Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

UDC 621.175.3:536.24

Fasulaki G. P., Karnaukh V.V. The methods for studying heat and mass transfer in a film cooling tower under evaporative cooling

О методах исследования тепломассообмена в пленочной градирне при испарительном охлаждении

Fasulaki G. P.
Postgraduate Student
Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky
Russia, Donetsk
Karnaukh V. V.,
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor of the Department of Refrigeration and Trade Engineering named after V. V. Osokin
Donetsk National University of Economics and Trade named after Mykhailo Tugan-Baranovsky
Russia, Donetsk
Фасулаки Г. П.
аспирант
Донецкий национальный университет экономики
и торговли имени Михаила Туган-Барановского
Россия, г. Донецк
Карнаух В.В.,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры холодильной и
торговой техники имени Осокина В.В.
Донецкий национальный университет экономики
и торговли имени Михаила Туган-Барановского
Россия, г. Донецк

Abstract. *The article provides a systematic review and comparative analysis of modern methods for studying heat and mass transfer in film cooling towers during evaporative cooling of circulating water. Three groups of methods are considered: full-scale experiment, approximate mathematical modeling (including the Merkel equation, the modified number-of-transfer-units method, and the cell model of flow structure), and numerical CFD modeling based on the Euler–Lagrange approach using the discrete phase model (DPM). A rational strategy for the integrated application of methods is formulated, involving a consistent combination of mathematical modeling, full-scale experiment, and numerical experiment for verification and optimization of water-cooling systems.*

Keywords: *film cooling tower, heat and mass transfer, number-of-transfer-units method, computational fluid dynamics method, Merkel method, heat flow*

Аннотация. *В статье выполнен систематизированный обзор и сравнительный анализ современных методов исследования тепломассообмена в пленочных градирнях при испарительном охлаждении оборотной воды. Рассмотрены три группы методов: натурный эксперимент, приближенное математическое моделирование (включая уравнение Меркеля, модифицированный метод единиц переноса и ячеечную модель структуры потоков) и численное CFD-моделирование на базе подхода Эйлера - Лагранжа с использованием модели дискретных частиц (DPM). Сформулирована рациональная стратегия комплексного применения методов, предполагающая последовательное сочетание математического моделирования, натурного эксперимента и численного эксперимента для верификации и оптимизации водоохлаждающих систем.*

Ключевые слова*: пленочная градирня, тепломассообмен, метод единиц переноса, метод вычислительной гидродинамики, метод Меркеля, тепловой поток*

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Введение

Водооборотные системы широко используются как на крупных ТЭЦ, НПЗ, металлургических заводах, так и на малых предприятиях. Несмотря на значительную разницу в объемах циркулирующей воды и конструктивные отличия градирен, перечень задач и трудностей, связанных с их эксплуатацией, практически одинаковый. Основное требование к градирням -обеспечить бесперебойный технологический процесс при минимальных эксплуатационных, экологических и ресурсных затратах.

Несмотря на второстепенность данного оборудования в общей иерархии практически любого технологического процесса, вопросам повышения энергетической эффективности водоохлаждающих устройств, поиску новых материалов и конфигураций насадочных элементов посвящены десятки научных работ отечественных и зарубежных ученых [1-12]. Существуют десятки конструктивных решений градирен.

С расширением цифровизации и тотальной компьютеризацией усовершенствуются методы и подходы к исследованиям совместного тепломассообмена в рабочей зоне градирен и поиску путей его интенсификации. Корректно подобранный метод позволяет на этапе проектирования или при реконструкции систем подобрать наиболее эффективное решение по эксплуатации водооборотных систем.

Цель работы. Систематизация и сравнительный анализ современных методов исследования тепломассообмена в пленочных градирнях с насыпными насадками, включая экспериментальные, аналитические и численные подходы.

Материалы и методы исследования

В инженерной практике для теплотехнического расчета градирен, целью которого является определение глубины охлаждения воды ($\Delta t_ж$), подбор и расчет площади оросителя ($F_{нас}$), расчет гидравлических сопротивлений, определение тепловой эффективности градирни (Еж), а также для соблюдения строительных требований и норм руководствуются нормативными документами, например, [15-18].

Согласно современным представлениям, методы исследования тепломассообменных характеристик пленочных блоков оросителей градирен подразделяются на две группы: экспериментальные и теоретические, к которым относятся численные или приближенные математические модели.

Экспериментальные методы, как пример физического моделирования, основаны на прямых измерениях параметров процесса на стендах различного масштаба – от лабораторных макетов до промышленных установок. Они позволяют получить данные по гидравлическому сопротивлению, предельным нагрузкам, объемным коэффициентам массоотдачи, тепловой эффективности и каплеуносу. Ключевым

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

преимуществом экспериментальных методов является возможность получения достоверной информации о реальной гидродинамической обстановке в аппарате, включая неравномерность распределения потоков.

Экспериментальные натурные исследования градирен требуют тщательного планирования эксперимента, наличия сертифицированных измерительных приборов, проведения минимум трех испытаний при одних и тех же параметрах и корректного сбора и обработки результатов.

Например, в работе [2] авторы проводили натурные эксперименты на макете градирни, оборудованным комбинированной насадкой из полиэтиленовых труб с регулярно-дискретной шероховатостью с дополнительным верхним хаотичным слоем, исследован процесс охлаждения воды воздухом при пленочном противотоке фаз. Авторами доказано, что применение нерегулярной (хаотичной) насадки повышает эффективность охлаждения воды на 15-35% по сравнению с применением только регулярной насадки.

Авторами [9] выполнено опытное изучение работы башенных градирен, имеющих различный тип (конструкцию) оросителей, расположенных на одной из кузбасских ТЭЦ, и определены их эффективности по глубине охлаждения единицы объема в единицу времени. Задачами исследования были: проведение измерений параметров воздуха и циркуляционной воды до и после градирни; расчет характеристик градирен: гидравлической нагрузки, расхода воздуха, тепловой мощности, количества испаренной воды и др.; анализ полученных результатов. В ходе натурного эксперимента лучшие количественные и качественные параметры показал ороситель из материала полиамид ПА6-210-311, имеющий развитую ячеистую структуру 50х50 мм из гофрированных листов усиленного профиля с синусоидной теплообменной поверхностью.

Испытания на четырехсекционной вентиляторной пленочной градирне ГРН-100, входящей в водооборотную систему предприятия пищевого производства, носили «интегральный» и «локальный» характер [10].

В цикле «локальных» испытаний был рассмотрен важнейший вопрос неравномерности распределения воздушных и водяных потоков. В цикле «интегральных» испытаний с помощью приборов: тепловизионного аппаратурно-программного комплекса «КрионИК», «АИСТ-3П» (погрешность измерения скорости воздуха $\pm 0{,}08 w_{\text{г}}$, погрешность измерения температуры потока $\pm 0{,}02$ °С) и аспирационного психрометра, авторами были получены данные по основным параметрам водяного и воздушного потоков.

Для градирни с многоканальным оросителем и регулярной шероховатостью (РН)

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

поверхности рекомендована конструкция «двойной косой риф» с наклонным расположением основного канала; в качестве материала оросителя отдано предпочтение поливинилхлориду.

Натурные эксперименты на физических или аналоговых моделях сопряжены организационной сложностью и текущими затратами, поэтому все больше в научных работах предпочитают заменять их на вычислительный эксперимент с обобщением полученных результатов на однотипные объекты, явления, процессы. Решение этих проблем с использованием математических методов позволяет в каждом конкретном случае получать надежные и достоверные результаты при минимальной трудоемкости экспериментальных исследований.

В большинстве научных проектов натурному эксперименту предшествует математическое моделирование процессов.

Математическое описание процесса испарительного охлаждения пленки воды в противоточной градирне основывается на системе уравнений тепловых и материальных балансов для обеих фаз.

При математическом моделировании структуры потоков используются модели идеального смешивания, идеального вытеснения, диффузионная и ячеечная модели, комбинированные модели [1-3, 5, 8, 10]. Данные модели получают в результате упрощения полного математического описания процессов переноса импульса, массы и энергии. Расчет градирен выполняется с учетом гидродинамических особенностей взаимодействия фаз.

В классической постановке, развитой в работе [3], тепломассообмен между пленкой жидкости и газовым потоком описывается системой из трех дифференциальных уравнений, включающих уравнение энергии для определения распределения температуры по толщине пленки и уравнения переноса теплоты и массы в газовой фазе.

Большинство математических моделей разработано с учетом следующих допущений:

– тепломассообмен осуществляется только в направлении, нормальном к потокам;

– тепломассообмен через стенки градирни в окружающую среду пренебрежительно мал;

– теплопередача от вентиляторов градирни потокам воздуха или воды пренебрежительно мала;

– постоянное значение удельной массовой теплоемкости воды и сухого воздуха;

– постоянство коэффициентов тепло- и массообмена во всей градирне;

– потери воды в результате дрейфа незначительны;

– изотермическая поверхность потока воды в каждом поперечном сечении;

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

– одинаковая площадь поперечного сечения градирни;

– число Льюиса для влажного воздуха равно единице.

Фундаментальным уравнением, описывающим тепломассообмен в системе «воздух-вода», является уравнение Меркеля [10]:

$$\frac{K_h F}{G_ж} = \int_{t_ж^2}^{t_ж^1} \frac{c_ж dt_ж}{(h_г^* - h_г)}\ , \qquad (1)$$

где K_h – общий коэффициент тепломассопереноса, отнесенный к разности энтальпий, кг/(м^{2}с); $h_г^*$ – удельная энтальпия насыщенного воздуха (при φ =100 %), кДж/кг; $h_г$ – удельная энтальпия воздуха в ядре потока, кДж/кг; $G_ж$ – массовый расход воды через аппарат, кг/с; $c_ж$ – удельная массовая теплоемкость воды, (кДж/кгК).

Правая часть уравнения (1) содержит только термодинамические параметры потоков, а левая – конструктивные и эксплуатационные характеристики градирни (рабочую поверхность, расход воды и коэффициент тепломассопереноса). Это делает уравнение (1) особенно удобным для расчетов градирен. Величина $\frac{K_h F}{G_ж} = K_v$ носит название критерия испарения.

В [10] процессы совместного тепломассообмена при противоточном взаимодействии воды и воздуха описываются системой уравнений (2) при граничных условиях (3):

$$\begin{cases} G_г dh_г = \beta_h (h_г'' - h_г) dF, \\ G_ж c_ж dt_ж = \alpha_ж (t_ж - t_ж'') dF, \\ \dfrac{dh_г}{dt_ж} = \dfrac{G_ж c_ж}{G_г}, \\ \dfrac{dh_г}{dt_г} = \dfrac{(h_г'' - h_г)}{(t_ж'' - t_г)}, \\ h_г'' = f(t_ж''); \ h_г^* = f(t_ж) \end{cases} \qquad (2)$$

при граничных условиях:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

$$\begin{cases} i=1:\ t_{ж}=t_{ж}^{2};\ h_{г}=h_{г}^{1};\ t_{г}=t_{г}^{1} \\ i=n:\ t_{ж}=t_{ж}^{1};\ h_{г}=h_{г}^{2};\ t_{г}=t_{г}^{2}, \end{cases} \quad (3)$$

где $h_{г}''$ – удельная энтальпия воздуха в приграничном слое, кДж/кг; $t_{жс}''$ – температура воздуха в приграничном слое, °С; $t_{ж}^{1}$ – температура охлаждаемой воды на входе в аппарат, °С; $t_{ж}^{2}$ – температура охлажденной воды на выходе из аппарата, °С; $t_{г}^{1}$ – температура воздуха на входе в аппарат, °С; $t_{г}^{2}$ – температура воздуха на выходе из аппарата, °С; $G_{г}$ – массовый расход воздуха через аппарат, кг/с;

Область применения метода ограничена зоной ненасыщенного влажного воздуха. В случае, когда воздух в пределах рабочей зоны достигает состояния насыщения, может иметь место конденсация водяного пара.

Наиболее продуктивным приближенным методом расчета пленочных градирен является модифицированный метод единиц переноса, развитый в работах А. Г. Лаптева и Е. А. Лаптевой [2]. Сущность метода состоит во введении дополнительных слагаемых в выражение для высоты единиц переноса, учитывающих обратное перемешивание потоков через числа Пекле (критерии Боденштейна). Модификация позволяет косвенно учесть гидродинамическую структуру потоков и снижение эффективности тепломассообмена по сравнению с моделью идеального вытеснения. Получены обобщенные расчетные эмпирические выражения для сопротивления сухих и орошаемых труб, а также зависимости объемного коэффициента массоотдачи от скорости воздуха при различных плотностях орошения.

Ключевой результат состоит в том, что обратное перемешивание потоков снижает тепловую эффективность градирни на 8–15 %. Этот эффект необходимо учитывать при расчетах реальных аппаратов.

Альтернативным приближенным подходом является применение ячеечной модели структуры потоков для газовой и жидкой фаз в виде аналитического решения с тепловым числом единиц переноса.

В рамках ячеечной модели [2] поток в каждой фазе представляется последовательностью ячеек полного перемешивания. Тепловая эффективность по газовой фазе (нагрев воздуха) вычисляется аналитически, а эффективность охлаждения воды определяется из уравнения теплового баланса. Представлены выражения для расчета основных параметров модели – числа ячеек по газовой и жидкой фазам.

Выражение ячеечной модели для теплообмена в жидкой фазе [2]:

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

$$c_{ж} G_{ж} (T_{i-1,ж} - T_{i,ж}) = Q_i, \ i = 1,2...n. \quad (4)$$

Теплоперенос в газовой фазе и массоперенос испарившейся воды описываются следующими зависимостями:

$$G_{г} (h_{i-1,г} - h_{i,г}) = Q_i, \ i = 1,2...n, \quad (5)$$

$$G_{г} (d_{i-1,г} - d_{i,г}) = M_i, \ i = 1,2...n, \quad (6)$$

где i – номер ячейки; n – число ячеек; d – влагосодержание воздуха, кг/кг$_{с.в.;}$ M_i – поток массы испарившейся влаги, кг/с; h – удельная энтальпия влажного воздуха, Дж/кг.

Уравнение теплового потока, передаваемого в ячейке, включает явную теплоту $Q_я$ и скрытую теплоту $Q_{скр}$:

$$Q_i = Q_я + Q_{скр} = F_i \left[\alpha_{г} (T_{i,ж} - T_{i,г}) + h_{пi} \rho_{г} \beta_{г} (d^*_{г,i} - d_{г,i}) \right], \ i = 1,2...n, \quad (7)$$

где $\alpha_г$ – коэффициент теплоотдачи между ядром воздушного потока и поверхностью воды, Вт/(м^{2}К); $\beta_г$ – коэффициент массоотдачи в газовой среде, м/с; $h_{пi}$ – удельная энтальпия пара при температуре воды, Дж/кг;

Коэффициенты тепло- и массоотдачи в формулах принимаются средними по поверхности насадки и вычисляются по выражениям гидродинамической аналогии или определяются экспериментально для конкретной насадки.

Подобный подход использован для выполнения эксергетического анализа противоточной пленочной градирни в работах [6, 8].

На современном этапе развития промышленной теплоэнергетики наиболее точным и верифицированным инструментом исследования сложных двухфазных сред является численное моделирование гидрогазодинамики (*CFD — Computational Fluid Dynamics*).

Пакеты прикладных программ, основанные на методах *CFD*, позволяют визуализировать поля скоростей, температур и концентраций внутри аппарата.

Типичное численное исследование включает следующие шаги:

1. Построение математической модели: Формулировка системы дифференциальных уравнений и граничных условий.

2. Выбор численного метода: Выбор подхода для решения системы уравнений (например, метод конечных разностей, конечных объемов).

3. Калибровка и валидация: Сравнение результатов моделирования с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований на стендах. Это необходимо для настройки (калибровки) эмпирических коэффициентов модели. Хорошее совпадение с экспериментом подтверждает адекватность модели.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

4. Проведение вычислительных экспериментов: Выполнение серии расчетов для различных конструктивных и режимных параметров с целью их оптимизации.

Применительно к аппаратам, где реализуется процесс тепломассообмена, численные методы используются для сравнения различных конфигураций оросителей, определения целесообразности применения в конкретных условиях организации потоков. Они базируются на решении систем дифференциальных уравнений переноса с частными производными, описывающих совместный тепломассообмен в пленке жидкости и газовой фазе. Численное моделирование позволяет исследовать локальные характеристики процесса и учитывать сложную геометрию контактных устройств.

CFD решает системы дифференциальных уравнений в частных производных (уравнения Навье-Стокса, уравнения энергии и диффузии) для каждого элемента расчетной сетки, покрывающей весь объем градирни. Это позволяет с высокой точностью описать:

1. Аэродинамику: рассчитать поля скоростей и давлений воздуха, в том числе под влиянием внешнего ветра.

2. Гидродинамику пленки: для моделирования двухфазного течения часто используется эйлерово-лагранжев подход: воздух моделируется как сплошная среда (эйлерово описание), а капли или пленка воды — как дискретные частицы (лагранжево описание).

3. Тепломассообмен: рассчитать поля температур и концентраций водяного пара в воздухе с учетом испарения.

Для описания турбулентности, которая играет ключевую роль в процессах переноса, применяются различные модели, например, широко распространенная k-ε модель. При этом сложные элементы, такие как ороситель, часто моделируются как пористая среда с заданными коэффициентами гидравлического сопротивления и теплообмена, полученными из экспериментов.

Этот подход незаменим для решения специфических задач, где метод единиц переноса не справляется, а именно:

- анализ неравномерности: изучение того, как распределение воды и воздуха по сечению влияет на общую эффективность.
- оптимизация конструкции: оценка влияния геометрических изменений (например, установка воздухорегулирующих устройств или вентиляционных окон в оросителе) на работу градирни.
- влияние внешних факторов: моделирование работы башенной градирни при боковом ветре.

Дисперсная фаза – капли воды, распыляемые форсунками

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

водораспределительной системы, – моделируется в лагранжевых координатах с использованием модели дискретных частиц (DPM — *Discrete Phase Model*). Траектория движения, изменение массы (испарение) и флуктуации температуры каждой индивидуальной капли или их представительной группы рассчитываются путем интегрирования по времени обыкновенных дифференциальных уравнений баланса сил, конвективного нагрева/охлаждения и диффузионного массопереноса:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{u - u_p}{\tau_r} + g\frac{p_p - \rho}{p_p} \tag{1.2}$$

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = \alpha_p A_p \left(T_\infty - T_p\right) + \frac{dm_p}{dt} r\,, \tag{1.3}$$

где u, u_p – векторы скорости воздуха и капли соответственно, м/с; τ_r - время релаксации частицы, с; m_p, c_p, T_p, A_p – масса, теплоемкость, температура и площадь поверхности капли; α_p – локальный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м^2·К); r – удельная теплота парообразования, Дж/кг; $dm_p/\,dt$ – скорость испарения влаги, кг/с.

Взаимосвязь между эйлеровой (воздух) и лагранжевой (капли воды) фазами осуществляется через концепцию межфазного взаимодействия путем подсчета итерационных источниковых членов по импульсу, массе и энергии в каждой расчетной ячейке сетки. Для адекватного моделирования гидродинамики капельного потока в преднасадочном пространстве модель DPM дополняется специализированными подмоделями разрушения капель (модель Breakup), учитывающими аэродинамическое сопротивление среды.

Важной особенностью современных численных исследований является переход к нестационарным расчетам с микрогодовыми шагами интегрирования (порядка 1 мс). Это позволяет отслеживать динамику установления температурного профиля и полей относительной влажности вплоть до выхода аппарата на стационарный режим. Присутствие насыпной насадки в такой модели задается через эквивалентные объемные источники гидравлического сопротивления (по закону Дарси-Форхгеймера) и локальные геометрические параметры поверхности контакта, верифицированные на основе экспериментальных данных.

Таким образом, применение нестационарного CFD-моделирования на базе подхода Эйлера-Лагранжа (модели DPM) позволяет преодолеть ограничения классических теорий, детально визуализировать локальную структуру полей температур, скоростей и влажности внутри градирни, а также с высокой степенью точности обосновать эффективность интеграции полиэдрических полых сфер

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

диаметром 50 мм.

Основная цель численного моделирования градирен – повышение эффективности и надежности их работы на всех этапах их жизненного цикла. Она может достигаться в следующем:

- оптимизация проектирования: создание новых и модернизация существующих конструкций для достижения максимальной производительности.
- прогнозирование эффективности: оценка того, как изменение расходов воды и воздуха, их температуры или влажности повлияет на охлаждающую способность.
- выявление «узких мест»: анализ причин недостаточного охлаждения воды, которые могут нарушать технологические процессы на промышленных предприятиях.

Можно отметить, что за последние 10-15 лет количество работ, в которых использован метод CFD применительно к водоохлаждающим установкам, возросло [12-14], и ввиду вариативности конструкций оросителя, организации взаимодействия потов, представляет научный и практический интерес более широкого применения этого метода в качестве инженерного инструмента на стадии проектирования и/или модернизации подобных систем.

В большинстве научных работ в качестве объекта исследования приняты башенные градирни большой производительности [12-14]. Например, на рис. 1 приведены результаты моделирования движения воздуха в градирне БГ-1600 [13]. При этом вопрос численного моделирования пленочных малогабаритных градирен с противотоком и с поперечным током является недостаточно раскрытым.

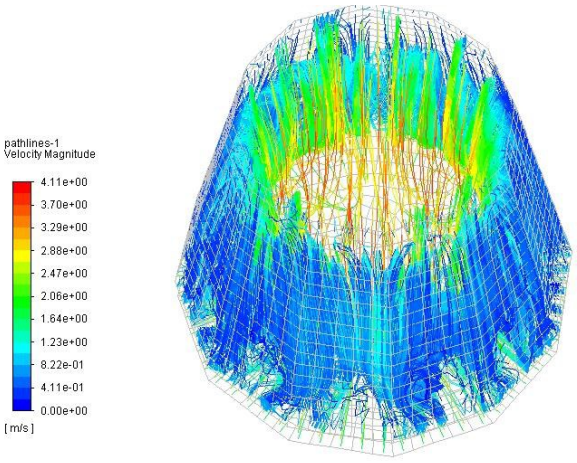

Рис. 1 – Результаты моделирования движения воздуха в градирне БГ-1600 [13]

Для выполнения задач численного моделирования тепломассобменных процессов в градирне можно использовать такие программы, как: **OpenFOAM** (Великобритания) - абсолютный лидер и стандарт в мире открытого CFD, представляет

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

собой огромную библиотеку решателей и утилит, написанная на C++; **FlowVision** (Россия), наиболее проверенный и аттестованный пакет для 3D-моделирования течений, сопряжённого теплообмена в энергетике и **Логос** (Россия) – пакет программ для математического моделирования и инженерного анализа.

Для наглядности вышеизложенного материала авторами сформирована таблица 1 с критериями для сопоставления методов анализа тепломассообменных процессов.

Таблица 1

Сравнение методов исследования тепломассообменных процессов в пленочной градирне при испарительном охлаждении

Критерий	Натурный эксперимент	Математическое моделирование	Численное моделирование
Достоверность	Высокая (реальные условия). Ограничена погрешностями измерений и неконтролируемыми факторами.	Зависит от принятых допущений и корректности постановки задачи. Может быть высокой при строгой физической обоснованности.	Зависит от качества математической модели, сетки, схемы дискретизации. Верифицируется по эксперименту (расхождение в 3-5% считается допустимым).
Полнота данных	Чаще интегральные характеристики (суммарный тепловой поток, средние коэффициенты). Детальные поля требуют сложной диагностики.	Даёт аналитические зависимости и общие закономерности. Часто ограничено простыми геометриями и режимами.	Даёт детальные поля всех переменных (скорость, температура, давление, концентрация) во всей расчётной области.
Сложность организации	Высокая. Требует сложной измерительной инфраструктуры, дублирования штатных датчиков, учета нестационарности и инерционности объекта	Средняя. Требует корректной постановки краевой задачи и выбора замыкающих соотношений. Реализация зависит от сложности модели	Высокая. Критичны этапы построения геометрии, генерации расчетной сетки, выбора моделей турбулентности и граничных условий
Быстрота выполнения	Низкая. Испытания привязаны к режиму работы станции, могут длиться дни и недели	Высокая. Аналитические решения и матричные модели позволяют проводить оперативные расчеты и диагностику	Низкая. Пример: расчет с сеткой 25 млн ячеек на 8 процессорах занимает около 40 дней CPU-времени
Стоимость и сроки	Высокая стоимость (оборудование, материалы, персонал), длительные сроки подготовки и проведения.	Низкая стоимость, короткие сроки для простых задач. Для сложных аналитических решений может быть трудоёмко или невозможно.	Средние/высокие затраты на вычислительные ресурсы. Эффективно для параметрических исследований и оптимизации.
Воспроизводимость	Затруднена: сложно полностью повторить внешние условия и состояние оборудования.	Высокая: формулы и зависимости воспроизводимы при одинаковых допущениях.	Высокая: расчёт можно запустить многократно с идентичными или варьируемыми входными данными.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Критерий	Натурный эксперимент	Математическое моделирование	Численное моделирование
Гибкость и диапазон исследования	Ограничена конструкцией установки, возможностями измерений, безопасностью. Трудно исследовать экстремальные режимы.	Гибко для выявления закономерностей и предельных случаев. Но применимо только к задачам, допускающим аналитическое решение.	Очень гибко: можно исследовать любые геометрии, режимы, в том числе опасные или недоступные в реальности.
Роль в цепочке исследований	Эталон для верификации моделей; источник эмпирических данных и коэффициентов.	Формулирует физическую модель, определяет ключевые параметры и безразмерные комплексы (Nu, Re, Pr и т.п.).	Инструмент для детального анализа, оптимизации, прогнозирования; верифицируется по натурным данным.

На практике рассмотренные методы тесно взаимосвязаны. Логическую цепочку их применимости можно представить следующим образом:

1-й этап. Математическое моделирование – формулируются уравнения, определяют безразмерные параметры и основные эффекты.

2-й этап. Натурный эксперимент – получают данные, уточняют коэффициенты, фиксируют реальные режимы и нестабильности.

3-й этап. Численное моделирование – решают модель для реальных геометрий и режимов, проводят оптимизацию, прогнозируют поведение системы.

Заключение

Проведенный сравнительный анализ подтверждает, что ни один из рассмотренных методов не является универсальным: натурный эксперимент остается эталоном для верификации и получения эмпирических констант, приближенные математические модели – наиболее сбалансированным инструментом инженерных расчетов, а численное CFD-моделирование – незаменимым средством детального анализа локальных характеристик и оптимизации геометрии контактных устройств.

Наиболее перспективным направлением дальнейших исследований следует признать развитие сопряженных математических моделей, учитывающих неравномерность распределения потоков по сечению аппарата и нестационарность атмосферных условий, с последующей валидацией по данным натурных испытаний промышленных градирен.

References

1. Контактные насадки промышленных тепломассообменных аппаратов : монография / А. М. Каган, А. Г. Лаптев, А. С. Пушнов, М. И. Фарахов ; под ред. А. Г. Лаптева. – Казань : Отечество, 2013. – 454 с. – ISBN 978-5-9222-0664-8.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

2. Столярова, Е. Ю. Экспериментальные гидравлические и тепломассообменные характеристики пленочной градирни с комбинированными насадками / Е. Ю. Столярова, Е. А. Лаптева, А. Г. Лаптев // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2023. – Т. 15, № 1 (57). – С. 37–47.

3. Пономаренко, В. С. Градирни промышленных и энергетических предприятий : справочное пособие / В. С. Пономаренко, Ю. И. Арефьев ; под общ. ред. В. С. Пономаренко. – Москва : Энергоатомиздат, 1998. – 376 с. : ил. – ISBN 5-283-00284-5.

4. Карнаух, В. В. Применение регрессионного анализа для прогнозирования работы малогабаритной пленочной градирни / В. В. Карнаух, А. Б. Бирюков, А. А. Панюжев // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2025. – № 3. – С. 198–207. – DOI: 10.5281/zenodo.17395053. – EDN: VZYNWC.

5. Бирюков, А. Б. Водоохлаждающие устройства в системах водоснабжения металлургических предприятий / А. Б. Бирюков, В. В. Карнаух // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. – 2016. – № 6 (1398). – С. 88–97. – EDN: WELSOZ.

6. Khan, J.-U.-R. Performance characteristics of counter flow wet cooling towers / J.-U.-R. Khan, M. Yaqub, S. M. Zubair // Energy Conversion and Management. – 2003. – Vol. 44, № 13. – P. 2073–2091. – DOI: 10.1016/S0196-8904(02)00231-5.

7. Afshari, F. A Review Study On Cooling Towers; Types, Performance and Application / F. Afshari, H. Dehghanpour // ALKU Journal of Science. – 2019. – Special Issue (NSP 2018). – P. 1–10.

8. Ataei, A. Simultaneous water and energy saving of wet cooling towers, modeling for a sample building / A. Ataei, J.-K. Choi, Z. Hamidzadeh, N. Bagheri // Advances in Environmental Research. – 2015. – Vol. 4, № 3. – P. 173–181. – DOI: 10.12989/aer.2015.4.3.173.

9. Темникова, Е. Ю. Оценка эффективности работы градирен ТЭЦ / Е. Ю. Темникова, А. Р. Богомолов, В. А. Тараймович, О. А. Чергинец // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – № 6 (160). – С. 21–30. – DOI: 10.26730/1999-4125-2023-6-21-30. – EDN: AHMQSA.

10. Карнаух, В. В. Интенсификация тепломассообменных процессов в вентиляторных градирнях пленочного типа : монография / В. В. Карнаух. – Донецк : ДОННУЭТ, 2010. – 159 с.

11. Фасулаки, Г. П. О прогнозировании работы малогабаритной пленочной градирни / Г. П. Фасулаки, В. В. Карнаух, А. А. Панюжев // Инновационные направления интеграции науки, образования и производства : сборник материалов VII Международной научно-практической конференции, Феодосия, 11–14 мая 2026 года. –

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Керчь : Керченский государственный морской технологический университет, 2026. – С. 112–114. – EDN: WIHVYM.

12. Моделирование и расчет процесса тепломассообмена в башенных градирнях систем оборотного охлаждения ТЭС и АЭС / В. П. Жуков, М. Д. Фомичев, В. Н. Виноградов [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2022. – № 3. – С. 57-63. – DOI 10.17588/2072-2672.2022.3.057-063. – EDN MGVOEB.

13. Комбинированная модель тепломассообмена в башенных градирнях / В. П. Жуков, М. Д. Фомичев, Е. В. Барочкин [и др.] // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2023. – № 5. – С. 90-96. – DOI 10.17588/2072-2672.2023.5.090-096. – EDN VLHENK.

14. Machine learning-based optimization and performance analysis of cooling towers / Sampath Suranjan Salins, Shiva Kumar, A. Ganesha, S.V. Kota Reddy // Journal of Building Engineering. – 2024. –https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110415.

15. ГОСТ Р ЕН 14705-2011. Теплообменники. Методы измерения и оценки тепловых характеристик испарительных градирен. – Москва : Стандартинформ, 2013.

16. ГОСТ 22270-2018. Системы отопления, вентиляции и кондиционирования. Термины и определения. – Москва : Стандартинформ, 2018.

17. Пособие по проектированию градирен (к СНиП 2.04.02-84). – Москва : ЦИТП Госстроя СССР, 1985.

18. СП 340.1325800.2017. Конструкции железобетонные и бетонные градирен. Правила проектирования. – Москва : Стандартинформ, 2017.