

А.И. Дейнеко

Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова 2а, г. Киев, 03057, Украина

КАРТА РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ХОЛОДИЛЬНЫХ АГЕНТОВ ВНУТРИ ГЛАДКОЙ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЫ: ОБЗОР РАБОТ

Приведен обзор работ, посвященных исследованию гидродинамических режимов течения двухфазных потоков холодильных агентов внутри гладкой горизонтальной трубы. Для выполнения инженерных расчетов конденсаторов парокомпрессионных ХУ или ТН (с маслоотделителем) рекомендовано использование карты Эль Хаджала, Тома и Каваллини.

Ключевые слова: *Хладагент – Конденсация – Двухфазный поток – Горизонтальная труба – Карта режимов – Режим течения.*

А.І. Дейнеко

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2а, м. Київ, 03057, Україна

КАРТА РЕЖИМІВ ТЕЧІЇ ПРИ КОНДЕНСАЦІЇ ХОЛОДИЛЬНИХ АГЕНТІВ ВСЕРЕДИНІ ГЛАДКОЇ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ ТРУБИ: ОГЛЯД ПРАЦЬ

Наведено огляд праць, присвячених дослідженню гідродинамічних режимів течії двофазних потоків холодильних агентів всередині гладкої горизонтальної труби. Для виконання інженерних розрахунків конденсаторів парокомпресійних ХУ або ТН (з масловідділювачем) рекомендовано використання карти Ель Хаджан, Тома і Каваллини.

Ключові слова: *Холодоагент - Конденсація - Двофазний потік - Горизонтальна труба - Карта режимів - Режим течії.*

I. ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие «холодильного дела» (в Европе начало развитие с XV века в Португалии) привело к тому, что в конце XIX века, аммиак практически вытеснил такие холодильные агенты, как хлористый этил, сернистый ангидрид, хлористый метил, диоксид углерода, которые использовались в небольших, автоматических бытовых и торговых устройствах. Достоинствами аммиака являются хорошие термодинамические свойства, высокая объемная холодопроизводительность, относительно невысокие давления конденсации и кипения (близкие к атмосферному). В то же время аммиак токсичен, взрыво- и пожароопасен, реагирует с большинством цветных металлов [1-3].

С начала XX века «холодильное дело» перерастает в холодильную промышленность, поэтому, в 1924 году В. Кэрриер и Р. Ватерфилл инициируют рассмотрение вопросов безопасности рабочих веществ, применяемых в холодильных установках (ХУ) и тепловых насосах (ТН), а также, впервые высказывают мнение о необходимости направленного поиска в создании синтезированных рабочих веществ. В результате этого, в 1930 году Т. Мивлей со своими коллегами А. Хенном и Р. МакНари (США) получают патент на новое вещество для холодильных машин «Freon» (R12). Таким образом, поиск полностью безопасного хладагента с хорошими тепловыми параметрами (для парокомпрессионных циклов) с 1930-х годов привел к развитию синтезированных веществ

групп хлорфторуглеродов (ХФУ) и гидрохлорфторуглеродов (ГХФУ). Начиная с 1960-х годов R22 (выпускается с 1935 года) и R502 (с 1952 года) стали одними из основных хладагентов в средне- и низкотемпературных ХУ (промышленных, торговых, бытовых), кондиционерах и ТН [1-4].

В течение 1930-1970 годов, исследования процесса конденсации хладагентов внутри труб были весьма ограничены режимами эксплуатации ХУ и ТН модельных рядов заводов-изготовителей – исследуются только частные случаи. Результаты исследований (большая часть составляла «корпоративное знание» частных фирм и не была общедоступна), которые опубликованы в открытых источниках, разрознены и трудно сопоставимы. Однако, при комплексном анализе общего массива экспериментальных данных, возникла необходимость создания карты режимов течения пароконденсатных потоков внутри горизонтальной трубы (теплоотдача зависит от режима течения).

С другой стороны, в начале XX века более ранний технологический прогресс и интенсивный рост нефтеперерабатывающей промышленности, по сравнению с холодильной, так же побуждал создание карты режимов течения газо-жидкостных потоков в трубах.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Бейкер в 1954 году впервые разработал общую карту режимов течения адиабатных потоков (воздух-вода и воздух-нефть) в трубах 25,4 мм,

50,8мм и 101,6мм, по которой можно определять такие режимы течений: стратифицированный, снарядный, пробочный, дисперсный, кольцевой, пузырьковый, пенный и волнистый. Со временем, карта Бейкера была модифицирована (учтено влияние диаметра, скоростей и теплофизических свойств фаз): Говьер и Омер (1962 г.), Скот (1963 г.), Суо и Гриффит (1964 г.), Мандхейн (1974 г.), Барнеа и др. (1983 г.), Браунер и Марон (1992 г.), Табатабай и Фагри (2001 г.) [5-7]. Карты Бейкера, Мандхейна, Табатабая и Фагри использовались для адиабатных и паро-конденсатных потоков (в т. ч. хладонов), но даже скорректированные критерии отображали незначительные изменения границ режимов течений при изменении диаметров труб и теплофизических свойств веществ. Основным и общим недостатком этих карт является визуальное определение вида и границ течений на основании видео- и фотоматериалов – субъективная оценка отдельного автора. Кроме того, использование таких карт для определения границ режимов течения паро-конденсатных потоков некорректно, потому что при их построении не учтено влияние скрытой теплоты парообразования.

Солимен и Эйзер (1971 г.) впервые создали экспериментальную карту режимов течения при конденсации R12 ($t_s=30^{\circ}\text{C}$) внутри горизонтальной медной трубы с внутренним диаметром 12,7мм, по которой можно определить дисперсный, кольцевой, полукольцевой, волнистый, снарядный и пробочный режимы. Дополнительно было определено три переходных режима: кольцевой-волнистый, полукольцевой-волнистый и дисперсно-кольцевой [6, 8]. Данная карта применима для пароконденсационных машин с маслоотделителями (иначе, происходит засорение смазочным маслом теплообменных поверхностей, и как следствие, снижение коэффициента теплоотдачи), но не была широко использована из-за узкого диапазона исследования режимных параметров.

Тайтель и Даклер (1976 г.) были первыми исследователями, которые для построения карты режимов течения адиабатных потоков (воздух-вода, природный газ-нефть) применили теоретический анализ одномерных уравнений сохранения импульсов обеих фаз для базового – стратифицированного режима [9]. В общем, карта Тайтеля и Даклера построена для таких режимов: стратифицированный гладкий, стратифицированный волновой, кольцевой, перемежающийся поток (снарядный и пробочный) и пузырьковый, из-за чего ее применяли и для паро-конденсатных потоков. При разделении режимов авторы [9] полагали, что каждый переход от одного режима течения к другому зависит от отдельного набора конкурирующих сил, поэтому не стоит ожидать, что одним параметром или набором координат можно достоверно определить все границы режимов течений. В современных аналитических работах [10, 11] авторы придерживаются такого же мнения. Разработанные Тайтелем и Даклером критерии переходов базируются на физических явлениях, которые харак-

терны для указанных потоков без использования каких либо эмпирических данных. В работе [9] авторами постулируется, что переход от стратифицированного к перемежающему или дисперсно-кольцевому режиму осуществляется тогда, когда волны на поверхности раздела фаз становятся неустойчивыми: над гребнями жидкости скорость газа увеличивается и, в соответствии уравнению Бернулли, давление снижается, вследствие чего возникает аэродинамический «подсос», который пытается увеличить отклонение поверхности конденсатного ручья от начального невозбужденного состояния. На основании такого аргумента был разработан критерий перехода на конечные волны за счет расширения теории Кельвина-Гельмгольца. Итак, от стратифицированного потока будет развиваться перемежающийся или дисперсно-кольцевой поток, в зависимости от уровня жидкости в стратифицированном равновесном потоке. Тайтель и Даклер предложили, что переход между перемежающим и кольцевым потоками происходит тогда, когда равновесный уровень жидкости в трубе выше осевой линии. Переход от стратифицированного гладкого к стратифицированному волновому потоку происходит тогда, когда скорость газа является достаточной, чтобы вызвать волны на поверхности раздела фаз, но меньше за ту скорость, при которой происходит переход к перемежающему или дисперсно-кольцевому потоку. Также, они смоделировали переход от перемежающегося к дисперсно-пузырьковому режиму течения на основании баланса сил, которые действуют на пузырек: турбулентной силы флуктуации, которая ее разрушает, и силы плавучести. В итоге, авторами [9] использовано пять безразмерных параметров для определения переходов (границ режимов) на общей карте режимов течения. Недостатками такой карты являются: 1) не учет сил поверхностного натяжения; 2) не учет теплоты парообразования.

За период 1973-1987 годы среди работ, посвященных созданию карты режимов течения при конденсации хладонов внутри гладкой горизонтальной трубы, наиболее цитируемые проанализированы в таблице 1. Разработанные методы идентификации и построения карт режимов течения могут быть разделены на три группы: визуальное наблюдение границ раздела фаз; идентификация режимов по осредненным характеристикам потока и диагностирование режимов по статистическим измерениям [6]. Общие недостатки рассмотренных карт такие: 1) визуальное определение вида и границ течений на основании видео- и фотоматериалов, полученных на различных конструкциях опытных участков; 2) каждый коллектив исследователей вводил новые названия режимов течения и разрабатывал собственную карту.

С начала 1980-х годов мировая общественность обратила внимание на экологические проблемы: усиления парникового эффекта (1980 г.) и разрушения стратосферного озона хладами ХФУ и ГХФУ групп (Венская конвенция по защи-

Таблица 1 – Исследования режимов течения при конденсации холодильных агентов внутри гладкой горизонтальной трубы [5, 7]

Исследователь	Внутренний диаметр, мм	Вещество	Ориентация/ условия	Диапазон применения	Методы, основания, наблюдения
1	2	3	4	5	6
Тревисс и Россеноу (1973 г.)	8	R12	Горизонтальная конденсация	$100 < G < 990 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ $10 < t < 40,6^\circ \text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> – Наблюдались дисперсный, кольцевой, полукольцевой и снарядный режимы – Определение границ режимов течения по числу Фруда – При описании скорости пленки конденсата использовано профиль скорости фон Кармана
Бребер (1980 г.)	4,8; 8,0; 12,7; 14,5; 15,9; 16,0; 22,0; 25,4; 50,8	R11, R12, R113, пар H ₂ O, n-пентан	Горизонтальная конденсация	$108,2 < P < 1250 \text{ кПа}$ $17,6 < G < 990 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	<ul style="list-style-type: none"> – На основании карты Тайтеля и Даклера получено критерии для определения границ режимов – Критерии построены на основании отношения массовых сил к силам гравитации – Вся карта поделена вертикальными и горизонтальными линиями – удобна в использовании – Определены переходные области, между режимами осуществляются резкие переходы
Сардесай (1981 г.)	24,4	R113, пар H ₂ O, пропан, метанол, n-пентан	Горизонтальная конденсация	—	<ul style="list-style-type: none"> – Исследовано кольцевой-стратифицированный/волновой переход – Как основной критерий перехода для кольцевой-стратифицированный/волновой использовано модифицированный критерий Тайтеля и Даклера
Тандон (1985 г.)	4,8; 8,0; 12,7; 15,9	R12, R22, R113	Конденсация	$0,01 < J^*_G < 20$ $0,001 < (1-\varphi)/\varphi < 3$	<ul style="list-style-type: none"> – Простые критерии переходов, хорошее согласование с данными для кольцевого, полукольцевого и волнового режимов
Солиман (1986 г.)	4,8; 8,0; 12,7; 13,4; 15,9	R12, R113, пар H ₂ O	Конденсация	$27,6 < t < 110^\circ \text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> – Для перехода кольцевой-волновой использовано число Фруда, которое определено по данным из разных источников – Разработано критерий туманно-кольцевого потока – модифицированное число Вебера
Хашизум (1987 г.)	10	R12, R22	Горизонтальная конденсация	$570 < P < 1960 \text{ кПа}$	<ul style="list-style-type: none"> – За основание карты режимов для хладонов использовано карту адиабатных потоков – Разработанная карта пригодна лишь для R12, R22

те озонового слоя 1985 г.). После этого, корпорацией Дюпонт (США) на замену традиционным хладагмам были специально разработаны альтернативные [12], которые имеют низкие значения потенциалов глобального потепления (GWP) и разрушения озонового слоя (ODP), к тому же, новые хладагмы близкие по значениям теплофизических свойств к замещаемым. Следующими важными шагами в решении проблемы глобального потепления стало подписание индустриальными странами ряда международных соглашений – Монреальский протокол (1987 г.), в последующем с рядом поправок и дополнений, а с подписанием Киотского протокола (1997 г.) странами участниками регламентируется выброс парниковых газов. В настоящее время в странах Евросоюза введено ограничение на использование озонобезопасных хладагмов с $GWP > 1500$.

Рассматривая вопрос создания карты режимов течения при конденсации хладагмов внутри горизонтальной трубы, следует обратить внимание на тот факт, что Штайнер (1993 г.), создавая карту режимов при кипении хладагмов R12 и R22 внутри

горизонтальной трубы, впервые объединил теоретический подход [9] с собственными экспериментальными данными [13]. Созданная карта включает стратифицированный (S), стратифицированно-волновой (SW), перемежающийся (I), кольцевой (A) и туманный (MF) гидродинамические режимы течения. Не смотря на то, что карты [9] и [13] получены при разных исходных данных, их вид в координатах G - x (массовая скорость – степень сухости) практически идентичный (рис. 1, 2). Со временем, Катан, Цюрхер, Том и Фаврат (1998 г., 1999 г., 2002 г.) уточняли карту Штайнера, но заключительная версия карты режимов при кипении хладагмов в трубах Тома и Эль Хаджала (2003 г.) до настоящего времени остается без изменений [15].

Из множества работ по созданию карты режимов при конденсации озонобезопасных хладагмов без примесей смазочных масел (современные маслоотделители Bitzer, Henry и Copeland имеют эффективность 99,9%), наиболее цитируемые в литературе, проанализированы в таблице 2.



Рисунок 1 – Карта Тайтеля и Даклера [14]

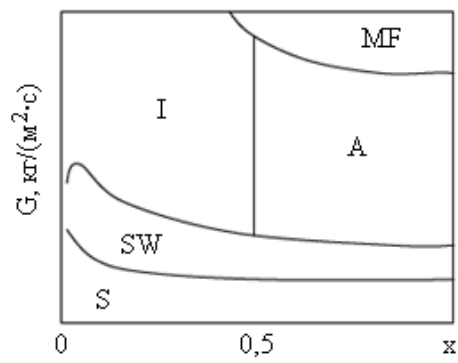


Рисунок 2 – Карта Штайнера [13]

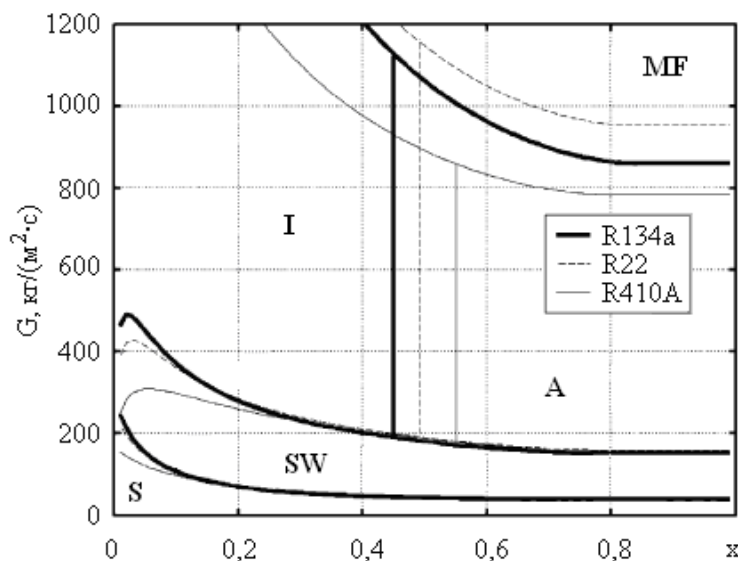


Рисунок 3 – Карта Эль Хаджала, Тома и Каваллини [16]

Таблица 2 – Исследования режимов течения при конденсации озонобезопасных хладонов внутри гладкой горизонтальной трубы [5, 13, 16]

Исследователь	Внутренний диаметр, мм	Вещество	Ориентация/ условия	Диапазон применения	Методы, основания, наблюдения
1	2	3	4	5	6
Ванг (1997 г.)	6,5	R22, R134a, R407C	Горизонтальная конденсация	$50 < G < 700 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ $t = 2; 6; 20^\circ\text{C}$	– При низких G – перемежающийся и стратифицированный режимы; при высоких G – кольцевой – Согласование с модифицированной картой Бейкера
Добсон и Чато (1998 г.)	3,14; 4,6; 7,04	R12, R134a, R22, R32/R125	Горизонтальная конденсация	$25 < G < 800 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ $35 < t < 60^\circ\text{C}$	– После модификации координатных осей хорошее согласование с картой Мандхейна – В основном рассмотрено отличие между потоками с доминированием массовых и гравитационных сил – Критерии перехода базируются на модифицированных Солиманом числах Фруда и Вебера, и массовом потоке
Каваллини (2002 г.)	8	R134a, R22, R125, R32, R236ea, R407C, R410A	Горизонтальная конденсация	$30 < t < 50^\circ\text{C}$ $100 < G < 750 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$	– Критерии переходов похожи на критерии Бребера для главных режимов: кольцевой, волновой, стратифицированный, снрядный – Рекомендации Коски и Стауба - модель для кольцевого потока
Ель Хаджал, Том, Каваллини (2003 г.) [16]	$3,14 < d < 21,4$	R402A, R404A, R407C, R410A, R502, NH ₄ , (всего 20)	Горизонтальная конденсация	$16 < G < 1532 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ $0,02 < P/P_{\text{кр}} < 0,8$ (что соответствует $23,1 < t < 65,2^\circ\text{C}$) $76 < (We/Fr)_p < 884$	– Карта разработана в координатах G -х для таких режимов: стратифицированный, стратифицированно-волновой, перемежающийся, кольцевой, туманный, пузырьковый – Для карты использовано среднюю логарифмическую модель истинного объемного паросодержания – Общее количество точек в базе данных составляет 2771, из литературных источников использовано 425 точек
Джассим, Ньюел, Чато (2006 г.) [13]	3,14; 7,04; 8,915; 9,576	R11, R12, R22, R134a, R410A, R32/R125 (60/40%) по массе	Горизонтальная конденсация	$24 < G < 902 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ $24,9 < t < 46,4^\circ\text{C}$	– Изначально метод был разработан для микроканалов – Используются основные режимы: стратифицированный, перемежающийся, кольцевой – Принципиально новый подход построения карты режимов, в котором использовано «временной параметр наблюдения» за соответствующим режимом течения – Общее количество точек в базе данных составляет 772, из литературных источников подобных исследований – 740

На основании разработанных карт режимов при кипении хладонов внутри горизонтальной трубы ученые Эль Хаджал, Том и Каваллини (2003 г.) разработали карту режимов при конденсации однокомпонентных, азеотропных и зеотропных хладонов, углеводородов, NH_4 и CO_2 внутри гладкой горизонтальной трубы (рис. 3, табл. 2). Комплексная методика определения режима течения построена так, что для заданных вещества, G , x , d (внутренний диаметр) и q (удельная плотность теплового потока или разницы температур насыщения и стенки) рассчитывается полная карта режимов течения, по которой за известными координатами G и x определяют режим течения. Так же, они выполнили сравнительный анализ собственной карты с наиболее распространенными [16].

Либенберг (2005 г.), используя метод Хаббарда и Даклера для исследования и идентификации режимов течений пароконденсатного потока хладонов в зависимости от спектра частоты колебания давления (единственный высококачественный метод за всю историю исследований течений двухфазного потока, при котором не возникает дополнительных возмущений исследуемого режима) проверил карту [16] для гладкой горизонтальной трубы на веществах R22, R134a, R407C (рис. 4). Из рис. 3-4 видно, что в независимых научных лабораториях разных стран получены одинаковые результаты по гидродинамике двухфазного потока. Кроме того, Либенберг, разработал карту режимов при конденсации внутри горизонтальных труб со спиральным и шевронным микроорезрением внутренней поверхности (высота ребра около 0,2 мм). На основании собственных исследований он уточнил термины «ламинарной пленочной конденсации» и «вынужденной конвективной конденсации», а также разработал классификацию с детальным описанием режимов течения двухфазного потока при конденсации хладонов внутри горизонтальной трубы [17].

Принципиально новый подход для построения карты режимов при конденсации в трубе, который сначала был разработан для микроканалов,

предложили Джассим, Ньюел и Чато (2006 г.): при заданных условиях течения с изменением $0 < x < 1$ они определяли доли времени F существования основных режимов (табл. 2). Созданная карта в координатах F - x позволяет определить по соответствующим методикам истинное удельное паросохранение и локальный коэффициент теплоотдачи по длине трубы [13]. Недостаток карты – необходимость экспериментального корректирования границ режимов течения при изменении вещества, диаметра трубы, массовой скорости потока и температуры насыщения.

Исаченко (1977 г.) и Гогонин (2004 г.) отмечают, что ученые СССР и стран СНГ рассматривают при условии попутного течения пара и жидкости при конденсации пара без неконденсированных примесей такие основные режимы течения пленки: ламинарный, волновой и турбулентный. Для каждого режима существуют субрежимы: при доминировании влияния сил тяжести, при сравнительном влиянии сил тяжести и сил межфазного трения, при доминировании сил межфазного трения, но в настоящее время не определены достоверные значения параметров, при которых происходит смена одного режима другим [18, 19].

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее «удачная» карта режимов течений для адиабатных потоков – карта Тайтеля и Даклера (1976 г.). Разработанные на основании физических явлений пять критериев переходов режимов течений могут быть заменены координатами G и x , что существенно упрощает вид и использование данной карты. Принципы создания критериев переходов Тайтелем и Даклером использованы при обработке экспериментальных данных Штайнером (1993 г.), вследствие чего, разработана G - x карта режимов «S», «SW», «I», «A» «MF» при кипении хладонов внутри горизонтальной трубы. После экспериментальных уточнений авторами [15] карты Штайнера, карта Тома и Эль Хаджала (2003 г.) является неизменной до настоящего времени.

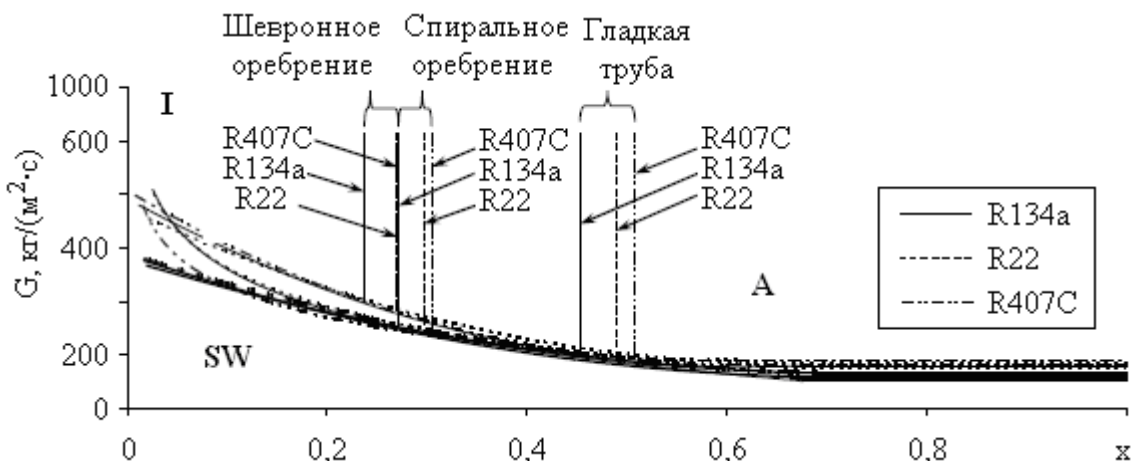


Рисунок 4 – Карта Либенберга [17]

Созданная Эль Хаджалом, Томом и Каваллини (2003 г.) G-x карта «S», «SW», «L», «A» «MF» режимов при конденсации хладонов внутри гладкой горизонтальной трубы (аналогично работе Штайнера), экспериментально подтверждена Либенбергом (2005 г.), поэтому рекомендуется ее использование для выполнения инженерных расчетов конденсаторов пароконденсационных ХУ и ТН (с маслоотделителем).

ЛИТЕРАТУРА

1. Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И., Сакун И.А., Тимофеевский Л.С. Холодильные машины. – СПб.: Политехника, 1997. – 992 с.
2. Доссат Р. Дж., Хоран Т. Дж. Основы холодильной техники. – М.: Техносфера, 2008. – 824 с.
3. Морозюк Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. – Одесса: Студия «Негоциант», 2006. – 712 с.
4. Бабакин Б.С., Стефанчук В.И., Ковтунов Е.Е. Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе. – М.: Колос, 2000. – 160 с.
5. Kandlikar S.G., Garimella S., Li D., Colin S., King M.R. Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels. - Amsterdam: Elsevier, 2006. – 450 p.
6. Кректунов О.П., Савус А.С. Процессы конденсации и конденсаторы масложирового производства. – СПб.: АОТ «НПО ЦКТИ», 1998. – 495 с.
7. Ghiaasiaan M. S. Two-phase flow, boiling and condensation in conventional and miniature systems. – New York, Cambridge university press, 2008. – 613p.
8. Soliman H.M., Azer N.Z. Flow patterns during condensation inside a horizontal tube // ASHRAE Trans. – Vol.77. – 1971. – pp. 210-224.
9. Taitel Y., Dukler A.E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizon-

tal gas-liquid flow // AIChE Journal. – Vol. 22, No. 1. – 1976. – pp. 47-55.

10. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем: учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 384 с.
11. Taitel Y. Flow pattern transition in two-phase flow // Proc. of 9-th Int. Heat Transfer Conf. Jerusalem. – 1990. – Vol. 1. – pp. 237-254.
12. ASHRAE. 2001. ASHRAE Fundamentals Handbook, Chapter 19.
13. Jassim E.W., Newell T. A., Chato J. C. Probabilistic Flow Regime Map modeling of two-phase Flow. – Illinois, 2006. – P. 124. – (ACRC TR-248).
14. Smit F. J. Condensing coefficients of the refrigerant mixture R-22/R-142b in smooth tubes and during enhanced heat transfer configurations [Электронный ресурс] : diss. ... DIng / Smit Floris Jakobus. – Johannesburg, 2005. – 64 p. – (etd-03012005-111232).
15. Thome J. R., El Hajal J. Two-phase flow pattern map for evaporation in horizontal tubes: latest version // Heat transfer Engineering. – Vol. 22, No. 6. – 2003. – pp. 3-10.
16. El Hajal J., Thome J.R., Cavallini A. Condensation in horizontal tubes, part 1: two-phase flow pattern map // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2003. – Vol. 46. – P. 3349–3363.
17. Liebenberg L. A unified prediction method for smooth and micro-fin tube condensation performance [Электронный ресурс] : diss. ... DIng / Liebenberg Leon. – Johannesburg, 2005. – 240 p. – (etd-05302005-115638).
18. Исаченко В. П. Теплообмен при конденсации / Исаченко В. П. – М.: Энергия, 1977. – 240 с.
19. Гогонин И. И. Теплообмен при конденсации движущегося пара внутри вертикальных труб / Гогонин И. И. // Инженерно-физический журнал. – 2004. – Том 77, №2. – С. 167–180.

A.I. Deyneko

Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Science,
2a Zhelyabova str., Kyiv, 03057, Ukraine

REGIMES MAP OF FLOW DURING REFRIGERANT CONDENSATION INSIDE SMOOTH HORIZONTAL TUBES: STUDIES REVIEW

The studies review on the hydrodynamic flow regimes of two-phase refrigerant flow inside smooth horizontal tubes is provided in this paper. For engineering calculations of vapor compression RU and TP (with oil separator) condensers is recommended the El Hajal-Thome-Cavallini map utilization.

Keywords: Refrigerant – Condensation – Two-phase flow – Horizontal tube – Regime map – Regime flow.

REFERENCES

1. Baranenko A.V., Bukharin N.N., Pekarev V.I., Sakun I.A., Timofeevskiy L.S. Kholodil'nye mashiny. – СПб.: Politekhnik, 1997. – 992 s.

2. Dossat R. Dzh., Khoran T. Dzh. Osnovy kholodil'noy tekhniki. – М.: Tekhnosfera, 2008. – 824s.
3. Morozuyuk T. V. Teoriya kholodil'nykh mashin i teplovykh nasosov. – Odessa: Studiya «Negotsiant», 2006. – 712 s.

4. **Babakin B.S., Stefanchuk V.I., Kovtunov E.E.** Al'ternativnye khladagenty i servis kholodil'nykh sistem na ikh osnove. – M.: Kolos, 2000. – 160 s.
5. **Kandlikar S.G., Garimella S., Li D., Colin S., King M.R.** Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels. - Amsterdam: Elsevier, 2006. – 450 p.
6. **Krektunov O.P., Savus A.S.** Protsessy kondensatsii i kondensatory maslozhirovogo proizvodstva. – SPb.: AOOT «NPO TsKTI», 1998. – 495 s.
7. **Ghiaasiaan M. S.** Two-phase flow, boiling and condensation in conventional and miniature systems. – New York, Cambridge university press, 2008. – 613p.
8. **Soliman H.M., Azer N.Z.** Flow patterns during condensation inside a horizontal tube // ASHRAE Trans. – Vol.77. – 1971. – pp. 210-224.
9. **Taitel Y., Dukler A.E.** A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow // AIChE Journal. – Vol. 22, No. 1. – 1976. – pp. 47-55.
10. **Labuntsov D.A., Yagov V.V.** Mekhanika dvukhfaznykh sistem: uchebnoe posobie dlya vuzov. – M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2007. – 384 s.
11. **Taitel Y.** Flow pattern transition in two-phase flow // Proc. of 9-th Int. Heat Transfer Conf. Jerusalem. – 1990. – Vol. 1. – pp. 237-254.
12. ASHRAE. 2001. ASHRAE Fundamentals Handbook, Chapter 19.
13. **Jassim E.W., Newell T. A., Chato J. C.** Probabilistic Flow Regime Map modeling of two-phase Flow. – Illinois, 2006. – P. 124. – (ACRC TR-248).
14. **Smit F. J.** Condensing coefficients of the refrigerant mixture R-22/R-142b in smooth tubes and during enhanced heat transfer configurations [Електронний ресурс] : diss. ... DIng / Smit Floris Jakobus. – Johannesburg, 2005. – 64 p. – (etd-03012005-111232).
15. **Thome J. R., El Hajal J.** Two-phase flow pattern map for evaporation in horizontal tubes: latest version // Heat transfer Engineering. – Vol. 22, No. 6. – 2003. – pp. 3-10.
16. **El Hajal J., Thome J.R., Cavallini A.** Condensation in horizontal tubes, part 1: two-phase flow pattern map // Int. J. Heat Mass Transfer. – 2003. – Vol. 46. – P. 3349–3363.
17. **Liebenberg L.** A unified prediction method for smooth and micro-fin tube condensation performance [Електронний ресурс] : diss. ... DIng / Liebenberg Leon. – Johannesburg, 2005. – 240 p. – (etd-05302005-115638).
18. **Isachenko V.P.** Teploobmen pri kondensatsii / Isachenko V. P. – M. : Energiya, 1977. – 240 s.
19. **Gogonin I.I.** Teploobmen pri kondensatsii dvizhushchegosya para vnutri vertikal'nykh trub / Gogonin I. I. // Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal. – 2004. – Tom 77, №2. – S. 167–180.

Получена в редакції 15.04.2014, прийнята к печати 29.04.2014