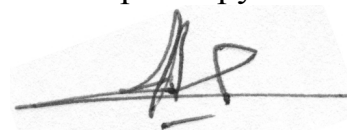


На правах рукописи



**КХАФАДЖИ ХАИДЕР КАСИМ АЛВАН**

**ТЕПЛОМАССОБМЕН В ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМАХ  
КОСВЕННО-ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Терехов Виктор Иванович**

Официальные оппоненты: **Попов Игорь Александрович**,  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ», профессор кафедры «Теплотехники и энергетического машиностроения»

**Цветков Николай Александрович**,  
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», заведующий кафедрой «Теплогазоснабжение»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита состоится « 14 » апреля 2017 г. в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.02 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (630073, г. Новосибирск, проспект К. Маркса, 20).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru)

Автореферат разослан «    » февраля 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.173.02  
доктор технических наук, профессор



А.В. Чичиндаев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Испарительное охлаждение является одним из наиболее простых и эффективных методов снижения температуры воздушных потоков и жидкостей. Его роль в энергетике чрезвычайно важна.

Одним из потенциальных и колоссальных источников энергии, который имеется практически в любой точке мира, является энергия влажного атмосферного воздуха, который состоит из смеси сухих газов и водяного пара. При адиабатическом испарении воды происходит понижение температуры газа. Температурная неравновесность в форме психрометрической разности температур сухого и мокрого термометров, может быть использована в качестве энергетического ресурса, как возобновляемого источника энергии.

В известной литературе различают два способа испарительного охлаждения в каналах: прямое и косвенно-испарительное. При прямом испарительном охлаждении, поток газа непосредственно контактирует с поверхностью воды. При этом происходит уменьшение температуры потока и увеличение его влагосодержания. Минимально достижимой является температура мокрого термометра ( $t_{М.Т.}$ ). При косвенно-испарительном охлаждении, поток рабочего воздуха протекает в вспомогательном канале, который контактирует с пленкой воды через разделяющую пластину. При этом влагосодержание в рабочем канале остается неизменным. Это является основным положительным фактором. Если использовать канал для предварительного охлаждения воздуха, то в этом случае теоретическим пределом охлаждения является температура точки росы. Такой процесс получил название цикла Майсоценко.

Результаты исследований данного класса задач изложены в большом числе экспериментальных и численных работ. Значительный вклад в решение этих проблем внесен отечественными исследователями [Лыков А.В., Леонтьев А.И., Волчков Э.П., Майсоценко В.С., Халатов А.А. и др.]. Отметим ряд фундаментальных работ, выполненных зарубежными учеными [Yan, Debbissi, Nasr, Haji, Duan, Cherif, Hsu, Anisimov, Duan, Lee и др.].

Имеющиеся теоретические подходы при моделировании и оптимизации теплогидравлических характеристик испарительных теплообменников основаны, как правило, на использовании балансовых методов. Первостепенное значение при решении таких задач приобретают численные методы исследования.

Таким образом, многие вопросы в силу многофакторности протекающих процессов остаются малоизученными. Сложная картина сопряженных процессов тепло - и массообмена делает практически невозможным использование аналитических методов и корреляционных соотношений для изучения течения в каналах при наличии фазовых переходов в инженерных расчетах и при проектировании теплообменных устройств.

Следовательно, поставленная в работе проблема является актуальной и она отвечает приоритетному направлению развития науки, технологий и техники РФ: «Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика».

### **Цели диссертационной работы:**

- Создание физико-математической модели, численного алгоритма для исследования процессов тепло - и массообмена влажного воздуха в каналах различных схем течений, с учетом изменения состава потока вследствие фазовых превращений (испарение, конденсация).
- Проведение систематического численного анализа течения и тепломассообмена в каналах с испарительным охлаждением в широком диапазоне чисел Рейнольдса ( $50 \div 1000$ ), температур ( $20 \div 40$  °С) и относительной влажности воздуха ( $0 \div 70$  %).
- Обобщение полученных результатов с целью получения объективной информации об основных теплофизических и теплогидравлических характеристиках потоков в широком диапазоне изменения исходных параметров и для различных схем течений.

### **Научная новизна работы:**

1. Впервые проведены численные исследования сопряженного тепломассообмена в каналах косвенно-испарительного аппарата в широком диапазоне чисел Рейнольдса ( $50 \div 1000$ ) при ламинарном режиме течения, температур на входе ( $20 \div 40$ °С) и относительной влажности ( $0 \div 70$ %) с учетом фазового перехода (испарение) для различных схем течений.

2. Изучены процессы испарительного охлаждения в одиночном канале. Показаны условия достижения оптимальных режимов в адиабатических условиях, при наличии теплового потока на поверхности и при ступенчатом подводе теплового потока.

3. Получены новые данные о процессах переноса в косвенно-испарительных ячейках прямо и – противоточных схем. Установлены условия достижения температуры точки росы полезного потока газа при различных входных параметрах, а также особенностей режимов работы таких охладителей в системе кондиционирования воздуха для сухого и влажного климата.

### **Практическая значимость работы заключается в следующем:**

1. Разработана методика моделирования процессов тепло- и массообмена при ламинарном течении влажного воздуха в плоских каналах для различных схем течения теплоносителей.

2. Выполнен анализ влияния исходных параметров на тепловую и влажностную эффективности тепломассообменных ячеек косвенно-испарительного типа.

3. Полученные результаты позволяют проводить оптимизационный анализ процессов тепломассопереноса.

4. Результаты работы используются в учебном процессе НГТУ кафедры «Техническая теплофизика» при преподавании дисциплин: тепломассообмен, основы теории пограничного слоя, вычислительная математика, тепловые машины.

Несомненную ценность представляют и разработанные компьютерные коды, алгоритмы численного исследования и программы, зарекомендовавшие себя как надежный метод изучения данной задачи, в большей части, заменяющий дорогостоящие опытные исследования.

### **Личный вклад автора.**

Работа выполнена под научным руководством д.т.н. Терехова В.И. Ему принадлежит постановка задачи, анализ и обсуждение результатов. К.т.н. Горбачев М.В. являлся научным консультантом по данной работе. Им проделана отладка программного комплекса и анализ циклов испарительного охлаждения. Основная часть работы автором выполнена самостоятельно. Им созданы тексты компьютерных программ, проведено тестирование и оценка адекватности, численные расчеты, обработка результатов и подготовка материалов к публикации. Все результаты, имеющие научную новизну и выносимые на защиту, получены автором лично.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Методика численного моделирования процессов тепло - и массообмена при течении влажного воздуха в каналах.

2. Результаты комплексного численного исследования тепломассообмена при ламинарном режиме течения влажного воздуха в каналах различных схем и при наличии фазового перехода на поверхности его стенок в широком диапазоне изменения исходных параметров.

3. Результаты численного исследования влияния исходных параметров и схем течения на тепловую и влажностную эффективность испарительных ячеек.

**Степень достоверности полученных результатов.** Все основные положения и выводы, сформулированные в диссертации, обеспечиваются корректностью постановок задач, использованием апробированных вычислительных алгоритмов и расчетных схем, а также сравнением результатов численного анализа с имеющимися в литературе экспериментальными и расчетными данными, а также сопоставлениями с результатами расчетов, основанных на использовании теории пограничного слоя.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на XXXI и XXXII Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2014, 2015); Всероссийской научно-технической конференции “Наука. Промышленность. Оборона” (Новосибирск, 2015); Всероссийском семинаре “Динамика многофазных сред” (Новосибирск, 2015); Всероссийской научной конференции «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий» (Новосибирск, 2015); 8<sup>th</sup> и 9<sup>th</sup> Int. Symp. Advances in Comp. Heat Transfer (ICHMT), (Istanbul, Turkey, 2015 и Cracow, Poland, 2016); II and IV International Seminar with elements of scientific school for young scientists (ISHM) (Novosibirsk, Russia, 2015, 2016); XV Минском международном форуме по тепло - и массообмену (Минск, Беларусь, 2016).

**Публикации.** По результатам исследований опубликовано 18 печатных работ, в том числе 4 научных статьи - в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, 14 работ, опубликованных в сборниках международных и российских конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 153 наименований, двух приложений, содержит 161 страницу основного текста, 84 рисунка, 2 таблицы.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность решения поставленной проблемы, сформулированы цель и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов исследования, приведены основные положения диссертации.

**В первой главе** проведен обзор и анализ научной литературы, посвященной методам экспериментального и численного исследования вынужденной конвекции в каналах для различных схем течений при наличии фазовых переходов. По представленным в обзоре данным, сделан вывод о том, что данной проблеме уделялось значительное внимание. Имеющиеся методы исследования, как правило, являются интегральными, возможности которых ограничены и они не в состоянии отразить всех особенностей сложного процесса тепломассообмена в испарительных ячейках. Слабо изученным является детальный анализ механизма обменных процессов в потоках с фазовыми превращениями (испарением) в системах теплообменных каналов для условий испарительного охлаждения.

На основании анализа современного состояния проблемы определены направления исследований и дается постановка задач.

**Вторая глава** посвящена вопросам моделирования процессов тепломассообмена в двухмерной постановке в каналах теплообменных ячеек испарительного типа. Простейшая испарительная ячейка представляет собой канал (Рисунок 1), ограниченный двумя пластинами, расстояние между которыми равно  $d$ . С наружной стороны пластины могут быть теплоизолированы ( $q_w = 0$ , режим адиабатического испарения) либо к поверхности подводится или отводится тепловой поток ( $q_w \neq 0$ , неадиабатическое испарение). Изнутри канала стенки по всей его длине считаются влажными. При этом толщина жидкой пленки считается бесконечно малой и на гидродинамику потока в канале и термическое сопротивление она влияния не оказывает. Теплоперенос вдоль стенок канала также не учитывался. Процесс течения двумерный, стационарный, режим течения – ламинарный. Лучистым теплообменом, вязкой диссипацией и эффектами Дюфо и Соре пренебрегалось.

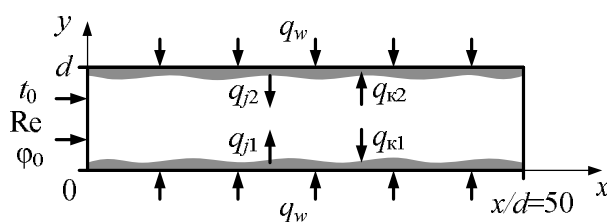


Рисунок 1 – Расчетная схема

Система полных уравнений Навье-Стокса, описывающих течение, тепло- и массообмен при испарении воды с учетом принятых допущений, состоит:

– уравнения неразрывности:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0; \quad (1)$$

– движения (вдоль осей  $x$  и  $y$ , соответственно):

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \quad u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right); \quad (2)$$

– энергии:

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho c_P} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{D}{c_P} (c_{Pv} - c_{Pa}) \left( \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial K}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial K}{\partial y} \right); \quad (3)$$

– диффузии:

$$u \frac{\partial K}{\partial x} + v \frac{\partial K}{\partial y} = D \left( \frac{\partial^2 K}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 K}{\partial y^2} \right). \quad (4)$$

При этом граничные условия записываются в виде:

– параметры воздуха на входе ( $x=0$ ) в канал постоянны:  $T = T_0$ ,  $u = u_0$ ,

$Re = Re_0 = 2u_0 d / \nu$ ,  $\varphi = \varphi_0$ , где  $\varphi$  – относительная влажность воздуха;

– на выходе из канала:  $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial K}{\partial x} = 0$ ;

– поперечная составляющая скорости пара определяется из уравнения баланса массы на проницаемой стенке:

$$v_w = \frac{-D}{1 - K_w} \frac{\partial K}{\partial y} \Big|_w;$$

– массовая концентрация пара на стенке, согласно закону Дальтона:

$$K_w = \frac{m_w / m_a}{P / P_H + m_w / m_a - 1},$$

где  $m_w=18$ ,  $m_a=29$  – молекулярные массы воды и воздуха соответственно.

Полученная в итоге система дифференциальных уравнений (1)–(4) совместно с граничными условиями решалась численно с использованием метода конечных объемов. Для связи скорости и давления использовался алгоритм SIMPLE. При дискретизации использовалась равномерная сетка, оптимальный размер которой составил 200x70 ячеек в продольном и поперечном направлениях, соответственно.

Результатами численного моделирования являлись основные параметры потока влажного воздуха:

– среднемассовая температура:  $T_m = \int_0^d \rho u T dy / \int_0^d \rho u dy$ ;

– среднemasсовая концентрация пара: 
$$K_m = \int_0^d \rho u K dy / \int_0^d \rho u dy,$$

а также профили скоростей, температур, концентраций компонентов, давлений, и распределений тепловых и массовых потоков по длине канала.

Тестовые сопоставления по теплообмену в плоском канале при отсутствии фазовых превращений показали хорошее соответствие между результатами настоящего расчета и данными работ [Shah и London], что свидетельствует об адекватности математической модели разработанной программы.

**В третьей главе** представлены результаты численных расчетов прямого испарительного охлаждения в одиночном канале (Рисунок 1). Изменение среднemasсовых параметров парогазовой смеси по длине канала при различных числах Рейнольдса показано на Рисунке 2,а,б. Исходя из графических данных, можно определить наибольшую длину канала, на длине которого осуществляется насыщение потока. Так при  $Re = 50$  насыщение наступает при  $x/d \sim 13$ , поэтому на оставшейся части канала тепломассообменных процессов не происходит и длина канала может быть сокращена до этого значения.

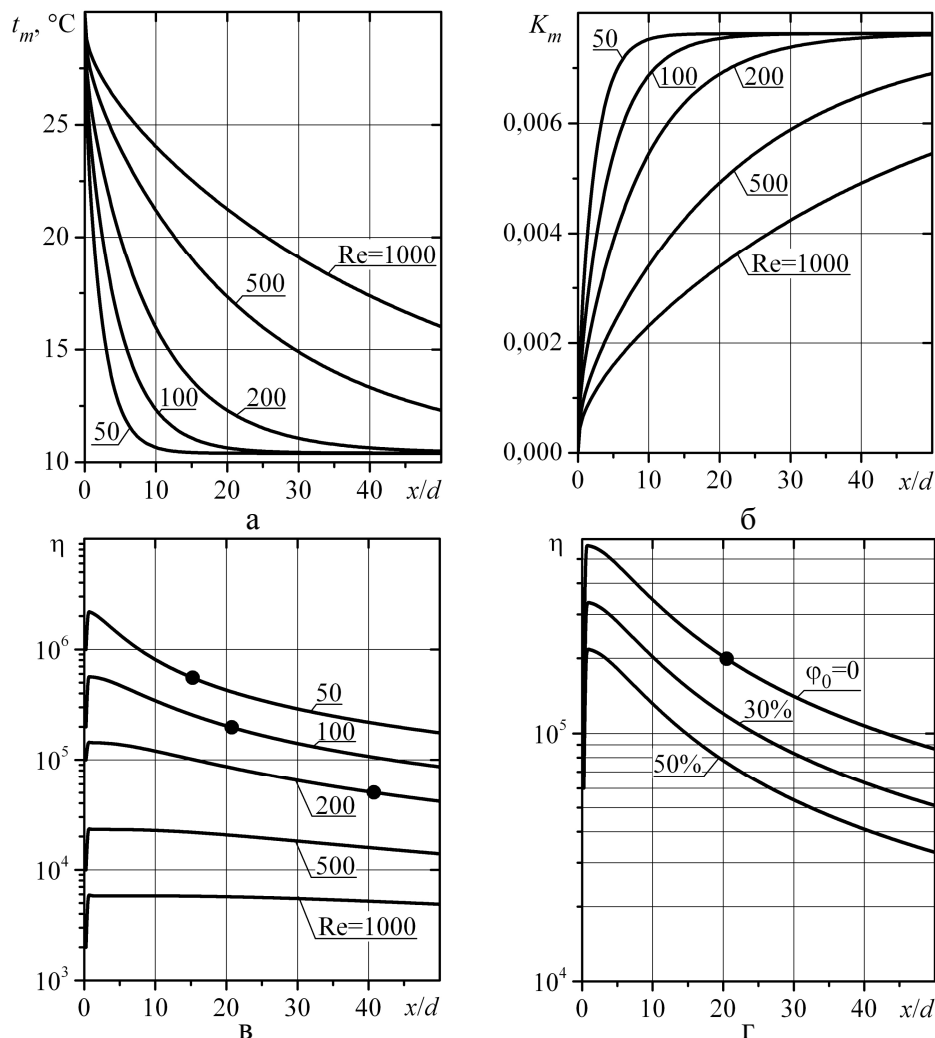


Рисунок 2 – Влияние исходных параметров на изменение среднemasсовой температуры (а), влажности (б) и теплогидравлической эффективности ( $q_w=0$ ):  
а,б,в –  $t_0=30^\circ\text{C}$ ,  $\phi_0=0$ ; г –  $Re=100$ ,  $t_0=30^\circ\text{C}$



При больших числах Рейнольдса ( $Re > 200$ ) для достижения режима насыщения требуются более протяженные каналы, что в свою очередь вызовет рост гидравлических потерь.

Для оценки характеристик теплообменных устройств используется параметр тепло-гидравлической эффективности, который представляет собой отношение холодопроизводительности испарительной ячейки ( $Q$ ) к затратам механической мощности на прокачку теплоносителя ( $Q_M$ ):  $\eta = Q/Q_M$ , где  $Q = c_P(t_0 - t_m)\rho_0 u_0$ , а  $Q_M = u_0 \Delta P$ .

Характер изменения параметра тепло-гидравлической эффективности по длине канала показан Рисунках 2, в, г. Видно, что параметр  $\eta$  достигает больших величин порядка  $10^4 - 10^6$ , что говорит в пользу высокой энергетической эффективности процесса испарительного охлаждения газа. При этом параметр эффективности значительно снижается по мере роста числа Рейнольдса. Важно отметить, что при всех числах Рейнольдса в начале канала эффективность достигает максимума, а затем, величина  $\eta$  постепенно снижается. Такое поведение параметра  $\eta$  обусловлено характером изменения коэффициентов теплообмена и трения по длине канала, а также местоположением точки перехода к режиму насыщения. На рисунке эти координаты отмечены точками. Расчеты показывают также (Рисунок 2, г), что увеличение влажности приводит к уменьшению теплогидравлической эффективности.

В ряде технологических процессов к испарительной ячейке может подводиться (или отводиться) дополнительный тепловой поток ( $q_w \neq 0$ ). Характер изменения среднемассовых температур при вариациях значений  $\bar{q}$  показан на Рисунке 3, а. В качестве масштаба в относительном тепловом потоке  $\bar{q} = q_w / q^*$  использовалась величина  $q^*$ , равная тепловому потоку при теплопереносе на стабилизированном участке плоского канала ( $Nu = 7,54$ ) при разности температур на входе для сухого и насыщенного воздуха.

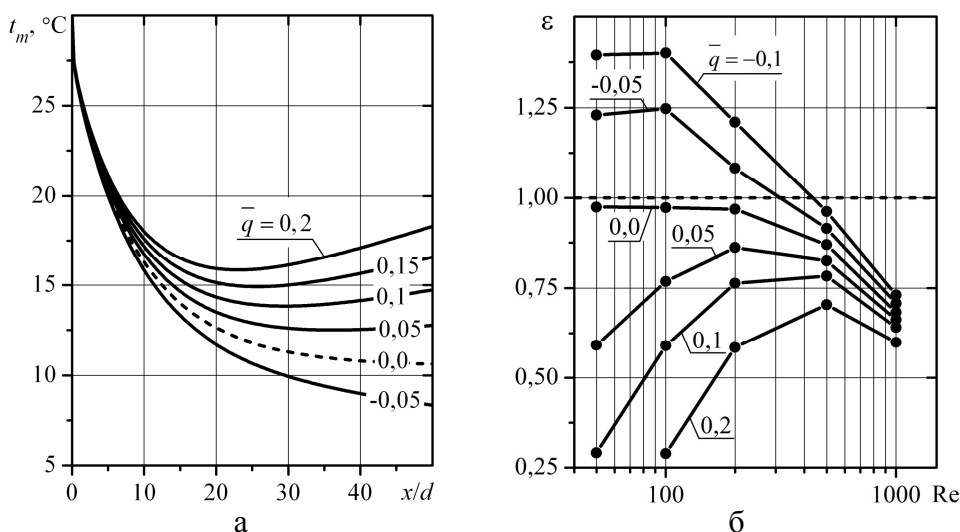


Рисунок 3 – Влияние дополнительного теплового потока на изменение среднемассовой температуры и степени охлаждения воздуха в канале:  $t_0=30^\circ\text{C}$ ,  $\phi_0=0$ ,  $Re=200$

Известно, что предельной температурой, до которой может быть охлажден газ при прямом испарительном охлаждении, является температура адиабатического насыщения  $t_{s0}$ . Максимальное влагосодержание газа  $K_{s0}$  при этом определяется условиями полного насыщения ( $\varphi=100\%$ ). Поэтому эффективность охлаждения газа в испарительной ячейке принято характеризовать тепловой  $\varepsilon$  и влажностной  $\psi$  эффективностями:

$$\varepsilon = \frac{t_0 - t_m}{t_0 - t_{s0}}, \quad \psi = \frac{K_m - K_0}{K_{s0} - K_0}. \quad (5)$$

Эти величины характеризуют степень охлаждения и увлажнения газа: при  $\varepsilon \rightarrow 0$  процесс охлаждения отсутствует, а  $\varepsilon \rightarrow 1$  достигается его охлаждение до стадии насыщения. Из Рисунка 3,б следует, что существует оптимум по числу  $Re$ , но в адиабатическом режиме ( $q_w = 0$ ) наибольшую эффективность испарение достигает при малых значениях числа Рейнольдса. Таким образом, в зависимости от величины дополнительного теплового потока, можно получить различные степени охлаждения воздуха.

В реальных испарительных устройствах зачастую влажные участки могут чередоваться с сухими (Рисунок 4,а), создавая тем самым периодические тепловые и диффузионные граничные условия на стенке. На Рисунке 4,б представлены поля температур и концентраций воздуха по тракту охлаждения.

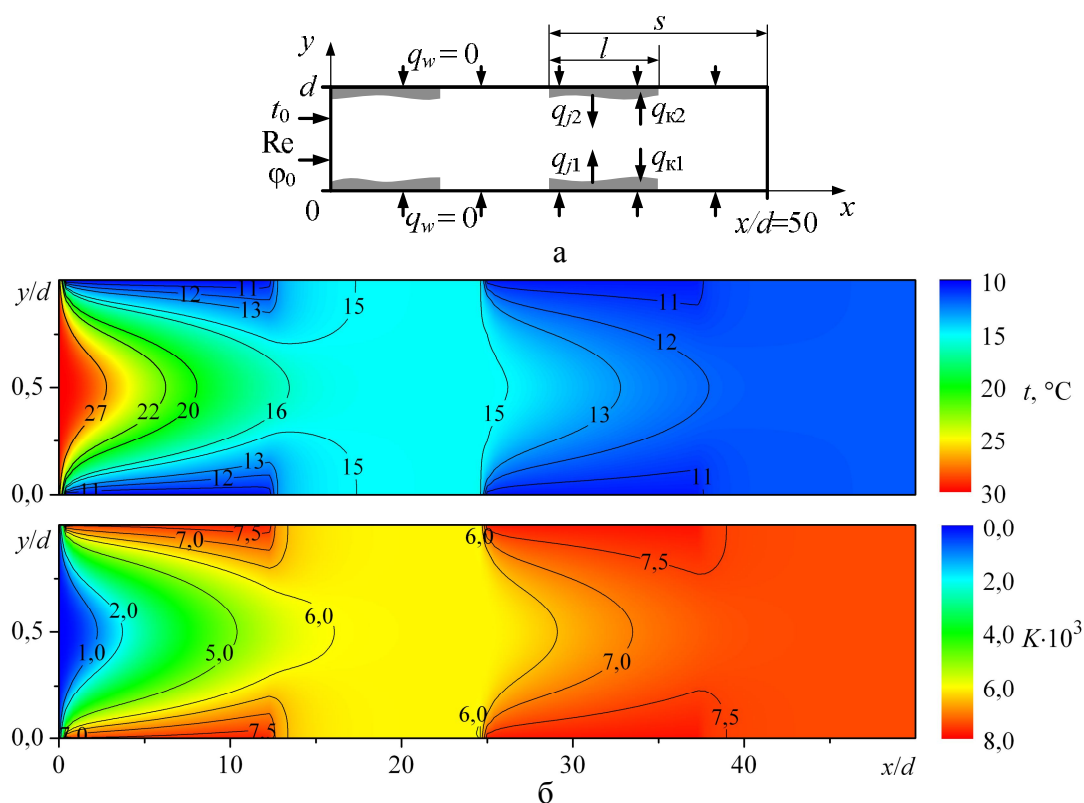


Рисунок 4 – Расчетная схема (а) и поля температур и концентраций (б):  
( $n=2, t_0=30^\circ C, Re=200, \varphi_0=0$ )

Распределение термогазодинамических параметров по длине канала при вариации числа увлажняемых участков ( $n$ ) и их длины ( $s/l$ ) при подаче на вход

потока сухого воздуха приведено на Рисунке 5,а,б,в. Увеличение числа участков и их протяженности приводит к более сильному эффекту охлаждения.

Изменение эффективности охлаждения газа для различной протяженности смоченного участка представлено на Рисунке 5,г. В случае  $s/l=0$  канал является полностью сухим, а при  $s/l=1$  – вся поверхность его стенок смочена. Увеличение длины смоченной поверхности ведет к более интенсивному испарению и, соответственно, к тепловой и влажностной эффективности паровоздушной смеси на выходе ячейки.

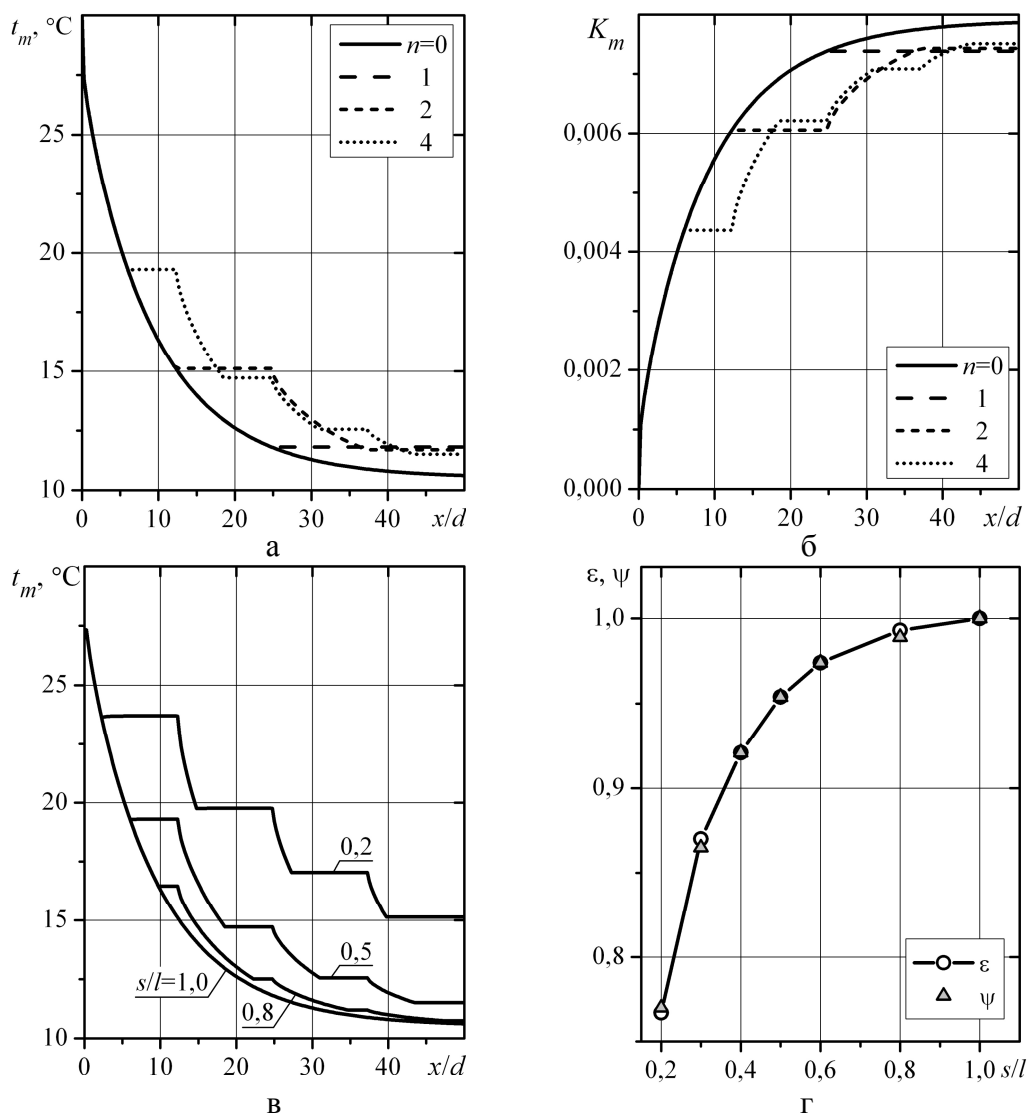


Рисунок 5 – Влияние числа смачиваемых участков и их протяженности на основные параметры потока и тепловую и влажностную эффективность:  
 а,б,в –  $t_0=30^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_0=0$ ,  $s/l=0,5$ ,  $Re=200$ ; г –  $t_0=30^\circ\text{C}$ ,  $Re=200$ ,  $\varphi_0=0$ ,  $n=4$

**В четвертой главе** изучаются схемы течения теплоносителей при косвенно-испарительном охлаждении. На Рисунке 6,а,б показаны расчетные схемы теплообменных ячеек косвенно-испарительного типа проточной и противоточной схем течений теплоносителей.

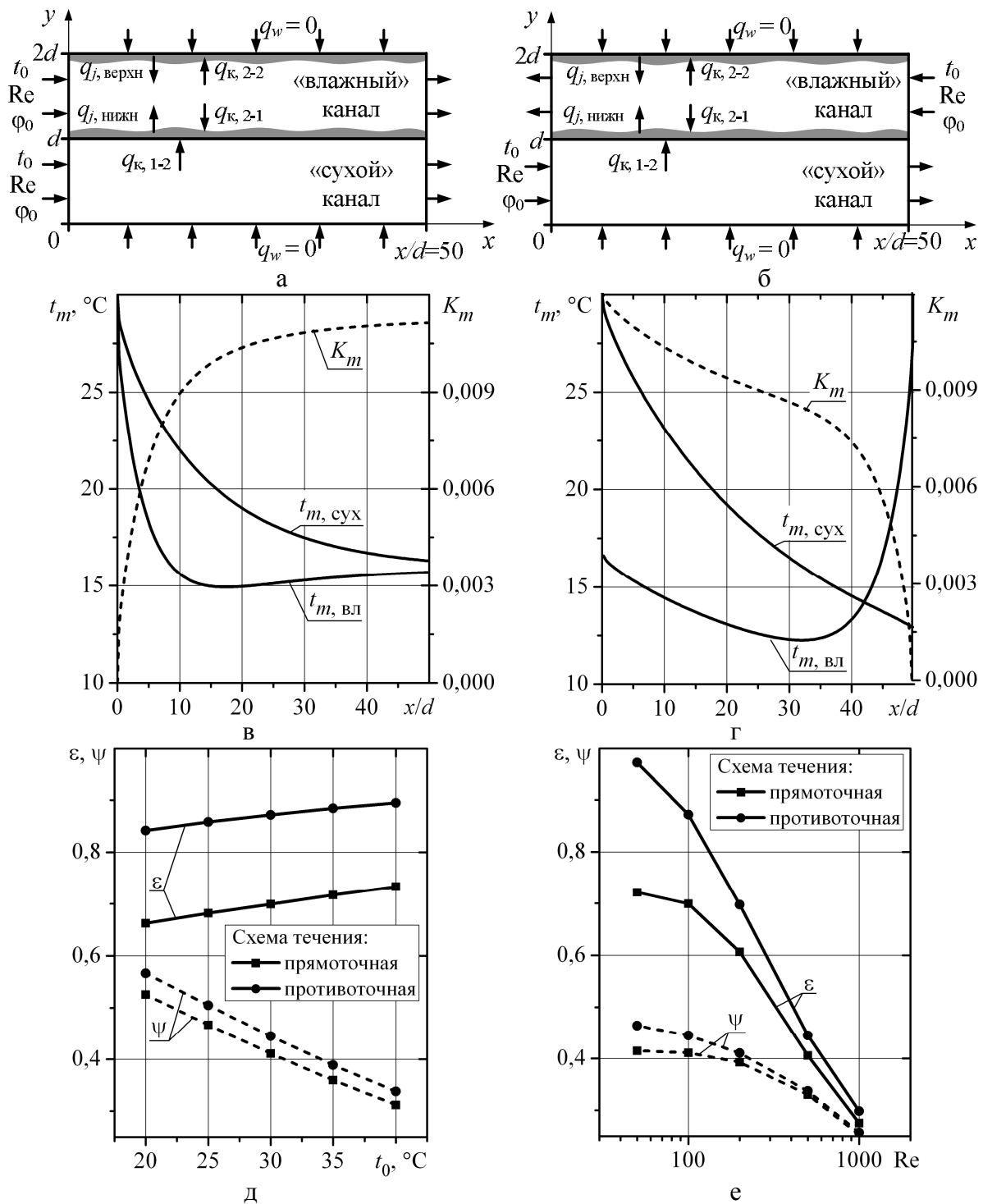


Рисунок 6 – Влияние параметров на входе на термодинамические характеристики теплообменных ячеек прямоточного (а,в) и противоточной (б,г) схем течения: в,г –  $t_0=30^\circ\text{C}$ ,  $Re = 200$ ,  $\phi_0=0$ ; д –  $Re = 200$ ,  $\phi_0=0$ ; е –  $t_0=30^\circ\text{C}$ ,  $\phi_0=0$ ;

В нижнем канале протекает рабочий («сухой») поток воздуха, а стенки верхнего канала («влажный») покрыты пленкой воды, в котором спутно (или встречно) движется влажный поток воздуха. В рабочем канале поток охлаждаемого воздуха передает явную теплоту через разделяющую стенку теплообменника испаряющейся пленке воды. Одновременно с этим поток во влажном канале понижает температуру за счет передачи теплоты на фазовый переход. При этом энтальпия и влагосодержание влажного потока воздуха увеличивает-

ся. Теоретическим пределом охлаждения потока рабочего воздуха для рассматриваемых схем, также как и в прямом цикле испарения, является достижение температуры мокрого термометра.

Распределение основных параметров для прямоточной и противоточной схем показаны на Рисунке 6, в, г. Видно, что среднемассовая температура воздуха в сухом канале приближается к значению температуры мокрого термометра. Причем изменение температуры по длине во влажном канале носит не монотонный характер и на некотором расстоянии от входа наблюдается ее минимум. Следует подчеркнуть, что теплообменные ячейки косвенно-испарительного типа целесообразно использовать не только в качестве охладителей, но и как увлажнители воздуха.

Сравнение значений тепловой и влажностной эффективности в испарительных ячейках приведено на Рисунке 6, д, е. Из представленных данных следует, что для противоточной схемы движения теплоносителей в испарительной ячейке интегральная тепловая и влажностная эффективности всегда выше, чем в прямоточной схеме. Следовательно, именно эта конструктивная схема наиболее целесообразна для использования в технических устройствах, в состав которых может быть включены рассматриваемые теплообменные ячейки.

Особенно сильное отличие между прямоточной и противоточной схемами течения наблюдается для параметра тепловой эффективности, а также при малых числах Рейнольдса. С ростом числа  $Re$  разница между схемами течения уменьшается (Рисунок 6, е), а тепловая и влажностная эффективности практически совпадают между собой.

**В пятой главе** рассмотрены вопросы гидродинамики и теплообмена в каналах косвенно-испарительных ячеек. Одним из распространенных способом организации течения теплоносителей в двухканальных испарительных ячейках является схема, известная в литературе, как *Bypass* (Рисунок 7, а), которая представляет собой комбинацию прямоточной и противоточной схем течений. Поток воздуха, протекая в сухом канале, охлаждается за счет контакта с обратной стороной влажного канала. Часть потока воздуха из сухого канала ( $m$ ) направляется во влажный. В этом случае температура воздуха, контактирующего с влажной стенкой, снижается, на что затрачивается скрытая теплота парообразования воды.

На Рисунке 7, б показано сравнение изменения среднемассовых температур *Bypass* и противоточной схем течения при вариациях отношений расходов  $m = G_{\text{вл}} / G_{\text{сух}}$ . Из Рисунка следует, что практически во всем интервале исходных параметров, рассматриваемая схема *Bypass* имеет более высокую эффективность, а температура воздуха в сухом канале принимает значения ниже температуры мокрого термометра. Недостатком такой схемы организации является уменьшение массового потока полезного потока сухого воздуха по сравнению с ранее рассмотренными двухканальными схемами.

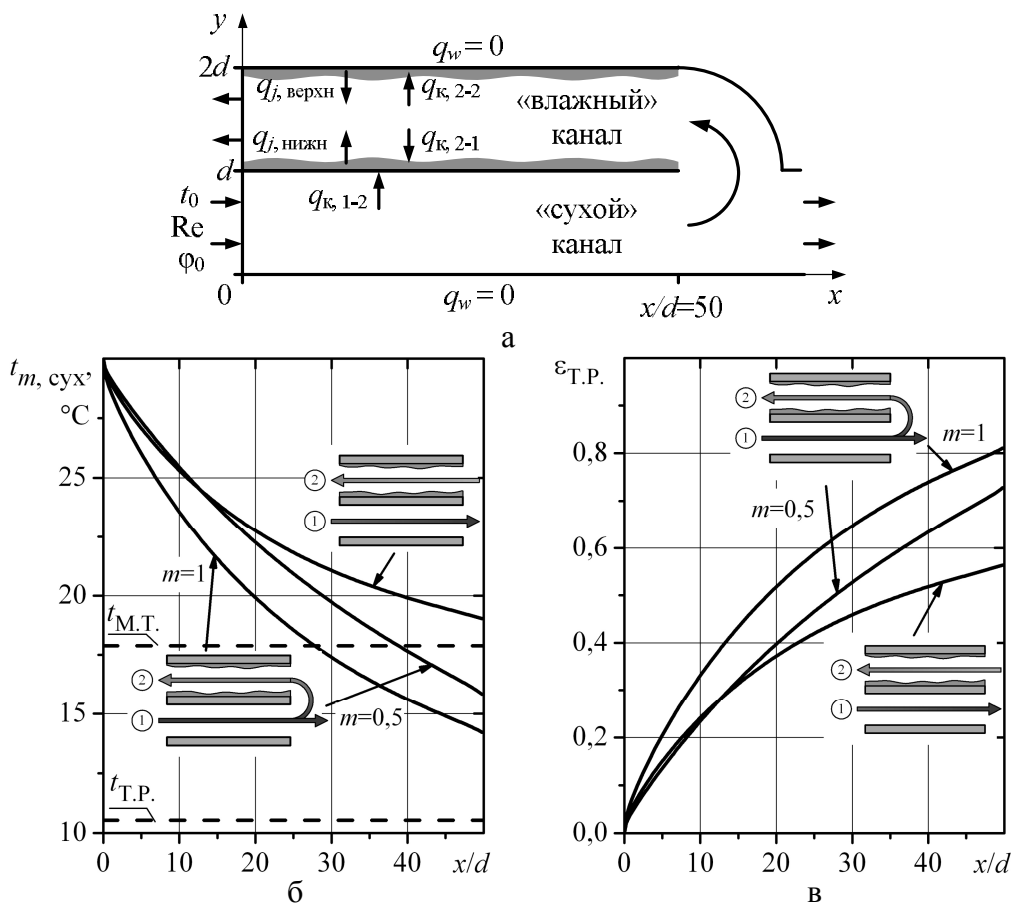


Рисунок 7 – Сравнение параметров для противоточной и *By-pass* схем течений:  $t_0=30^\circ\text{C}$ ,  $Re=100$ ,  $\phi_0=30\%$

Теоретическим пределом охлаждения потока воздуха в рабочем канале по схеме *By-pass* является достижение температуры «точки росы» ( $t_{T.P.}$ ). При этом влагосодержание в сухом канале остается неизменной. Таким образом, эффективность работы можно оценить с помощью коэффициента тепловой эффективности, рассчитанного по температуре «точки росы»:

$$\varepsilon_{T.P.} = \frac{t_0 - t_{m, \text{сух}}}{t_0 - t_{T.P.}}. \quad (6)$$

Графические зависимости изменения тепловой эффективности для косвенно-испарительной ячейки с перепуском потока показаны на Рисунке 7,в. Отсюда следует, что значения тепловой эффективности для схема *By-pass* заметно выше чем при противоточной подаче теплоносителей и кривые монотонно стремятся к единице.

Недостатки, присущие рассмотренным схемам испарительных циклов, возможно устранить с помощью «эшелонированного» захлаживания воздуха при предварительном его регенеративном охлаждении и последующей подачей во влажный канал. Расчетная схема такой испарительной ячейки показана на Рисунке 8. Данная схема теплообменного аппарата косвенно-испарительного типа известна как цикл Майсоценко (*M-cycle*). Процессы тепло- и массообмена, протекающие в таком аппарате, близки к термодинамически обратимым процессам, что позволяет получить максимальный эффект охлаж-



Re и  $t_0$ , что обусловлено опережающим ростом расхода газа через канал по сравнению с уменьшением разности температур воздуха на входе и выходе.

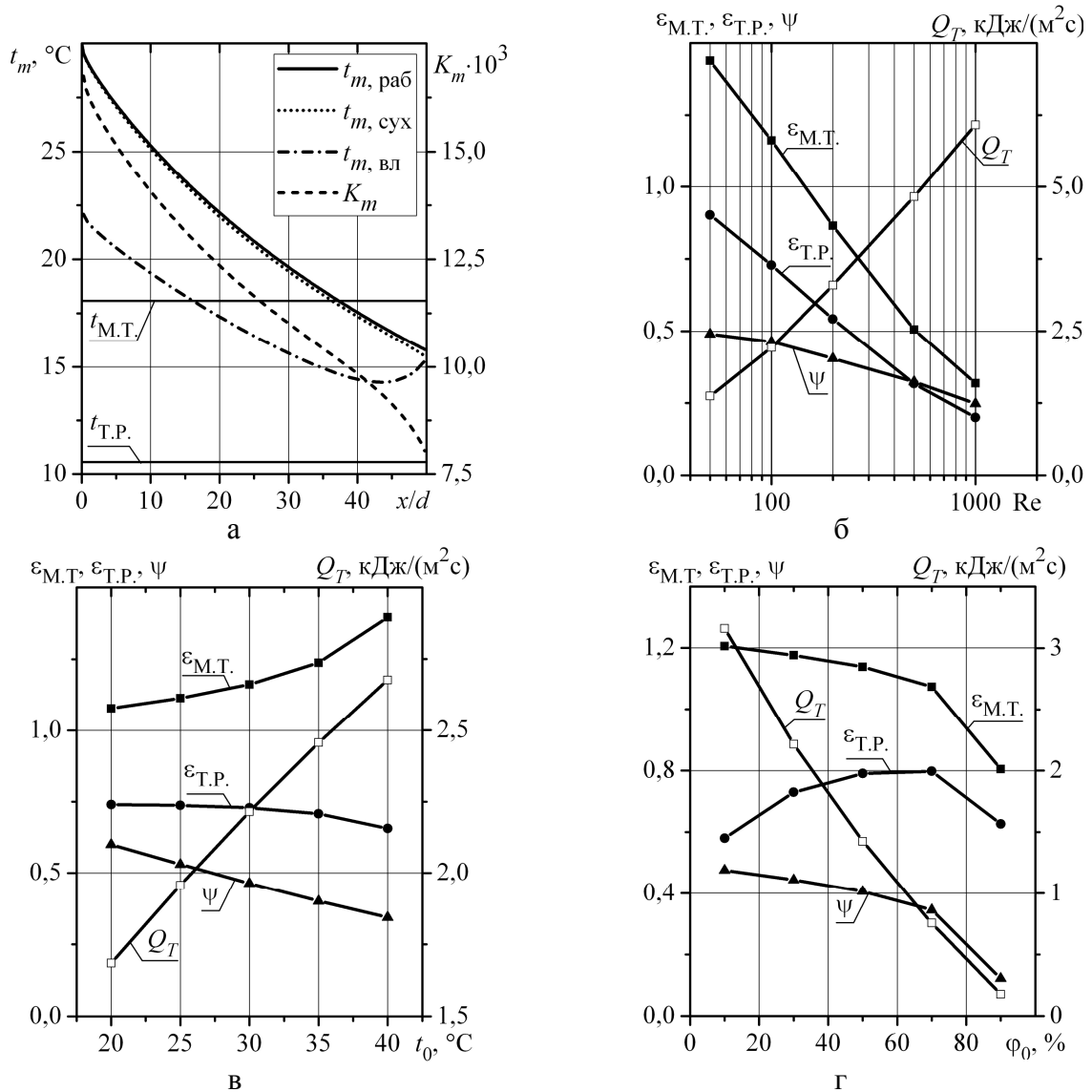


Рисунок 9 – Влияние начальных параметров воздуха на характеристики трехканальной ячейки косвенно-испарительного типа а –  $t_0=30^\circ\text{C}$ ,  $\text{Re}=100$ ,  $\phi_0=30\%$ ; б –  $t_0=30^\circ\text{C}$ ,  $\phi_0=30\%$ ; в –  $\text{Re}=100$ ,  $\phi_0=30\%$ ; г –  $t_0=30^\circ\text{C}$ ,  $\text{Re}=100$

Так как ячейка косвенно-испарительного типа состоит из каналов, в одном из которых происходит охлаждение (сухой или рабочий каналы), а в другом насыщение (влажный), то данный аппарат можно применять как для охлаждения потока воздуха, так и для его увлажнения. При этом эффективность работы теплообменного аппарата в качестве увлажнителя можно оценить с помощью параметра влажностной эффективности

$$\psi = \frac{K_m - K_{0, \text{вл}}}{K_T - K_{0, \text{вл}}}, \quad (7)$$

где  $K_{0, \text{вл}}$ ,  $K_m$  и  $K_T$  – массовая концентрация водяных паров на входе, в текущем сечении и насыщенного воздуха при температуре  $t_{0, \text{вл}}$ , соответственно.



Тепловая эффективность может быть определена по формуле (6) при использовании в качестве характерной температуры на выходе из сухого канала температура мокрого термометра. Если же в качестве масштаба использовать температуру точки росы, то тепловая эффективность испарительной ячейки

$$\varepsilon_{Т.Р.} = \frac{t_{0, раб} - t_{раб, вых}}{t_{0, раб} - t_{Т.Р.}} \quad (8)$$

В этом случае отражает степень отклонения выходных температур от их значения в точке росы.

Количественное изменение значений тепловой и влажностной эффективностей для косвенно-испарительного теплообменного аппарата приведено на Рисунке 9,б–г при вариациях параметров воздушного потока на входе. Из Рисунков следует, что с увеличением числа Рейнольдса и температуры газа на входе, тепловые и влажностные характеристики рассматриваемого аппарата имеют тенденцию к уменьшению соответствующих значений. Также необходимо отметить, что значения тепловой эффективности  $\varepsilon_{М.Т.}$  превышают единицу. Это говорит о том, что газ охлаждается ниже температуры мокрого термометра и тепловую эффективность косвенно-испарительных ячеек целесообразнее определять по температуре точки росы. Тепловая эффективность теплообменной ячейки косвенно-испарительного типа имеет большее значение, чем классический теплообменный аппарат (порядка 0,3 ÷ 0,4). Это делает применение таких теплообменных ячеек более конкурентно-способными, чем теплообменные аппараты без применения фазовых переходов. Основным недостатком такой схемы является резкое уменьшение холодопроизводительности при увеличении относительной влажности входного воздуха.

В этом случае для ряда специальных технологических процессов для охлаждения влажного воздуха могут быть использованы иные жидкости.

В работе проведена серия численных расчетов эффективности работы ячеек при использовании этанола в качестве испаряющейся жидкости. Расчеты проведены для схемы испарительной ячейки, представленной на Рисунке 8.

Результаты расчетов демонстрируются на Рисунке 10. Видно, что средне-массовая температура в канале значительно понижается, если в качестве рабочей жидкости использовать этанол, который имеет более низкую температуру адиабатического насыщения по сравнению с водой. Это приводит, соответственно, к значительному повышению степени охлаждения и, как это следует из Рисунка 10,б, параметр тепловой эффективности  $\varepsilon$  может в 2–3 раза превышать подобную величину при использовании для процесса испарения воды. При этом, как для воды, так и этанола, рост числа Рейнольдса приводит к снижению тепловой эффективности.

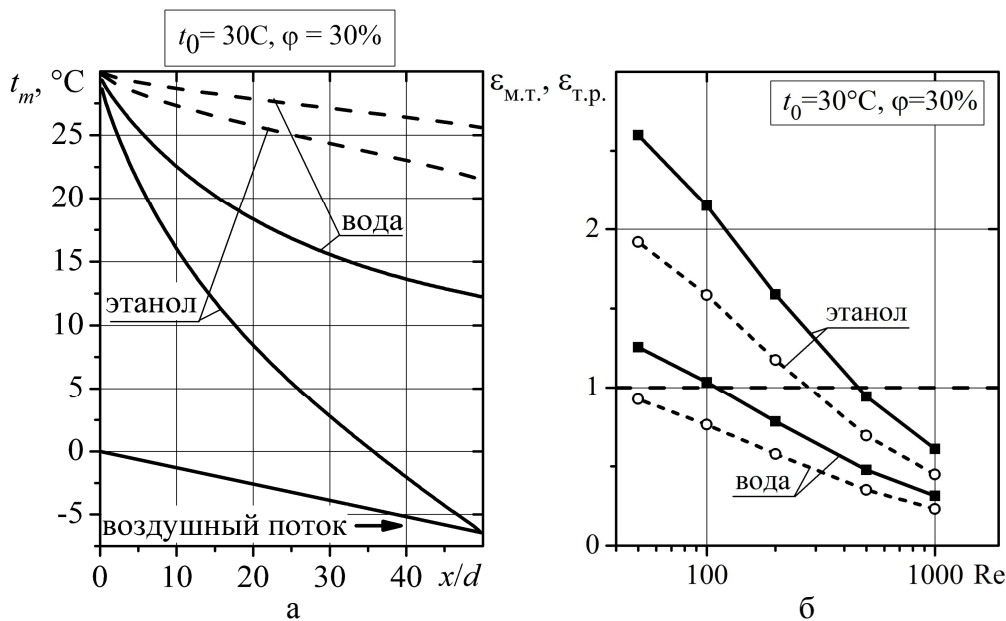


Рисунок 10 – Сравнение тепловой эффективности М-цикла при испарении воды и этанола: а – сплошные линии –  $Re = 50$ , пунктир –  $Re = 1000$ ; б – сплошные линии - мокрый термометр, пунктир-точка росы

Реальные теплообменные аппараты состоят, как правило, из набора большого числа чередующихся сухих и влажных каналов. Наиболее полное представление об особенностях тепломассообменных процессов в таких аппаратах может дать испарительная ячейка, состоящая, как минимум, из пяти параллельных, симметрично располагающихся сухих и влажных каналов (Рисунок 11,а). Изменение среднемассовых параметров по длине приведено на Рисунке 11,б. В данном аппарате можно получить температуры на выходе существенно ниже температуры мокрого термометра с приближением к предельному значению к температуре точки росы.

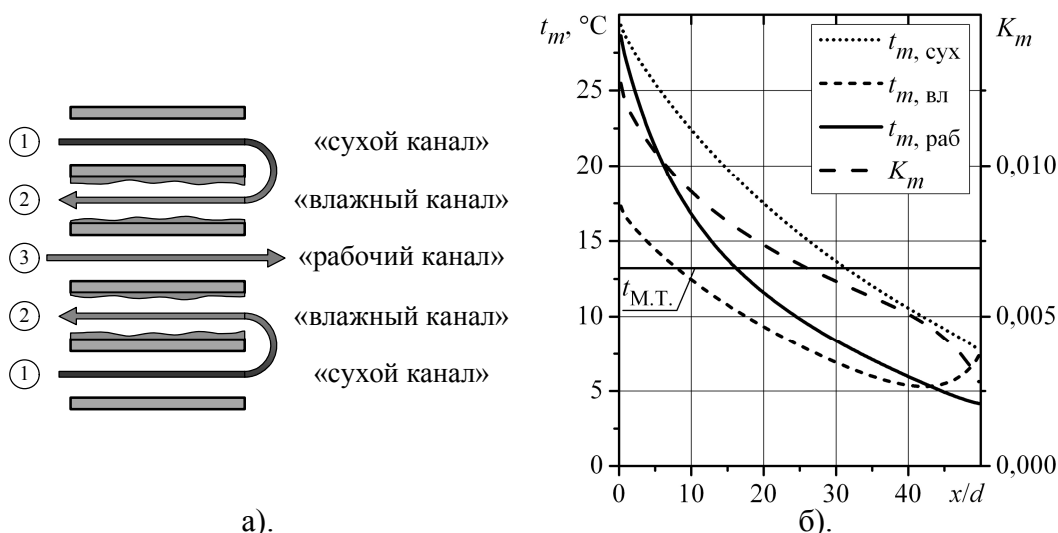


Рисунок 11 – Изменение основных параметров потоков воздуха в каналах:  $Re=100$ ,  $t_0=30^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_0=10\%$

В работе рассмотрена возможность применения тепломассообменных ячеек косвенно-испарительного типа в условиях реальной эксплуатации охла-

дителей воздуха для различных климатических условий городов Москва, Новосибирск (РФ) и Багдад (Ирак). Графики изменения температур и влажностей для июня месяца 2016 г. показаны на Рисунке 12 (настоящие данные являются показаниями метеостанций, установленных в соответствующих городах). Экстремальные значения по температуре и относительной влажности отмечены условными значками. Рассматриваемые случаи соответствуют самым теплонапряженным периодам охлаждения воздуха – летний период.

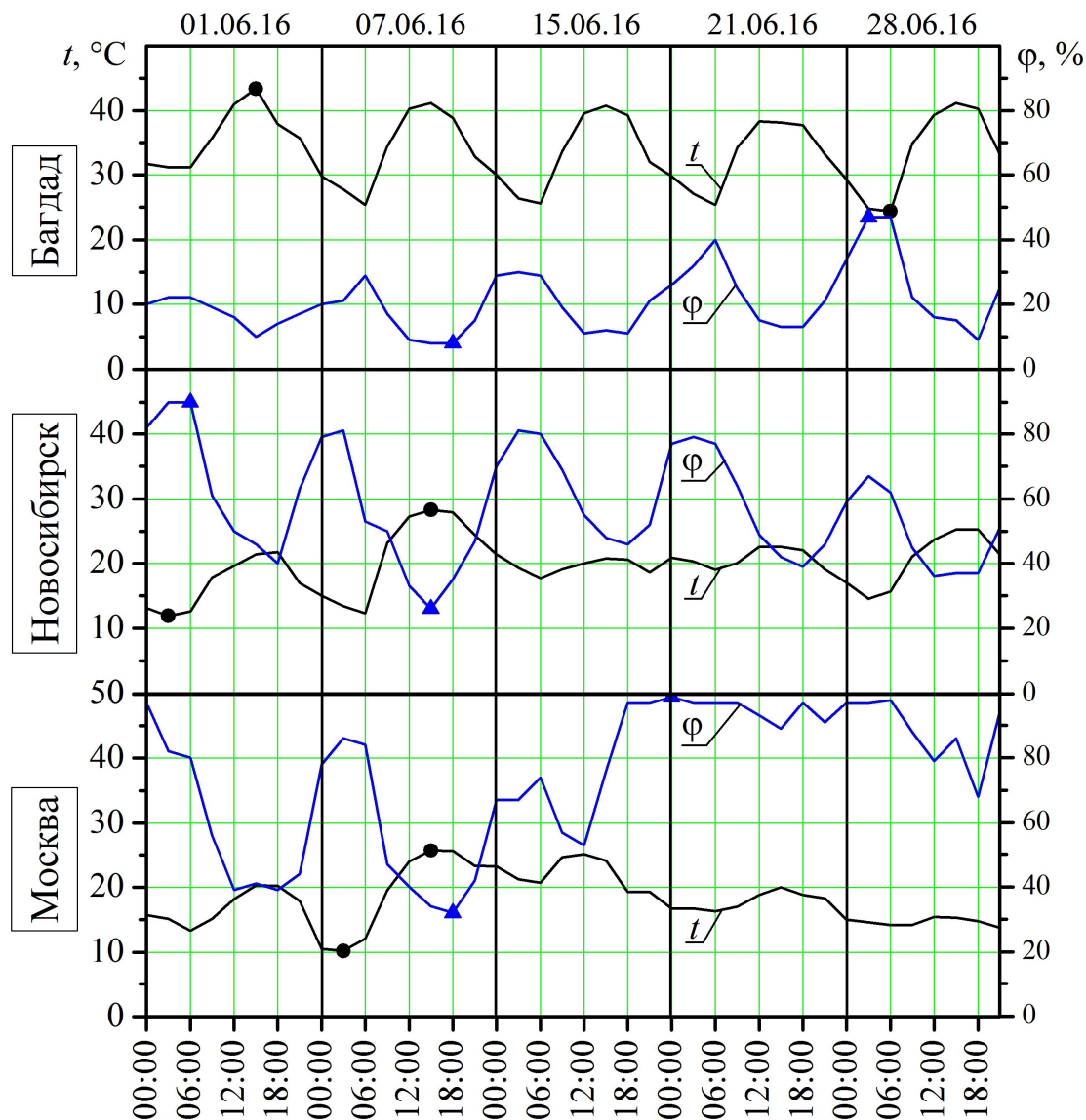


Рисунок 12 – Данные метеонаблюдений температур и относительной влажности атмосферного воздуха для пяти дней июля в г. Багдаде, Новосибирске и Москве

На Рисунке 13 показаны *i-d* диаграммы влажного воздуха при использовании пятиканальной теплообменной ячейки (Рисунок 11,а) для региона с сухим и жарким климатом (Багдад) и условий Новосибирска и Москвы. Пунктирными линиями указаны данные метеостанции за рассматриваемый период наблюдений. Условными значками – результаты моделирования. Так же на диаграммах указаны области комфортных и удовлетворительных условий для человека.

Область как комфортных, так и удовлетворительных условий, отмеченные на Рисунке 13, является неизменной для всех городов. Их координаты на  $i-d$  диаграмме определялись в соответствии с данными СНиП. Пунктирная линия является границей параметров атмосферного воздуха применительно к рассматриваемому региону. Эти данные соответствуют диаграммам наблюдений метеостанций. Условными значками отображены результаты расчетов охлаждения, при использовании в испарительном цикле атмосферного воздуха с параметрами метеонаблюдений. Видно, что для большинства условий, параметры охлажденного воздуха лежат ниже комфортных условий, что говорит о практически полной возможности обеспечения этих условий. Безоговорочно комфортные условия выполняются для Багдада.

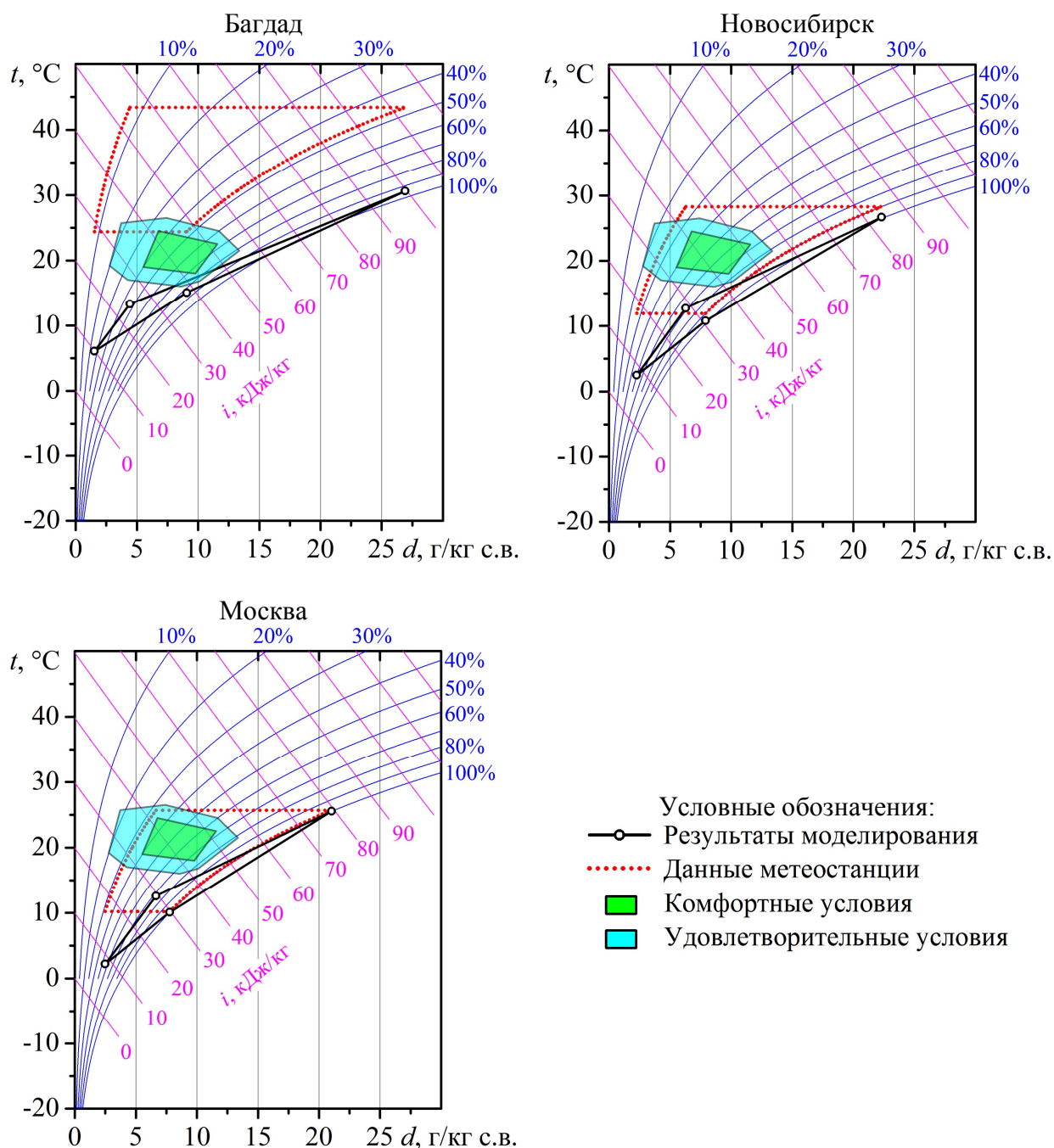


Рисунок 13 – Применение теплообменного аппарата косвенно-испарительного типа в реальных условиях

Несмотря на влажный климат городов Москва и Новосибирск, подобные схемы кондиционирования воздуха будут также эффективными.

Таким образом, из представленных данных численного анализа следует, что для условий сухого климата (Багдад) и влажного (Новосибирск и Москва) с помощью тепломассообменного аппарата косвенно-испарительного типа возможно получить комфортные условия для жизнедеятельности человека.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Проведено численное исследование течения и тепломассообмена в испарительных ячейках прямого и косвенно-испарительного охлаждения в режиме вынужденной ламинарной конвекции в широком диапазоне изменения входных параметров (чисел Рейнольдса  $50 \div 1000$ , температур  $20 \div 40^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $0 \div 70\%$ ) и для различных схем течений. Исследования выполнены с помощью оригинального разработанного алгоритма и пакета программных кодов.

2. Получены новые данные по тепломассообмену и сопротивлению одиночных каналов в режиме адиабатического испарения. Показано, что теплогидравлическая эффективность значительно снижается (на порядки) по мере увеличения числа Рейнольдса и влажности воздуха.

3. Установлено, что в неадиабатических условиях подвод теплоты вызывает снижение эффективности охлаждения газа, а отвод, напротив, усиливает процесс охлаждения. Впервые показано экстремальное поведение параметра эффективности от числа Рейнольдса; положение максимума и его величина зависят от интенсивности и направления дополнительного теплового потока на стенке. При ступенчатом подводе влаги охлаждение улучшается по мере роста числа участков и увеличения их протяженности.

4. При изучении схем косвенно-испарительного охлаждения показано, что противоточный тепломассообменный аппарат имеет более высокую эффективность по сравнению с прямоточным. При этом тепловая эффективность двухфазных воздухоохладителей в  $\sim 2$  раза выше, чем у классических теплообменных аппаратов, что делает их более конкурентно-способными.

5. Проанализированы особенности охлаждения воздуха в ячейках, работающих по циклу Майсоценко. Численно подтверждена идея испарительного охлаждения газа до параметров точки росы. На примере использования в качестве испаряющейся жидкости легко кипящего этанола продемонстрированы возможности глубокого охлаждения влажных газов вплоть до отрицательных температур.

6. Рассмотрены вопросы практического применения тепломассообменных аппаратов косвенно-испарительного типа в условиях реального климата (сухого, жаркого и умеренного влажного). Показано, что данные аппараты позволяют получить значения параметров воздуха на выходе, которые отвечают требованиям комфортности для жизнедеятельности человека. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизационного анализа охлаждения воз-

духа при вариации числа Рейнольдса, влажности воздуха, длины и геометрии каналов.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК*

1. **Khafaji, H.Q.** A Numerical Study of Direct Evaporative Air Cooler Forced Laminar Convection between Parallel-Plates Channel with Wetted Walls (пер.: Численное исследование прямого испарительного охлаждения в канале при ламинарной конвекции между двумя смоченными пластинами) / H.Q. Khafaji, A.L. Ekaid, V.I. Terekhov // J. of Eng. Therm. – 2015. – Vol. 24, № 2.– P. 113–122.

2. Горбачев, М.В. Возможности методов испарительного охлаждения для применения в системах кондиционирования воздуха (пер. Potentialities of evaporative cooling methods for use in air conditioning systems) /М.В. Горбачев, **Х.К. Кхафаджи**, В.И. Терехов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2015. – № 4 (61). – С. 128-139.

3. Терехов, В.И. Оптимизация параметров косвенно-испарительных ячеек при спутном и встречном течении теплоносителей / В.И. Терехов, М.В. Горбачев, **Х.К. Кхафаджи** // Теплобые процессы в технике. – 2016. – Т. 8. – № 5. – С. 207-213.

4. Терехов, В.И. Испарительное охлаждение воздуха в адиабатическом канале при чередовании влажных и сухих участков / В.И. Терехов, М.В. Горбачев, **Х.К. Кхафаджи**// Теплофизика и аэромеханика. – 2016. – Том 23. – №2. – С.229-239.

### *Материалы международных и всероссийских конференций*

1. Терехов, В.И. Оптимизация процесса прямого испарительного охлаждения воздуха при ламинарной вынужденной конвекции между параллельными пластинами / В.И. Терехов, **Х.К. Кхафаджи** // Труды Всероссийской конференции «XXXI Сибирский теплофизический семинар». – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2014. – С. 290-295.

2. Терехов, В.И. Возможности систем охлаждения косвенно-испарительного типа / В.И. Терехов, **Х.К. Кхафаджи**, М.В. Горбачев // «XXXII Сибирский теплофизический семинар, посвящ. 80-летию акад. В.Е. Накорякову»: материалы Всерос. конф., Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 19–20 нояб. 2015 г. – Новосибирск, 2015. – С. 204–205.

3. Горбачев, М.В. Двухфазный теплоперенос в ячейках с косвенным испарительным охлаждением / М.В. Горбачев, **Х.К. Кхафаджи**, В.И. Терехов // Динамика многофазных сред: тр. 14 Всерос. семинара, приуроч. к 75-летию акад. РАН Фомина В. М., Новосибирск, 2–5 нояб. 2015 г. – Новосибирск, 2015. – С. 37–39.

4. Терехов, В.И. Возможности методов испарительного охлаждения для применения в системах кондиционирования воздуха / В.И. Терехов,

**Х.К. Кхафаджи**, М.В. Горбачев // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, Новосибирск, 24 – 26 марта 2015 г. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2015. – С. 180-189.

5. Горбачев, М.В. Применение испарительного охлаждения в системах кондиционирования воздуха / М.В. Горбачев, **Х.К. Кхафаджи**, В.И. Терехов // Наука. Промышленность. Оборона : тр. 16 Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию Победы Великой Отечественной войне, Новосибирск, 22–24 апр. 2015 г.. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2015. – С. 220-225.

6. Terekhov, V.I. Numerical Simulation for Laminar Forced Convection in a Horizontal Insulated Channel with Wetted Walls / V.I. Terekhov, **H.Q. Khafaji**, A.L. Ekaid // Proc. 8th ICCHMT, Istanbul, 25-28 May 2015 – 8p.

7. Terekhov, V.I. Numerical study of a M-cycle counter-flow heat exchanger for indirect evaporative cooling / V.I. Terekhov, **H.Q. Khafaji**, M.V. Gorbachev // Proc. 9th ICCHMT, Cracow, Poland, 23-26 May 2016.– Paper № 413. – 8 p.

8. Terekhov, V.I. Numerical heat and mass transfer analysis of an indirect evaporative cooler with partially wetted plates / V.I. Terekhov, **H.Q. Khafaji**, M.V. Gorbachev // IV International Seminar with elements of scientific school for young scientists (ISHM-IV), Novosibirsk, Russia, 18-19 April 2016. – P. 25.

9. Gorbachev, M.V. Heat and mass transfer in two parallel channels with indirect evaporation cooling / M.V. Gorbachev, **H.Q. Khafaji**, V.I. Terekhov // II International Seminar with elements of scientific school for young scientists (ISHM-II), Novosibirsk, Russia, 20-21 May 2015.

10. Терехов, В.И. Исследование схем охлаждения потоков воздуха в ячейках косвенно-испарительного типа / В.И. Терехов, М.В. Горбачев, **Х.К. Кхафаджи** // Труды XV Минского международного форума по тепло- и массообмену ММФ-15. Минск, Беларусь, ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси. 23-26.05.2016. CD-ROM. Доклад № 2-24. – 6 с.

11. Terekhov, V.I. CFD Simulation of cooling in partially wetted plate heat exchanger / V.I. Terekhov, **H.Q. Khafaji**, M.V. Gorbachev// Abstracts V Int. Seminar with elements of scientific school for young scientists (ISHM-V) “Topical issues of heat and mass transfer at phase transitions and multiphase flows in modern chemical technology and energy equipment”. 16-17.11.2016, Novosibirsk, Russia. – P. 94.

12. Терехов, В.И. Возможности испарительного цикла Майсоценко. Результаты численного моделирования / В.И. Терехов, М.В. Горбачев, **Х.К. Кхафаджи** // Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики, Сборник трудов IX всероссийской научной конференции, посвященной 55-летию полета Ю.А. Гагарина, 21-25 сентября 2016 года, г. Томск. – С. 377-379.

13. **Кхафаджи, Х.К.** Численное моделирование испарительного теплообменного аппарата со ступенчатым увлажнительным охлаждением / Х.К. Кхафаджи, В.И. Терехов, М.В. Горбачев // Наука. Технологии. Инновации: сб. науч. тр.: в 9 ч., Новосибирск, 5–9 дек. 2016 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – Ч. 4. – С. 251–253.

14. Терехов, В.И. Численное моделирование теплообменного аппарата косвенно-испарительного типа с ступенчатым охлаждением /

В.И. Терехов, **Х.К. Кхафаджи**, М.В. Горбачев // Наука. Промышленность. Оборона: тр. 17 Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 20–22 апр. 2016 г. : В 4 т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ. – 2016. – Т. 1. – С. 323–328.

Подписано к печати 06.02.2017 г. Заказ № 265.  
Формат 60x84x1/16. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз.

---

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20