

## ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

---

УДК 621.6.022

**Мария Владимировна Козлова**

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

**Павел Сергеевич Соколов**

ООО «КУБ», исполнительный директор, Россия, Иваново, e-mail: ptpm1@yandex.ru

**Александр Васильевич Банников**

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: avbannikov\_pte@mail.ru

### **Исследование влияния реальных физических свойств влажного воздуха на точность расчета тепломассообменных процессов**

#### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Влажный воздух, представляющий собой смесь сухого воздуха и водяного пара, широко используется в различных энергетических и технических устройствах. В основе большинства теоретических исследований свойств влажного воздуха лежит уравнение идеального газа Менделеева-Клапейрона, не учитывающее ассоциацию, межмолекулярное взаимодействие и особенности термодинамического поведения влажного воздуха как смеси газов. Использование данного уравнения приводит к погрешности в определении параметров состояния влажного воздуха, которая может достигать 55 %. Соответственно, малоизученными остаются вопросы, касающиеся определения реальных свойств влажного воздуха.

**Материалы и методы.** При рассмотрении влажного воздуха как идеального газа использовано уравнение состояния Менделеева-Клапейрона. Для исследования действительных параметров состояния влажного воздуха и его свойств использованы уравнения состояния реального газа Вукаловича-Новикова и Молье.

**Результаты.** Рассмотрены несколько уравнений состояния реального газа, учитывающие взаимодействие молекул водяного пара. Определены действительные физические свойства влажного воздуха, проведена оценка их влияния на сопряженный процесс тепломассообмена для различных условий. Получены действительные значения теплофизических свойств влажного воздуха. Определены термодинамические границы применения уравнений состояния Менделеева-Клапейрона, Вукаловича-Новикова и Молье для влажного воздуха. Показано, что уравнение состояния Вукаловича-Новикова наилучшим образом передает количественные соотношения между давлением, удельным объемом и температурой насыщенного влажного воздуха, его применение позволяет снизить погрешность вычислений на 39–50 %.

**Выводы.** Полученные результаты позволяют повысить точность расчета процессов тепломассопереноса при проектировании контактных теплообменных аппаратов, конвективных сушильных установок и гигроскопических опреснителей, компрессоров, в которых осуществляется процесс сжатия с впрыском воды или водяного пара, а также камер сгорания, в которых происходит смешение дымовых газов с водяным паром.

**Ключевые слова:** влажный воздух, реальный газ, влагосодержание, теплофизические свойства влажного воздуха, уравнение состояния

**Mariya Vladimirovna Kozlova**

Ivanovo State Power Engineering University, student at the Department of Heat Power Engineering, Russia, Ivanovo, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

**Pavel Sergeevich Sokolov**

LLC «KUB», executive Director, Russia, Ivanovo, e-mail: ptpm1@yandex.ru

**Aleksandr Vasilievich Bannikov**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Industrial Heat Power Engineering, Russia, Ivanovo, e-mail: avbannikov\_pte@mail.ru

## Investigation of humid air physical properties influence on the heat and mass transfer processes calculation accuracy

### Abstract

**Background.** Humid air is a mixture of dry air and water vapor and is widely used in various power and technical devices. Most theoretical studies of the properties of humid air are based on Mendeleev-Clapeyron ideal gas equation, which doesn't take into account the association, intermolecular interaction, and particularities of the thermodynamic behavior of humid air as a mixture of gases. The use of this equation leads to inaccuracy in determining the parameters of the state of humid air, which can reach up to 55 %. Therefore, the issues concerning the actual properties of humid air determining remain poorly understood.

**Materials and methods.** The ideal gas model is based on Mendeleev-Clapeyron equation. To study the actual parameters of the humid air state and its properties, Vukalovich-Novikov's and Molie's real gas state equations have been used.

**Results.** Several equations of the state of real gas, taking into account the interaction of water vapor molecules have been considered. The actual physical properties of humid air are determined, and their influence on the coupled heat and mass transfer processes for various conditions is evaluated. The actual values of the thermophysical properties of humid air have been derived. The thermodynamic limits for humid air have been determined using Mendeleev-Clapeyron's, Vukalovich-Novikov's and Molie's state equations. It has been proved Vukalovich-Novikov's state equation to be the best to represent the quantitative relations between the pressure, specific volume, and the temperature of saturated water vapor. Its application reduces the error of calculations by 39–50 %.

**Conclusions.** The results obtained allow to improve the accuracy of calculating heat and mass transfer when designing contact heat exchangers, convective drying units and hygroscopic desalination plants, compression processes with water or water vapor injection, as well as the processes of mixing flue gases with water vapor in the combustion chambers of gas-steam installations.

**Key words:** humid air, real gas, moisture content, thermophysical properties of humid air, state equation

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2020.4.005-013

**Введение.** Одной из самых распространенных смесей, применяющихся в качестве рабочего тела существенного числа процессов, протекающих в различных теплообменных аппаратах, является смесь сухого воздуха и воды. Для проведения адекватных конструктивных, поверочных и наладочных расчетов, а также для определения оптимальных условий работы теплообменного оборудования необходимо учитывать влияние реальных теплофизических свойств влажного воздуха на процессы с его участием.

Как теплоноситель влажный воздух широко используется в системах вентиляции и кондиционирования воздуха, в гигроскопических опреснительных установках, в контактных теплообменных аппаратах,

конвективных сушилках, пневматических установках и пр.

В силу того, что контактные теплообменные аппараты являются более энергетически эффективными по сравнению с поверхностными, исследование особенностей рабочих сред, взаимодействующих в них, является актуальным. Высокая энергетическая эффективность контактных теплообменных аппаратов обусловлена тем, что за счет непосредственного контакта сред без непроницаемой стенки процесс подвода теплоты является термодинамически более совершенным, так как ведет к снижению внешней необратимости процесса, т. е. более полному использованию потенциала теплоты. Организация теплообмена посредством контакта сред позволяет

уменьшить металлоемкость и коррозионно-эрозийный износ теплообменника, повысить надежность и тем самым обуславливает все более широкое и перспективное применение контактных аппаратов в промышленности.

Учитывая, что в процессе теплообмена в контактных аппаратах все параметры влажного воздуха меняются, для анализа этих процессов недостаточно использовать методы термодинамики идеального газа, которые применяются для анализа смесей постоянного состава.

Термодинамическая система, находящаяся в состоянии равновесия, характеризуется определенными значениями параметров состояния: давлением, температурой и удельным объемом. Уравнение состояния, устанавливающее связь между этими параметрами, именуется термическим уравнением.

На сегодняшний день известно более 150 уравнений состояния, полученных отечественными и зарубежными учеными: уравнения Гирна, Дюпре, Ван-дер-Ваальса, Бачинского, Линде, Планка, Молье, Яцына, Вукаловича и Новикова, Васильева, Вроблевского, Шиллера, Клаузиуса, Бертелло, Дитеричи, Воли, Ван-Лаара, Каллендара, Битти и Бриджмена, Каммерлинг-Оннеса, Майера, Боголюбова и др. Часть полученных уравнений является уточнением уравнения Ван-дер-Ваальса, другие получены экспериментально [1–4].

**Материалы и методы.** Свойства паровоздушной смеси зависят от количественного состава ее компонентов. При незначительном содержании водяного пара или невысоких давлениях смесь обладает свойствами, близкими к свойствам идеального газа. При нормальных условиях компоненты влажного воздуха ведут себя как идеальные газы [5]. В связи с этим в ряде случаев для определения его параметров можно использовать уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$pv = RT, \quad (1)$$

где  $p$  – давление газа, Па;  $v$  – удельный объем газа, м<sup>3</sup>/кг;  $T$  – температура газа, К;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(кг·К).

Наличие во влажном воздухе составляющей, способной при понижении температуры переходить в жидкую или твердую фазу и выделяться из смеси, вызывает

различное поведение сухого и влажного воздуха в тепловых процессах.

Современная теория уравнения состояния реальных газов базируется на принципиальных положениях теории Ван-дер-Ваальса. Наиболее полно вопросы, связанные с уравнением состояния реальных газов, были проработаны в трудах Майера и его сотрудников. Существенный вклад в изучение данной темы также внес наш соотечественник Н. Боголюбов.

Уравнение Ван-дер-Ваальса является результатом попыток получить характеристическое уравнение на основании умозаключений, вытекающих из представлений о строении вещества. Вычисление постоянных коэффициентов опытным путем придает ему эмпирический характер.

Уравнение Ван-дер-Ваальса имеет вид [6]

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT, \quad (2)$$

где  $a$ ,  $b$  – поправки уравнения Ван-дер-Ваальса, Н·м<sup>4</sup>/кг<sup>2</sup>, м<sup>3</sup>/кг.

Для каждого газа поправки рассчитываются индивидуально, они зависят от критических параметров газа:

$$a = \frac{27 \cdot R^2 T_{кр}^2}{64 \cdot p_{кр}}; \quad (3)$$

$$b = \frac{R T_{кр}}{8 \cdot p_{кр}}, \quad (4)$$

где  $T_{кр}$  – критическая температура, К;  $p_{кр}$  – критическое давление, Па.

Внесение поправки  $a/v^2$  позволяет учесть внутреннее давление, определяемое взаимным притяжением молекул газа,  $b$  – это поправка на объем самих молекул [7].

В соответствии с теорией Ван-дер-Ваальса, в каждый данный момент сталкивается только одна пара молекул. Данное уравнение справедливо для таких состояний газа, при которых общий объем, занимаемый газом, во много раз превышает собственный объем молекул газа. Степень разреженности газа должна быть такой, чтобы тройные и более сложные столкновения молекул отсутствовали. Условия применения данного уравнения ограничены, его целесообразно использовать при сравнительно высоких температурах. Соответственно, уравнение Ван-дер-Ваальса применительно только к тем состояниям реального газа, которые незначительно отличаются от идеального.

Уравнение Ван-дер-Ваальса не отвечает действительному переходу от газа к жидкости, т. е. теряет свою силу в области фазовых превращений. Значения  $P$  и  $v$ , полученные из уравнения Ван-дер-Ваальса для любых состояний реальных газов, практически всегда являются большими по сравнению со значениями, полученными экспериментально. Данная закономерность наблюдается в основном в области насыщенных и ненасыщенных паров. Полученная зависимость не дает количественных результатов, точность которых достаточна для практических целей. В связи с этим последующие работы исследователей в этой области заключались в попытках получить уравнение состояния реального газа эмпирическим путем.

Эмпирические уравнения хотя и дают часто достаточно точные результаты, но в большинстве случаев они получены для конкретного вещества, что лишает их общности, которой обладают уравнения, полученные на основе представлений о строении вещества.

Стремление получить более точное уравнение, учитывающее, в том числе, и строение вещества, привело к необходимости дальнейшего использования уравнения Ван-дер-Ваальса. Одним из ученых, продолживших данную работу, стал профессор В.П. Вукалович, который смог учесть помимо влияния сил сцепления и объема самих молекул их ассоциацию, заключающуюся в объединении одиночных молекул в двойные, тройные и тому подобные сложные соединения. Если учитывать ассоциацию, то газ является не однородным, а смесью газов, состоящей из одиночных, двойных, тройных и т.д. молекул.

Уравнение Вукаловича, в котором принята во внимание ассоциация только с образованием двойных молекул, имеет вид

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \left(1 - \frac{Cp}{T^{\frac{5+2m}{2}}}\right), \quad (5)$$

где  $C$  – константа;  $m$  – величина, определяющая свойства двойной молекулы.

Позднее, в 1939 году, совместно с профессором И.И. Новиковым было получено новое уравнение, которое было взято за основу при создании первых таблиц воды и водяного пара, выпущенных в 1940 г. М.П. Вукаловичем. Совместными усилиями ученых уравнение было существенно уточ-

нено, пределы его применения значительно расширены, и оно обрело вид

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT \left(1 - \frac{C}{v T^{\frac{3+2m}{2}}}\right), \quad (6)$$

где  $C$ ,  $m$  – постоянные, определяемые на основании опытных данных.

Термодинамическая система, представляющая собой смесь пара и сухого воздуха, является реальным газом в том случае, когда в ней содержится достаточно большое количество паров воды, близких к состоянию насыщения. Соответственно, применение законов идеальных газов дает существенную погрешность, величина которой возрастает с увеличением количества пара, находящегося в этой смеси, так как водяной пар является реальным газом.

Одним из наиболее часто используемых уравнений состояния реальных газов является уравнение Молье, в соответствии с которым удельный объем вещества может быть определен по формуле

$$v = \frac{RT}{p} - \frac{b}{(T/100)^2} - \frac{cp^2}{(T/100)^{13,5}}, \quad (7)$$

где  $b$ ,  $c$  – константы уравнения Молье для водяного пара:  $b = 1,45 \text{ К}^2 \cdot \text{м}^3/\text{кг}$ ,  $c = 5,8 \text{ м}^7 \cdot \text{К}^2/(\text{кг} \cdot \text{Н}^2)$ .

Для решения практических задач важным аспектом является выбор уравнения состояния, на основании которого будет проводиться определение параметров состояния вещества.

**Результаты.** Рассмотрим три термических уравнения состояния при параметрах водяного пара ниже критической точки ( $p_{кр} = 22,11 \text{ МПа}$ ;  $T_{кр} = 647,3 \text{ К}$ ).

Уравнение Менделеева-Клапейрона описывает модель идеального газа, в которой пренебрегают силами межмолекулярного взаимодействия и размерами молекул. В результате проведенного исследования установлено, что при использовании модели идеального газа при определении параметров состояния водяного пара с повышением давления и увеличением температуры погрешность возрастает (рис. 1). При этом за эталонные значения параметров состояния принимаются табличные значения [8]. В диапазоне температур от 0 до 100 °С данное уравнение вполне применимо, так как погрешность, полученная при расчете, в данном случае не превышает 1,5 %, что позволяет пользоваться им при

определении параметров воздуха при проектировании систем кондиционирования и вентиляции. При дальнейшем повышении температуры и давления отклонение увеличивается, при этом возрастание носит параболический характер и достигает при критических параметрах 75 %.

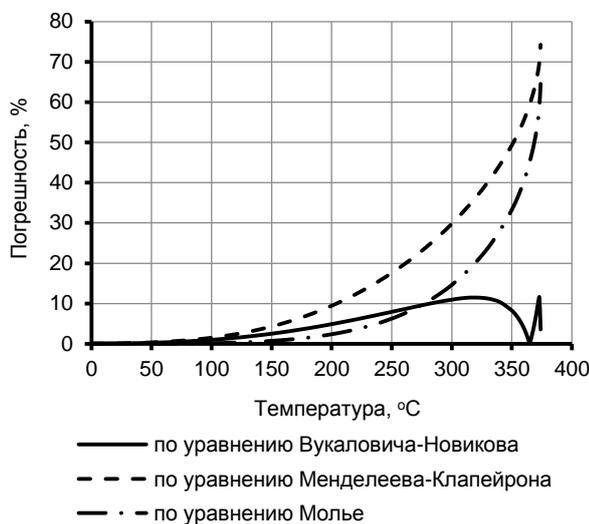


Рис. 1. Зависимость величины средних относительных отклонений параметров состояния сухого насыщенного водяного пара от его температуры

Свойства реальных газов тем больше отклоняются от свойств идеальных, чем выше плотность газа и ниже его температура. Отклонение особенно велико в области изменения агрегатного состояния. Водяной пар, находящийся в воздухе, в состоянии, близком к насыщению, не может быть отнесен к идеальным газам.

Уравнение Молье достаточно хорошо учитывает свойства водяного пара, относится к классу уравнений, в которых поправка к объему дается как функция давления и температуры. В результате выполненных расчетов установлено, что оно позволяет более точно определять параметры водяного пара в диапазоне температур от 0 до 270 °C, с дальнейшим изменением температуры погрешность возрастает, а при приближении к критическим параметрам резко увеличивается и достигает 65 %.

Показано, что наибольшую сходимость между параметрами состояния дает уравнение Вукаловича-Новикова, оно позволяет получать достаточно точные значения в диапазоне температур от 0 °C до  $T_{кр}$ , однако при температурах менее 270 °C по

своей точности оно уступает уравнению Молье. На начальном участке погрешность в определении параметров увеличивается, и это происходит вплоть до температуры 320 °C, в дальнейшем по мере приближения к  $T_{кр}$  погрешность снижается, а затем резко возрастает и вновь падает.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что влияние ассоциации, возникающей между молекулами газа, возрастает с повышением температуры и давления водяного пара, влияние межмолекулярного взаимодействия также усиливается. Уравнения Молье и Вукаловича-Новикова в определенных пределах дают достаточно точные результаты, при более низких температурах целесообразно использовать первое, с возрастанием температуры необходимо обратиться ко второму уравнению.

Анализ зависимостей, описывающих процессы массообмена, показывает, что в качестве движущей силы массообмена наиболее часто используют разность влагосодержания газа [9]. В связи с этим значимым является корректное определение влагосодержания газов.

В соответствии с уравнением Менделеева-Клапейрона для водяного пара, расчетное выражение для влагосодержания влажного воздуха имеет вид

$$d_u = \frac{R_{св}}{R_n} \frac{p_n}{p_{св}},$$

где  $R_{св}$  – газовая постоянная сухого воздуха, Дж/(кг·К);  $p_n$  – парциальное давление пара, Па;  $p_{св}$  – парциальное давление сухого воздуха, Па.

При этом в расчетах можно принимать, что газовая постоянная остается неизменной, в связи с тем что ее значение изменяется незначительно.

В соответствии с тем, что молекулярная масса водяного пара составляет 18,016 г/моль, его газовая постоянная равна 461,479 Дж/(моль·К).

Рассмотрим уравнение Вукаловича-Новикова применительно к водяному пару, содержащемуся во влажном воздухе. Умножая обе части равенства (6) на массу пара  $m_n$ , учитывая, что объем пара  $V = v_n m_n$ , где  $v_n$  – удельный объем пара, м<sup>3</sup>/кг, после раскрытия скобок и преобразования получим

$$V \left( \rho_n - \frac{\rho_n b}{v_n} + \frac{a}{v_n^2} - \frac{ab}{v_n^3} \right) \left( 1 - \frac{c}{v_n T^{\frac{3+2m}{2}}} \right) = m_n R_n T. \quad (8)$$

Разделив правую и левую части уравнения (6) на соответствующие части уравнения Менделеева-Клапейрона (1) для сухого воздуха, свойства которого близки к свойствам идеального газа, получим выражение для определения действительного влагосодержания влажного воздуха:

$$d_d = \frac{R_{св}}{R_n} \frac{\rho_n}{\rho_{св}} \left( \frac{1 - \frac{b}{v_n} + \frac{a}{\rho_n v_n^2} - \frac{ab}{\rho_n v_n^3}}{1 - \frac{c}{v_n T^{\frac{3+2m}{2}}}} \right). \quad (9)$$

Аналогичные преобразования проведем с уравнением Молье (7). В результате получим расчетную формулу для определения влагосодержания:

$$d_d = \frac{R_{св}}{R_n} \frac{\rho_n}{\rho_{св}} \times \left( \frac{R_n T}{0,00461 \cdot T - 1,45 \cdot \rho_n \left( \frac{100}{T} \right)^{3,2} - 5,8 \cdot \rho_n \left( \frac{100}{T} \right)^{13,5}} \right). \quad (10)$$

Определим предельные значения влагосодержаний по уравнениям реального и идеального газов, вычислим относительное отклонение влагосодержаний:

$$\delta = \frac{d_d - d_i}{d_d} \cdot 100 \%. \quad (11)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Относительные отклонения значений предельных влагосодержаний влажного воздуха

Давление смеси 0,1 МПа									
Температура, °С	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Отклонение по уравнению Вукаловича-Новикова	0,012 %	0,022 %	0,036 %	0,058 %	0,089 %	0,136 %	0,199 %	0,284 %	0,395 %
Отклонение по уравнению Молье	0,154 %	0,184 %	0,231 %	0,296 %	0,391 %	0,504 %	0,657 %	0,849 %	1,085 %
Давление смеси 0,5 МПа					Давление смеси 1,5 МПа				
Температура, °С	100	110	120	130	140	150	160	170	180
Отклонение по уравнению Вукаловича-Новикова	0,537 %	0,718 %	0,943 %	1,220 %	1,555 %	1,958 %	2,437 %	3,000 %	3,660 %
Отклонение по уравнению Молье	1,703 %	2,093 %	2,539 %	3,043 %	3,605 %	4,225 %	4,225 %	4,902 %	5,634 %
Давление смеси 3,0 МПа					Давление смеси 6,0 МПа				
Температура, °С	190	200	210	220	230	240	250	260	270
Отклонение по уравнению Вукаловича-Новикова	4,426 %	5,310 %	6,325 %	7,485 %	9,241 %	10,305 %	12,004 %	13,919 %	16,083 %
Отклонение по уравнению Молье	6,420 %	7,258 %	8,143 %	9,073 %	10,604 %	11,056 %	12,102 %	13,181 %	14,289 %
Давление смеси 10,0 МПа					Давление смеси 20,0 МПа				
Температура, °С	280	290	300	310	320	330	340	350	360
Отклонение по уравнению Вукаловича-Новикова	18,528 %	21,273 %	22,480 %	27,894 %	31,841 %	36,336 %	41,485 %	47,458 %	54,845 %
Отклонение по уравнению Молье	15,423 %	16,583 %	17,766 %	18,971 %	20,198 %	21,449 %	22,715 %	24,027 %	25,371 %

Таким образом, относительное отклонение в определении влагосодержания влажного воздуха при атмосферном давлении незначительно и не превышает 1,1 %. В дальнейшем интенсивность увеличения погрешности при меняющихся давлении и температуре возрастает и в области критических параметров достигает 60 %. При определении параметров сжатого влажного воздуха [10] необходимо учитывать тот факт, что он является реальным газом.

Еще раз отметим, что теплофизические свойства влажного воздуха существенно зависят от количества водяного пара, входящего в его состав. В частности, это сказывается на величине изобарной и изохорной теплоемкостей влажного воздуха. С увеличением доли пара удельная массовая теплоемкость возрастает. Численные значения и характер ее изменения представлены на рис. 2.

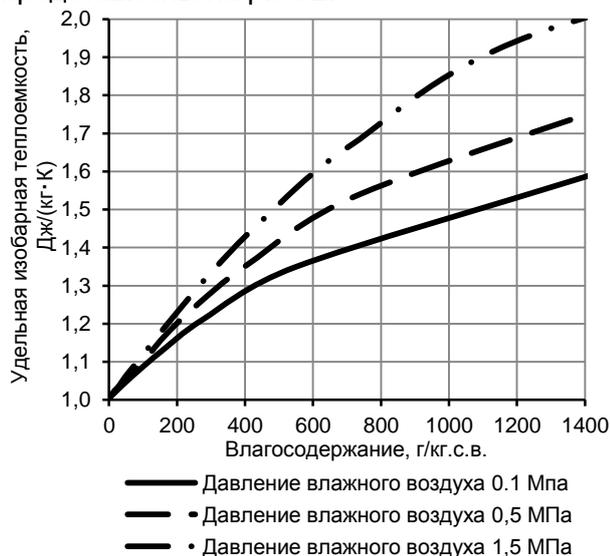


Рис. 2. Изменение удельной изобарной теплоемкости влажного воздуха при постоянном давлении в зависимости от влагосодержания

В рамках исследования по методике, представленной в [11], рассчитаны все теплофизические свойства влажного воздуха.

Таблица 2. Зависимость коэффициентов теплопроводности сухого воздуха, перегретого пара и влажного воздуха от температуры

$T, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$\lambda_{\text{св}} \cdot 10^2$ Вт/(м·К)	2,440	2,510	2,590	2,670	2,760	2,830	2,900	2,960	3,050	3,130	3,210
$\lambda_{\text{п}} \cdot 10^2$ Вт/(м·К)	1,760	1,820	1,880	1,940	2,010	2,090	2,160	2,230	2,310	2,341	2,372
$\lambda_{\text{вв}} \cdot 10^2$ Вт/(м·К)	2,436	2,501	2,574	2,639	2,705	2,738	2,754	2,735	2,703	2,584	2,372

При значительном содержании влаги или высоких температурах удобнее работать с составом смеси, выраженном долевыми концентрациями, весовыми, объемными или мольными долями пара [12]. Для определения действительных теплофизических свойств влажного воздуха целесообразно обращаться с массовыми и объемными паросодержаниями смеси:

$$g_n = \frac{d_d}{d_d + 1}; \quad (12)$$

$$r_n = \frac{d_d}{d_d + R_{\text{св}}/R_n}. \quad (13)$$

Значение коэффициента теплопроводности меняется незначительно при невысоких температурах влажного воздуха. По мере увеличения температуры насыщения и парциального давления водяного пара коэффициент теплопроводности стремится к коэффициенту теплопроводности самого пара, что наглядно видно на значениях, полученных для атмосферного давления (табл. 2). Значение коэффициента динамической вязкости влажного воздуха существенно зависит от объемного паросодержания.

На начальном участке графической зависимости (рис. 3) наблюдается рост динамической вязкости. Это явление обусловлено тем, что влияние свойств водяного пара мало, в дальнейшем, после достижения максимума, это влияние усиливается и приводит к существенному снижению динамической вязкости. Соответственно, в том случае, когда влажный воздух находится в состоянии насыщения и при относительно высокой температуре, необходимо учитывать вклад динамической вязкости водяного пара в значение данной величины. При малых значениях парциальных давлений водяного пара это влияние пренебрежимо мало.

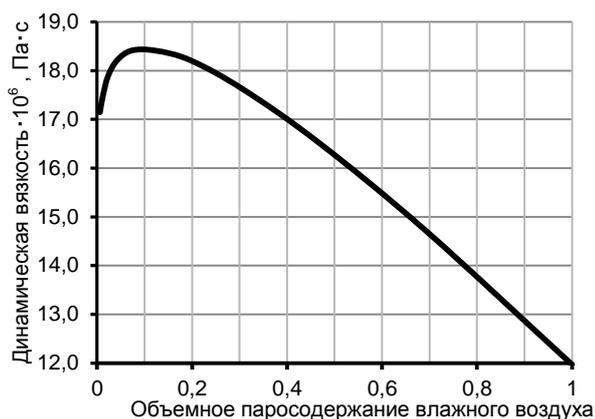


Рис. 3. Зависимость динамической вязкости насыщенного влажного воздуха от объемного паросодержания

При атмосферном давлении с увеличением влагосодержания влажного воздуха его плотность уменьшается в связи с тем, что при данных параметрах водяной пар имеет плотность меньшую, чем сухой воздух. С дальнейшим повышением давления и температуры смеси ее плотность возрастает и, как следствие, уменьшается кинематическая вязкость, связанная с динамической вязкостью соотношением

$$\nu = \mu_{\text{вв}} / \rho_{\text{вв}}, \quad (14)$$

где  $\rho_{\text{вв}}$  — плотность влажного воздуха,  $\text{кг/м}^3$ .

Критерий Прандтля влажного воздуха по мере увеличения температуры возрастает, при этом интенсивность роста увеличивается в области температур, близких к температуре насыщения при данном давлении смеси. В то время как критерий Прандтля для сухого воздуха уменьшается (рис. 4).

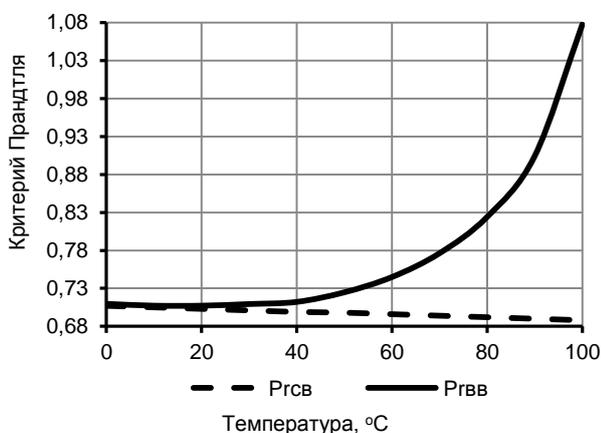


Рис. 4. Зависимость критерия Прандтля для сухого и влажного насыщенного воздуха от температуры

**Выводы.** Результаты проведенного исследования показывают, что при расчете процессов сопряженного теплообмена в диапазоне параметров, характерных для контактных теплообменных аппаратов, гигроскопических опреснительных установок, конвективных сушильных аппаратов, а также при расчете процессов сжатия воздуха в компрессоре с впрыском воды или пара в его промежуточные ступени и процесса расширения в турбинах парогазовых установок с впрыском воды в камеру сгорания необходимо учитывать реальные свойства влажного воздуха, в особенности в том случае, когда речь идет о влажном насыщенном воздухе и параметрах, близких к критическим. Использование в данных обстоятельствах уравнения Менделеева-Клапейрона приводит к существенной погрешности.

#### Список литературы

1. Кочетков А.В., Федотов П.В. Молекулярно-фотонная теория газов. — М.: Мир науки, 2018. — 180 с.
2. Павловский В.А., Мишутинский В.Н., Неверов С.А. Сравнительный анализ различных термических моделей состояния реальных газов // Морские интеллектуальные технологии. — 2015. — № 4-1. — С. 66–70.
3. Павловский В.А., Чистов А.Л. Моделирование динамики заполнения резервуара реальным газом // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. — 2014. — № 3. — С. 46–57.
4. Александров А.А., Орлов К.А. Термодинамические свойства влажного воздуха при высоких давлениях и температуре // Теплоэнергетика. — 2007. — № 7. — С. 36–39.
5. Properties of humid air for calculating power circles / S. Herrmann, H.J. Kretschmar, V. Teske, et. al. // Journal of engineering for gas turbines and power. — 2010. — No. 9. — P. 91–96.
6. Фогельсон Р.Л., Лихачев Е.Р. Уравнение состояния реального газа // Журнал технической физики. — 2004. — № 7. — С. 129–130.
7. Вукалович М.П., Новиков И.И. Термодинамика. — М.: Машиностроение, 1972. — 671 с.
8. Ривкин С.Л., Александров А.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара: справочник. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 80 с.
9. Андреев Е.И. Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах. — Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. — 192 с.

**10. Фаворский О.Н., Бессмертных А.В.**

Пути повышения эффективности конверсионных ГТУ газопарового цикла малой мощности // Теплоэнергетика. – 2005. – № 6. – С. 48–55.

**11. Баранников Н.М.** Расчеты параметров влажного воздуха для пневматических и вентиляционных установок и кондиционеров. – М.: Недра, 1975. – 272 с.

**12. Михайловский Г.А.** Термодинамические расчеты парогазовых смесей. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 184 с.

**References**

1. Kochetkov, A.V., Fedotov, P.V. *Molekulyarno-fotonnaya teoriya gazov* [Molecular and photon theory of gases]. Moscow: Mir nauki, 2018. 180 p.

2. Pavlovskiy, V.A., Mishutinskiy, V.N., Neverov, S.A. *Sravnitel'nyy analiz razlichnykh termicheskikh modeley sostoyaniya real'nykh gazov* [Comparative analysis of the different thermal models of the real gases state]. *Morskije intelektual'nye tekhnologii*, 2015, no. 4-1, pp. 66–70.

3. Pavlovskiy, V.A., Chistov, A.L. *Modelirovanie dinamiki zapolneniya rezervuara real'nym gazom* [Modeling the dynamics of tank filling with real gas]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protsessy upravleniya*, 2014, no. 3, pp. 46–57.

4. Aleksandrov, A.A., Orlov, K.A. *Termodinamicheskie svoystva vlazhnogo vozdukha pri vysokikh davlenii i temperature* [Thermodynamic properties of the moist air at high pressure and temperature]. *Teploenergetika*, 2007, no. 7, pp. 36–39.

5. Herrmann, S., Kretschmar, H.J., Teske, V., Vogel, E., Ulbig, P., Span, R., Gatley, D.P.

Properties of humid air for calculating power circles. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 2010, no. 9, pp. 91–96.

6. Fogel'son, R.L., Likhachev, E.R. *Uravenie sostoyaniya real'nogo gaza* [Real gas state equation]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2004, no. 7, pp. 129–130.

7. Vukalovich, M.P., Novikov, I.I. *Termodinamika* [Thermodynamics]. Moscow: Mashinostroenie, 1972. 671 p.

8. Rivkin, S.L., Aleksandrov, A.A. *Termodinamicheskie svoystva vody i vodyanogo para* [Thermodynamic properties of water and steam]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 80 p.

9. Andreev, E.I. *Raschet teplo- i massoobmena v kontaktnykh apparatakh* [Calculation of heat and mass transfer in contact devices]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1985. 192 p.

10. Favorskiy, O.N., Bessmertnykh, A.V. *Puti povysheniya effektivnosti konversionnykh GTU gazoparovogo tsikla maloy moshchnosti* [Ways to improve the efficiency of conversion GTPs of a gas-steam cycle of low power]. *Teploenergetika*, 2005, no. 6, pp. 48–55.

11. Barannikov, N.M. *Raschety parametrov vlazhnogo vozdukha dlya pnevmaticheskikh i ventilyatsionnykh ustanovok i konditsionerov* [Calculations of moist air parameters for pneumatic and ventilation units and air conditioners]. Moscow: Nedra, 1975. 272 p.

12. Mikhaylovskiy, G.A. *Termodinamicheskie raschety parogazovykh smesey* [Thermodynamic calculations of gas-vapor mixtures]. Leningrad: Energoatomizdat. Leningradskoe otdelenie, 1985. 184 p.