_5} \pi_6^{m_6}; \quad (2)$$

$$\pi_7 = e^{b_7} \pi_2^{r_2} \pi_3^{r_3} \pi_4^{r_4} \pi_5^{r_5} \pi_6^{r_6}; \quad (3)$$

$$\pi_8 = e^{b_8} \pi_2^{s_2} \pi_3^{s_3} \pi_4^{s_4} \pi_5^{s_5} \pi_6^{s_6}; \quad (4)$$

$$\pi_9 = e^{b_9} \pi_2^{u_2} \pi_3^{u_3} \pi_4^{u_4} \pi_5^{u_5} \pi_6^{u_6}. \quad (5)$$

После логарифмирования и ввода новых переменных из уравнения (1) получается линейное уравнение вида:

$$y_1 = b_1 + n_2 x_2 + n_3 x_3 + n_4 x_4 + n_5 x_5 + n_6 x_6,$$

где $y_1 = \ln(\pi_1)$; $x_2 = \ln(\pi_2)$; $x_3 = \ln(\pi_3)$; $x_4 = \ln(\pi_4)$; $x_5 = \ln(\pi_5)$; $x_6 = \ln(\pi_6)$.

К аналогичному виду нетрудно привести и уравнения (2)–(5). Когда для определенного массива данных известны значения y и соответ-

ствующие им значения x_i , коэффициенты линейного уравнения регрессии находятся по типовой программе ЛИНЕЙН, которая входит в состав пакета *Excel*. Точность аппроксимации тем выше, чем лучше взаимосвязь между зависимыми y и объясняющими x_i переменными подчиняется степенной зависимости и чем больше сочетаний между переменными y и x_i содержится в массиве обрабатываемых данных. Программа линейной регрессии одновременно выдает среднее квадратичное отклонение σ предсказанных значений зависимой переменной от их значений, содержащихся в массиве.

Массив обрабатываемых данных формировался по каждому хладагенту отдельно. Одни и те же данные использованы для определения всех зависимых (искомых) переменных по дросселированию конкретного хладагента в КТ. Заметим, что переменная π_1 в уравнении (1) считается зависимой, а в уравнении (2) она отнесена к объясняющим (независимым). Дело в том, что по уравнению (1) определяется длина капиллярной трубки l при известном расходе хладагента G , а по уравнению (2) находится расход хладагента через трубку заданных размеров. В формировании массивов исходных данных принимал участие курсант БГАРФ Киньябузов А. А.

Численные значения коэффициентов уравнений (1)–(5), а также стандартная погрешность σ каждого уравнения приводятся в табл. 1. Показатели каждого уравнения разделены жирной чертой. Число вариантов (ЧВ) расчетных данных по каждому хладагенту приводится лишь применительно к уравнению (1). Это число одинаково для всех уравнений и составляет не менее 220. Варианты расчетов охватывают следующий диапазон исходных данных: $t_k = 30 \div 60$ °С; $d_T = 0,5 \div 4$ мм; $\Delta/d_T = 0 \div 0,003$; $\Delta t_{п} = 0 \div 20$ °С; $x_0 = 0 \div 0,3$. Расходы дросселируемого хладагента G подбирались так, чтобы длина КТ находилась в пределах от 0,5 до 12 м.

Из табл. 1 видно, что на стандартные погрешности σ_i каждого уравнения влияет вид хладагента. Наименьшую погрешность обеспечивают подобранные оценки коэффициентов уравнения (2), по которому определяется расход дросселируемого хладагента. Наименее точным оказывается уравнение (5), для которого $\sigma_9 = 0,039 \div 19,4$. Отчасти это объясняется одинаковым и равным 0,2 °С шагом понижения температуры насыщения хладагента при расчете КТ по программе *RefCap*. Падение давления каждого хладагента на расчетных участках при этом оказывается неодинаковым. Вместе с тем скорость парожидкостной смеси на последних участках КТ резко увеличивается. Из-за округления температур насыщения до 0,2 °С получается заметный разброс критических скоростей хладагента на выходе из КТ. По остальным параметрам критического режима погрешности расчета по безразмерным уравнениям не превышают 10%.

Основные показатели регрессионного анализа

Показатели	Дросселируемый хладагент								
	R134a	R152a	R22	R290	R404A	R407C	R410A	R507A	R600a
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
b_1	19,38720	20,07717	19,14644	20,31736	19,24237	19,46320	19,48948	19,29549	19,12976
n_2	-2,10865	-2,17378	-2,05902	-2,25885	-2,10559	-2,11047	-2,11972	-2,11489	-2,12107
n_3	-0,32112	-0,35441	-0,25238	-0,33846	-0,23235	-0,29055	-0,21414	-0,23396	-0,35190
n_4	0,20885	0,18253	0,19383	0,21140	0,20148	0,18839	0,18290	0,20050	0,25786
n_5	0,70003	0,75618	0,82087	0,86459	1,08235	0,90778	1,08228	1,01090	0,28422
n_6	3,52448	3,76297	2,65521	3,06999	2,37031	2,81584	2,34474	2,43444	4,53302
σ_1	0,06102	0,06588	0,04434	0,08063	0,04340	0,05390	0,05431	0,05013	0,07176
ЧВ	231	221	286	221	328	286	401	221	285
b_2	9,13928	9,15599	9,26425	8,90763	9,09088	9,18289	9,16040	9,07059	8,95363
m_1	-0,46993	-0,45377	-0,48301	-0,43677	-0,47187	-0,47096	-0,46935	-0,46922	-0,46609
m_3	-0,15144	-0,16185	-0,12249	-0,14609	-0,10841	-0,13660	-0,10063	-0,10895	-0,16420
m_4	0,10244	0,08934	0,09627	0,09925	0,09868	0,09158	0,08838	0,09808	0,12538
m_5	0,33862	0,34963	0,40122	0,38415	0,51157	0,43350	0,50958	0,48385	0,14231
m_6	1,67530	1,72955	1,29086	1,35912	1,12531	1,33624	1,10649	1,15368	2,13567
σ_2	0,02881	0,03010	0,02148	0,03546	0,02054	0,02546	0,02556	0,02361	0,03364
b_7	-7,79280	-7,78029	-7,98058	-7,85873	-7,69649	-7,54284	-7,76573	-7,69375	-7,87222
r_2	0,92428	0,89468	0,94523	0,94621	0,92545	0,90006	0,95507	0,94538	0,93417
r_3	0,36651	0,37177	0,35507	0,34825	0,30030	0,34608	0,27747	0,27870	0,39373
r_4	0,00693	0,02007	0,00896	0,00478	0,02527	0,00902	0,00275	0,01364	-0,00357
r_5	-0,04197	-0,03440	-0,03501	-0,01894	-0,03357	-0,05231	-0,00157	0,00974	0,00190
r_6	-0,30457	-0,31186	-0,23122	-0,30751	-0,19003	-0,28839	-0,18249	-0,16789	-0,31878
σ_7	0,03373	0,03082	0,02977	0,03360	0,03368	0,03427	0,03258	0,03703	0,03168
b_8	-2,27760	-1,96145	-2,04062	-2,69913	-3,31717	-2,33034	-2,35535	-3,42114	-2,38499
s_2	0,20618	0,17874	0,17328	0,25347	0,30119	0,20807	0,21139	0,33121	0,21713
s_3	0,23823	0,19575	0,25333	0,29946	0,44026	0,27284	0,30880	0,42909	0,21649
s_4	0,00205	0,00138	$-1,49 \cdot 10^{-5}$	$-2,91 \cdot 10^{-5}$	0,00543	$-7,25 \cdot 10^{-5}$	-0,00233	-0,00366	0,01138
s_5	0,04335	-0,02531	-0,01229	0,03100	0,10548	0,01285	-0,00029	-0,02238	-0,03454
s_6	0,45654	0,24149	0,30256	0,38795	0,55121	0,41848	0,52125	0,65337	0,39197
σ_8	0,03102	0,02929	0,03063	0,03557	0,06293	0,03231	0,03499	0,05204	0,03449
b_9	10,98284	11,56897	9,73047	10,85669	9,94160	10,47857	9,75304	9,96989	11,82945
u_2	-1,46712	-1,58017	-1,26650	-1,47560	-1,30137	-1,38568	-1,24918	-1,30643	-1,62058
u_3	0,15508	0,12747	0,20184	0,16884	0,18181	0,185110	0,15702	0,17507	0,16324
u_4	0,02205	0,04930	0,00951	0,04892	0,02873	0,01640	0,00942	0,03123	0,02925
u_5	-0,30053	-0,38591	-0,05798	-0,29409	-0,04294	-0,05878	-0,03682	-0,04746	-0,08891
u_6	-1,29667	-1,54390	-0,66445	-1,32098	-0,71057	-1,14787	-0,66770	-0,68383	-1,41617
σ_9	0,13408	0,12013	0,04215	0,12177	0,04523	0,09409	0,03981	0,04579	0,19328

Данные о параметрах критического течения

$\Delta t_n, ^\circ\text{C}$	x_0	$w_0, \text{м/с}$	π_7	$p_{кр}, \text{кПа}$	π_8	$x_{кр}$	π_9	$w_{кр}, \text{м/с}$
0	0	3,208	0,2597	342,56	0,6685	0,3315	21,078	67,629
10	0	3,084	0,2446	322,36	0,7302	0,2698	17,193	53,027
0	0,1	8,224	0,2850	376,03	0,5891	0,4109	9,217	75,802

Порядок использования безразмерных уравнений покажем на примере расчета длины КТ при следующих условиях: хладагент R134a, $t_k = 50 ^\circ\text{C}$, $\Delta t_n = 0 ^\circ\text{C}$, $x_0 = 0$, $G = 10/3600 \text{ кг/с}$, $t_k = 0,001 \text{ м}$, $\Delta/d_k = 0,001$.

По программе REFPROP 8,0 находим параметры хладагента $p_k = 1317905 \text{ Па}$, $v' = 0,90719 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$, $v'' = 15,0894 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\mu' = 141,772 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$, $\mu'' = 12,917 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$.

С использованием указанных значений определяем безразмерные переменные: $\pi_2 = 333,9913$; $\pi_3 = 16,6331$; $\pi_4 = 268,8449$; $\pi_5 = 0,9$; $\pi_6 = 1,0$. При значениях показателей $b_1, n_2, n_3, n_4, n_5, n_6$, приведенных в первом столбце табл. 1, по уравнению (1) получаем $\pi_7 = 1518,06$. Отсюда искомая длина трубки $l = 1,518 \text{ м}$.

Если при прежних исходных данных переохлаждение хладагента составляет $\Delta t_n = 10 ^\circ\text{C}$, то по температуре жидкости $t_k = 40 ^\circ\text{C}$ находим $v' = 0,87204 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\mu' = 161,49 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Значения v'' и μ'' остаются прежними, а вместо параметров смеси используем новые значения v' и μ' . При этом получаются безразмерные переменные: $\pi_2 = 327,4567$; $\pi_3 = 17,3036$; $\pi_4 = 240,791$; $\pi_5 = 0,9$; $\pi_6 = 1,2$. По уравнению (1) имеем $\pi_7 = 2903,68$, откуда $l = 2,904 \text{ м}$. Как и следовало ожидать, для дросселирования прежнего расхода переохлажденной жидкости необходима КТ большей длины.

Если дросселируется парожидкостная смесь с паросодержанием $x_0 = 0,1$, то по найденным при $t_k = 50 ^\circ\text{C}$ значениям v', μ', v'', μ'' вычисляются параметры смеси $v_c = 2,3254 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$, $\beta_0 = 0,64888$, $\mu_c = 58,1595 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$. С их учетом получаем безразмерные переменные: $\pi_2 = 534,732$; $\pi_3 = 6,4889$; $\pi_4 = 409,3318$; $\pi_5 = 0,9$; $\pi_6 = 1,0$. По уравнению (1) находим $\pi_7 = 831,22$, а $l = 0,831 \text{ м}$. Для дросселирования парожидкостной смеси требуется трубка меньшей длины.

Как видим, для расчета длины КТ по уравнению (1) нужны данные о свойствах хладагента и параметрах его состояния на входе в трубку, а также о диаметре и шероховатости внутренней поверхности трубки. К исходным данным относятся и расход дросселируемого хладагента G , который определяется на основе расчета цикла ХМ. Когда известны размеры трубки, расход хладагента G с заданными параметрами на входе в КТ определяется по уравнению (2). В обоих случаях с использованием уже найденных переменных $\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6$ по уравнениям (3)–(5) можно определить давление, массовое паросодержание и ско-

рость хладагента в критическом режиме течения. По условиям рассматриваемого примера для трех характерных случаев получаются данные, приведенные в табл. 2.

Параметры критического режима представляют практический интерес в случаях, когда давление после КТ (давление кипения p_0) превышает значения $p_{кр}$. При этом режим течения становится докритическим, и на его параметры влияет перепад давления $p_k - p_0$. В подобных случаях необходимо уменьшать расчетную длину КТ или искомый расход хладагента через трубку конкретного размера. Границу между критическим и докритическим режимами характеризует отношение перепадов давления $\Pi = (p_k - p_0)/(p_k - p_{кр})$. При $\Pi \geq 1$ режим является критическим. Расход хладагента в докритическом режиме предложено определять путем умножения расхода, найденного по зависимостям критического режима, на поправочный множитель ψ [4]. Связь между величинами Π и ψ характеризуется значениями:

Π	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
ψ	0,55	0,79	0,9	0,96	1,0

Численный анализ показывает, что множитель ψ можно использовать и для корректировки длины КТ. Следует заметить, что при работе КТ в составе ХМ отношение Π редко опускается ниже 0,6. При этом множитель $\psi > 0,9$. Указанные значения свидетельствуют о слабом влиянии давления кипения на процесс дросселирования в КТ. В целом, полученные уравнения с численными коэффициентами позволят специалистам выполнять расчеты КТ при разных исходных данных.

Список литературы

1. Кошелев В. Л. Энергоэффективность и капиллярные трубки холодильных машин систем кондиционирования воздуха. — Калининград: Издательство БГАРФ, 2012.
2. Ейдеюс А. И., Кошелев В. Л. Гидродинамический расчет капиллярных трубок // Вестник МАХ. 2008. № 3.
3. Ейдеюс А. И., Кошелев В. Л. Безразмерные уравнения для расчета капиллярных трубок // Вестник МАХ. 2011. № 2.
4. Вейнберг Б. С., Вайн А. Н. Бытовые компрессорные холодильники. — М.: Пищ. пром-сть, 1974.