

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые
источники энергии»



НАУКА – ОБРАЗОВАНИЮ, ПРОИЗВОДСТВУ, ЭКОНОМИКЕ

*Материалы 19-й международной научно-технической
конференции*

Семинар «Энергоэффективные технологии»

Минск
БНТУ
2021

УДК 082(476)(06)

ББК 31я43

Э65

Редакционная коллегия:
д-р физ.-мат. наук, профессор *В. Г. Баитовой*;
д-р физ.-мат. наук, профессор *А. Г. Рекс*;
канд. техн. наук, доцент *А. В. Новик*;
канд. техн. наук, доцент *Н. Г. Хутская*;
старший преподаватель *С. В. Климович*

В сборнике представлены материалы семинара «Энергоэффективные технологии», прошедшего в рамках 74-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов Белорусского национального технического университета.

Требования к системе: IBM PC-совместимый ПК стандартной конфигурации, дисковод CD-ROM. Программа работает в среде Windows.

Открытие электронного издания проводится посредством запуска файла МНТК БНТУ-2021. Возможен просмотр электронного издания непосредственно с компакт-диска без предварительного копирования на жесткий диск компьютера.

Дата доступа в сети: 20.08.2021. Объем издания: 1,3 Мб. Заказ 403

Белорусский национальный технический университет

Пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь

Тел (017) 292-40-81, факс (017) 292-91-3

ISBN 978-985-583-666-8

© Белорусский национальный
технический университет, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Баштовой В. Г., Рекс А. Г., Ряполов П. А., Климович С. В., Загадская А. А. Всплывание потока пузырей в магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле	4
Баштовой В. Г., Рекс А. Г., Тарасевич В. С., Лашкевич А. Н. Растворение суспензии магнитных наночастиц в неоднородном магнитном поле.....	8
Любчик О. А. Оценка потенциала энергии движения водных потоков в Республике Беларусь	11
Любчик О. А. Оценка потенциала солнечной энергии в Республике Беларусь	15
Липницкий Л. А., Шалькевич П. К., Климович С. В. Возможности применения светодиодных светильников в тепличном овощеводстве с учетом спектральные требования растений	20
Новик А. В. Изучение влияния спектра излучения на эффективность солнечных фотоэлектрических преобразователей в учебном процессе.....	24
Данильчик Е. С., Сухоцкий А. Б. Исследования конвективной теплоотдачи труб с круглыми алюминиевыми ребрами разной высоты в различных режимах свободной конвекции	27
Жук Н. П. Типичные ошибки при проведении пусконаладочных работ на холодильном оборудовании.....	31
Балабанова О. В., Янцевич И. В. Повышение энергоэффективности системы вентиляции для обеспечения качественного микроклимата в период распространением вирусной инфекции.....	35

Всплывание потока пузырей в магнитной жидкости в неоднородном магнитном поле

Баштовой В. Г.¹, Рекс А. Г.¹, Ряполов П. А.²,

Климович С. В.¹, Загадская А. А.¹

¹Белорусский национальный технический университет

²Юго-западный государственный университет, г. Курск, Россия

Аннотация: Представлены результаты экспериментального исследования влияния горизонтально неоднородного магнитного поля на всплывание потока пузырей воздуха в магнитной жидкости. Установлено горизонтальное отклонение всплывающих пузырей от вертикального направления, получены зависимости отклонения от характеристик магнитного поля и расхода воздуха.

Текст доклада: Данная работа выполнена с целью создания магнитоуправляемых методов переноса тепла в пузырьковых магнитожидкостных системах.

Потоки всплывающих пузырей широко используются для интенсификации теплообмена благодаря высокой эффективности [1]. Всплывающими пузырями интенсивно перемешивается жидкость вблизи теплоотдающей поверхности, и это интенсифицирует теплоотдачу охлаждаемого тела в десятки раз [2]. Интенсивность теплоотдачи зависят от степени перемешивания жидкости, которая зависит от расстояния движения потока пузырей относительно теплоотдающей поверхности.

Магнитоуправляемый перенос тепла в пузырьковых магнитожидкостных системах основан на воздействии неоднородных магнитных полей на форму пузырей в магнитной жидкости и динамику их движения. Воздействие магнитного поля на пузыри может быть реализовано путем создания магнитным полем в объеме магнитной жидкости заданного распределения давления, которое оказывает влияние на траекторию всплывания пузырей.

В работе рассматривается всплывание потока пузырей в объеме магнитной жидкости воздуха вдоль вертикальной теплоотдающей пластины при воздействии горизонтально неоднородного магнитного поля.

Геометрия задачи показана на рисунке 1. В отсутствие магнитного поля поток пузырей всплывает вертикально вдоль поверхности пластины (рисунок 1, *а*). При создании неоднородного магнитного поля постоянным магнитом, как показано на рисунке 1, *б* вертикально всплывающий поток пузырей смещается одновременно и в горизонтальном направлении и его траектория изменяется.

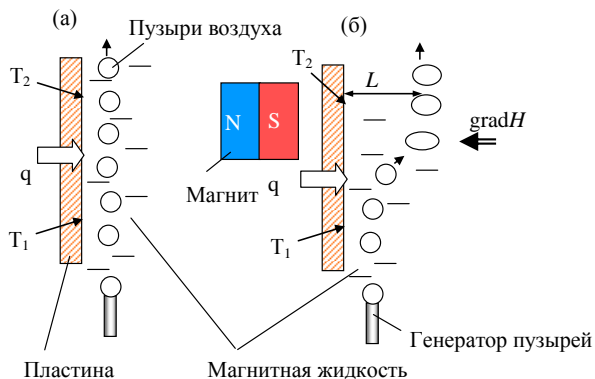


Рис. 1. Геометрия задачи

Направление магнитного поля и его градиента в области всплывающего потока пузырей задается соответствующим расположением магнита и его поворотом.

В экспериментах в качестве источника магнитного поля использовалась система из трех прямоугольных феррит-бариевых магнитов с максимальной напряженностью 115 кА/м.

Характеристики магнитной жидкости ММТ-32 на основе трансформаторного масла приведены в таблице.

Тип жидкости	Намагниченность насыщения M , кА/м	Магнитная концентрация частиц φ , %	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент вязкости η , Па·с
ММТ-32	31,8	6,5	1292	0,0542

Для выполнения исследований магнитная система располагалась выше на некоторой высоте относительно отверстия генератора пузырей. Величина поля и его градиента задавалась путем горизонтального перемещения магнитной системы.

При расположении магнитной системы, как показано на рисунке 1, ось магнита направлена горизонтально. Тогда в области всплывающих пузырей направление напряженности поля тоже горизонтальное.

При повороте магнита на 90° распределение поля в области всплывания пузырей задается его боковой поверхностью, и направление поля в этой области вертикальное.

Созданием заданного направления магнитного поля задается направление деформирования пузырей воздуха в магнитной жидкости [3]. Пузыри приобретают эллипсообразную форму с осью вдоль направления поля. Такое деформирование пузырей изменяет гидродинамическое сопротивление их перемещению в магнитной жидкости [4], что влияет на изменение траектории.

В исследованиях задавались различные расходы воздуха.

В отсутствие магнитного поля поток пузырей всплывает вертикально. При установке магнитна в объеме магнитной жидкости создается локально неоднородное магнитное поле в области всплывающих пузырей и, соответственно, локально неоднородное распределение объемной магнитной силы. В результате в области неоднородности локально повышается давление, и пузыри оттесняются в область более слабого поля, т.е. стремятся отклониться от магнита. Это приводит к горизонтальному отклонению пузырей и изменению их траектории.

Результаты исследования влияния неоднородного магнитного поля на траекторию потока всплывающих пузырей воздуха в магнитной жидкости при различных расходах воздуха показаны на рисунке 2.

С увеличением градиента поля из-за увеличения выталкивающей силы растет величина отклонения пузырей.

На рисунке 2, *а* показаны зависимости горизонтального отклонения пузырей в горизонтальном магнитном поле. При движении в области локального магнитного поля пузыри вытягиваются в горизонтальном направлении вдоль направления отклонения. Они имеют более обтекаемую форму при движении в горизонтальном направлении, и отклонение более значительное и достигает 45 мм.

Горизонтальное отклонение потока пузырей в вертикальном магнитном поле иллюстрируется рисунком 2, *б*. Поскольку пузырь вытянуты в вертикальном направлении, то при горизонтальном перемещении они испытывают более высокое сопротивление, и величина отклонения относительно первоначального положения уменьшается по сравнению с ситуацией горизонтального поля. Этот факт хорошо виден при сравнении экспериментальных зависимостей на рисунках 2, *а* и 2, *б*.

С ростом расхода воздуха отклонение потока пузырей растет из-за увеличения числа расталкивающихся пузырей. Всплывающие вверх немагнитные пузыри в магнитной жидкости при наложении магнитного поля приобретают свойства однонаправленных магнитных антидиполей. Направлены антидиполи вертикально, и поэтому расталкиваются в горизонтальном направлении. Кроме того, проведенными ранее исследованиями [5] показана сложность взаимодействия движущихся в магнитном поле

пузырей, сопровождающаяся делением на несколько частей всплывающих цепочек пузырей. В результате деления поток пузырей также расширяется в горизонтальном направлении.

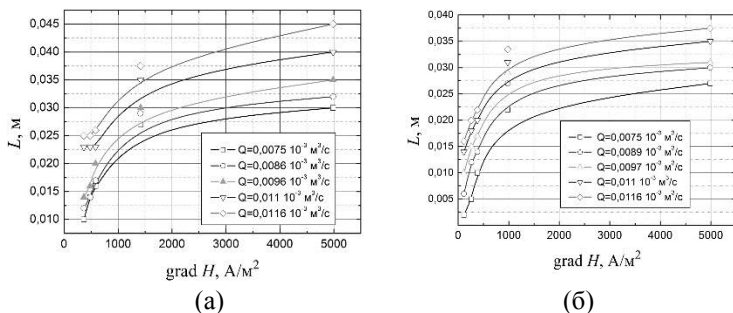


Рис. 2. Влияние градиента напряженности магнитного поля на горизонтальное смещение всплывающих пузырей: направление поля (а) – горизонтальное, (б) – вертикальное

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований Республики Беларусь.

Литература

1. Кутателадзе, С. С. Теплообмен и волны в газожидкостных системах / С. С.Кутателадзе, В. Е. Накоряков – Новосибирск: Наука, 1964. – 302 с.
2. Авдеев, А.А. Закономерности теплообмена в барботажном слое / А. А. Авдеев // Теплофизика высоких температур. – 1992. – т. 30, № 5. – С. 966–974.
3. Баштовой В. Г., Берковский Б. М., Вислович А. Н. Введение в термомеханику магнитных жидкостей. – М.: ИВТАН СССР, 1985. – 188 с.
4. Берковский, Б. М. Гидродинамическое сопротивление эллипсоидальной капли при малых числах Рейнольдса /Б.М.Берковский, М. С. Краков, И. В. Никифоров, В. К. Полевиков //Изв. АН СССР. Механикажидкостии-газа. – 1987. – № 3. – С. 4–8.
5. Bashtovoi, V. Instabilities of bubbles and droplets flows in magnetic fluids /V. Bashtovoi, M. Kovalev, A. Reks //J. Magnetism and Magnetic Materials. – 2005. – Vol. 289. – P. 350–352.

Растворение суспензии магнитных наночастиц в неоднородном магнитном поле

Баштовой В. Г., Рекс А. Г., Тарасевич В. С. Лашкевич А. Н.
Белорусский национальный технический университет

Аннотация: Представлены результаты экспериментального исследования влияния растворения высоко концентрированных ограниченных объемов магнитной жидкости за счет преобладающего магнитофоретического переноса массы частиц в сильно неоднородном магнитном поле с большой напряженностью и обратного процесса диффузионного массопереноса из более концентрированной области в область с меньшей концентрацией с уменьшением напряженности магнитного поля.

Текст доклада: Одним из ярких представителей магнитных нанодисперсных суспензий являются магнитные жидкости, обладающие сочетанием таких свойств как текучесть и способность намагничиваться. Благодаря этим свойствам магнитные жидкости находят применение в разнообразных технических устройствах [1].

Как показано в работах [2–4], несмотря на специальные меры по стабилизации магнитных жидкостей поверхностно-активными веществами, естественными процессами массопереноса в них являются магнитофорез и броуновская диффузия магнитных частиц в неоднородном магнитном поле. В результате этих процессов концентрация частиц увеличивается в областях с большей напряженностью магнитного поля. Перераспределение концентрации магнитных частиц приводит к неоднородности их магнитных и теплофизических характеристик. Как результат, это оказывает влияние на стабильность параметров устройств, использующих магнитные жидкости в качестве рабочей среды.

Основное внимание в существующих исследованиях уделено главенствующей роли магнитофоретических процессов, инициирующих массоперенос в изначально однородных магнитных жидкостях под действием неоднородных магнитных полей.

Основной отличительной особенностью рассматриваемого в настоящей работе процесса растворения магнитных жидкостей является существенное превалирование процессов диффузии над процессами магнитофореза при помещении объема магнитной жидкости с высокой концентрацией частиц в жидкость такого же химического состава, но с гораздо меньшей их концентрацией.

Внешние магнитные поля создают эффективные механизмы управления растворением суспензий нанодисперсных магнитных частиц в различных жидкостях за счет возможности регулирования процессов магнитофореза, броуновской диффузии магнитных частиц и фазовых переходов в них.

Предлагаемая экспериментальная методика исследования процесса растворения магнитной жидкости заключается в создании на первом этапе высоко концентрированных ограниченных объемов жидкости из первоначально однородной жидкости за счет преобладающего магнитофоретического переноса массы частиц в сильно неоднородном магнитном поле с большой напряженностью, а затем в рассмотрении обратного процесса диффузионного массопереноса из более концентрированной области в область с меньшей концентрацией при существенном (вплоть до нуля) уменьшении напряженности магнитного поля.

Экспериментальное исследование этих процессов было выполнено на установке, фотография и схема которой представлены ниже на рисунке 1, результаты экспериментов представлены на рисунке 2.

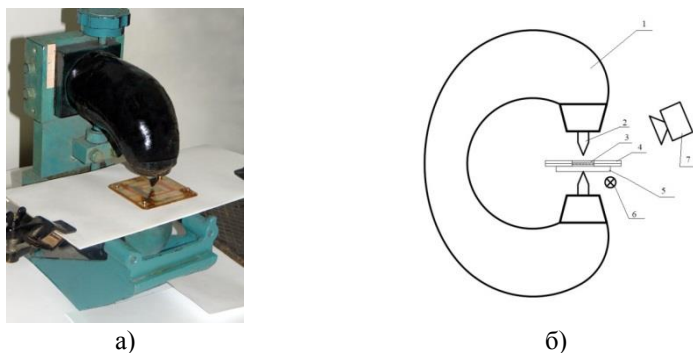


Рис. 1. Фотография а) и схема б) экспериментальной установки:
 1 – подковообразный постоянный магнит, 2 – концентраторы магнитного поля,
 3 – слой суспензии наночастиц, 4 – прозрачная кювета, 5 – опора, 6 – источник
 света, 7 – фотокамера

Как видно из представленных выше фотографий в сильном магнитном поле идет сравнительно быстрый процесс магнитофореза, приводящий к существенному повышению концентрации частиц под полюсом магнита вплоть до их практического полного выделения из жидкости-носителя (рисунк 2, б). При значительном понижении напряженности магнитного поля происходит гораздо более медленный обратный процесс растворения

концентрированной области в слабо концентрированную окружающую среду (рисунок 2, в).

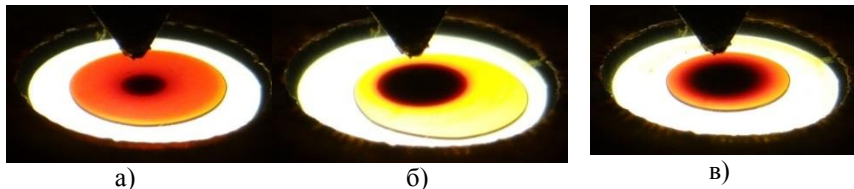


Рис. 2. Перераспределение концентрации магнитных наночастиц в суспензии в неоднородном магнитном поле разной напряженности:
1 – Исходная однородная суспензия в сильно неоднородном магнитном поле большой напряженности ($H = 550$ кА/м) в начальный момент времени, 2 – она же через 24 часа пребывания в этом поле, 3 – она же через 48 часов после (2) в магнитном поле с пониженной напряженностью ($H = 240$ кА/м)

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь (Т МС20-015).

Литература

1. Bashtovoi V. G., Berkovsky B. M., Vislovich A. N. An Introduction to Thermomechanics of Magnetic Fluids, Hemisphere Publ. Corp. – 1988, Washington. – 190 p.p.
2. Bashtovoi, V. G. The effect of diffusion processes on the statics of magnetic fluids / V. G. Bashtovoi, V. K. Polevikov, A. M. Algadal // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. – 2006. – No 3. P. 42–48.
3. Bashtovoi, V. G. Influence of Brownian Diffusion on the Statics of Magnetic Fluid / V.G.Bashtovoi [and others]. – Magnetohydrodynamics. – 2007. – Vol.43, No 1. – P. 3–11.
4. Баштовой, В. Г. Процессы диффузионного и магнитофоретического массопереноса в нанодисперсных магнитных жидкостях с фазовыми переходами / В. Г. Баштовой [и др.] // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия «физико-технических наук». – 2017. – № 2. – С. 78–87.
5. Bashtovoi, V. On the mechanics of magnetic fluids with field-induced phase transition: application to Couette flow / V. G. Bashtovoi, P. P. Kuzhir, A.Y. Zubarev, V. S. Moroz // Magnetohydrodynamics. – 2018. – V. 54, No 3. – P.181–197.

**Оценка потенциала энергии движения водных потоков
в Республике Беларусь**

Любчик О. А.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация: В статье производится расчет теоретического и технически возможного потенциала энергии движения водных потоков в Республике Беларусь. Дается оценка возможного объема выработки электроэнергии в стране на гидроэлектростанциях. Оценивается влияние реализации потенциала энергии движения водных потоков на энергетическую безопасность Республики Беларусь.

Текст доклада: Теоретическая мощность всех водотоков Республики Беларусь в Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь определена на уровне 850 МВт, из них технически доступная – 520 МВт, экономически целесообразная – 250 МВт. В [1] технически доступный потенциал оценивается не менее 400 МВт с ежегодной выработкой 1050–1200 млн кВт·ч. В Стратегии развития энергетического потенциала Республики Беларусь отмечено, что реализация проектов по строительству ГЭС мощностью 120 МВт позволит выработать до 600 млн кВт·ч, что эквивалентно замещению 205 тыс. т у.т. Также ожидалось, что реконструкция и строительство гидроэлектростанций, предусмотренных в Государственной программе строительства в 2011–2015 годах гидроэлектростанций в Республике Беларусь, годовая выработка электроэнергии к 2015 году может достичь 510 млн кВт·ч и заместить 140 тыс. т у.т. Однако фактически выработка в 2015 г. составила только 107 млн кВт·ч, а запланированное значение не достигнуто до настоящего времени. По состоянию на 2020 год установленная мощность гидроэлектростанций в Республике Беларусь составила 96 МВт, что позволило выработать в 2019 году 348 млн кВт·ч [2].

В Республике Беларусь преобладает равнинный рельеф, что не позволяет рассматривать крупную гидроэнергетику как источник энергии по причинам низкого напора водных потоков, а также затопления и подтопления значительных территорий. Однако развитие малой гидроэнергетики имеет перспективы в Республике Беларусь.

Теоретический потенциал движения водных потоков определяется формулой:

$$P_{\text{теор}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot 8760,$$

где ρ – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; Q – расход воды водотока, $\text{м}^3/\text{с}$; H – располагаемый напор воды, м.

Значения речного стока и падения крупнейших рек Республики Беларусь на территории страны представлен в таблице 1 [3–5]. Теоретический потенциал определен с учетом максимального и фактического за 2016 год [5] безвозвратного потребления воды из рек и также представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Теоретический потенциал энергии движения водных потоков в Республики Беларусь

Река	Речной сток, $\text{км}^3/\text{год}$	Падение реки, м	Безвозвратное потребление воды, $\text{км}^3/\text{год}$		Средняя мощность водотока, МВт	Теоретический потенциал, млн кВт·ч
			макс.	факт.		
Зап. Двина	6,8	46	0,16	0,017	95–97	831,5–849,4
Неман	6,6	63	0,10	0,145	126–127	1107,0–1114,8
Виляя	2,3	29	0,28	0	18,2–20,7	159,5–181,6
Зап. Буг	1,4	33	0,05	0,017	13,8–14,2	121,3–124,2
Днепр	11,3	54	0,28	0,034	185–189	1619,9–1656,1
Березина	4,5	69	0	0	96–97	845,3–846,4
Сож	3,0	41	0,12	0	37–38	321,4–334,8
Припять	5,6	30	0,30	0,029	49–52	432,8–455,0
Всего:	41,5	–	1,29	0,242	622–634	5446,4–5553,4

На территории страны существует большое количество потенциальных точек для размещения малых гидроэлектростанций. В последнее время был проведен ряд достаточно тщательных научных исследований по оценке мощности водотоков в таких точках.

В исследовании Центрального научно-исследовательского института комплексного использования водных ресурсов, о результатах которого было объявлено в [6] и на основе которого была создана карта потенциальных площадок для размещения гидроэлектростанций, было определено 1170 перспективных площадок на 267 реках Республики Беларусь. На данных площадках возможно установить гидроэлектростанции суммарной мощностью 294 МВт. Учитывая уже функционирующие и планируемые к размещению гидроэлектростанции, мощность водотоков, пригодных для получения энергии оценивается в 441 МВт. В указанном исследовании учтены влияние изменений климата на сток рек, исключены из рассмотрения особо охраняемые природные территории и площадки, недоступные в связи с потенциальным ущербом для окружающей среды вследствие стро-

ительства на них гидроэлектростанции. Ранее было проведено независимое исследование [7], где также был выявлен перечень наиболее перспективных площадок для размещения гидроэлектростанций. Суммарная мощность водотоков, где уже размещены гидроэлектростанции, либо могут быть размещены в будущем, в разрезе областей представлена в таблице 2.

Таблица 2 – Оценка потенциала водотоков в Республике Беларусь, пригодных для размещения гидроэлектростанций

Область	Мощность водотоков, МВт
Брестская	3,3
Гомельская	39,4
Гродненская	81,6
Минская	20,0
Могилевская	33,1
Витебская	161,6
Итого:	339,1

Мощность водотоков, технически возможную для использования в проектах гидроэнергетики, можно оценить в 339 441 МВт. Полная реализация названной мощности при эффективности преобразования, равной единице, позволит произвести 2970–3863 млн кВт·ч. С учетом коэффициента полезного действия, равного 50 %, гидроэлектростанции, при полной реализации технически возможного потенциала, позволят произвести 1485–1932 млн кВт·ч электрической энергии ежегодно.

Таким образом, на основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- теоретический потенциал энергии движения водных потоков в Республике Беларусь можно оценить 5446–5553 млн кВт·ч, что эквивалентно 669,9–683,1 тыс. т у.т.; технически возможный потенциал составляет 2970–3863 млн кВт·ч или 365,3–475,2 тыс. т у.т.;

- полное освоение технически возможного потенциала энергии движения водных потоков с учетом эффективности современных мини-гидроэлектростанций позволит произвести 1485–1932 млн кВт·ч электрической энергии в год, что с учетом затрат топлива на производство электрической энергии на предприятиях ГПО «Белэнерго», эквивалентно замещению 354–460 тыс. т у.т. или 307,9–400,6 млн м³ природного газа в год.

- кроме того, полное освоение технически возможного потенциала энергии движения водных потоков с учетом вышеназванной эффективности позволит заместить 1–2 % потребляемых в Республике Беларусь топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), около 2 % ТЭР, расходуемых в

стране на получение тепловой и электрической энергии, или покрыть 4–5 % потребности в электрической энергии в стране по состоянию на 2020 г.

– также будет иметь место повышение энергетической безопасности страны, что численно может быть выражено в увеличении значений индикаторов блока «Энергетическая самостоятельность»: № 1 «Отношение объема производства (добычи) первичной энергии к валовому потреблению ТЭР» и № 2 «Отношение объема производства (добычи) первичной энергии из возобновляемых источников энергии к валовому потреблению ТЭР», каждого на 1–2 %, и снижении значения индикатора блока «Диверсификация поставщиков и видов энергоресурсов» № 4 «Доля доминирующего вида топлива в валовом потреблении ТЭР» также на 1–2 %.

Литература

1. Кундас, С. П. Возобновляемые источники энергии: монография / С. П. Кундас, С. С. Позняк, Л. В. Шенец; МГЭУ им. Сахарова. – Минск: МГЭУим. А.Д. Сахарова, 2003. – 315 с.

2. Hydropower [Electronic resource]. – Mode of access: <https://www.irena.org/hydropower> – Date of access: 29.04.2021.

3. Реки Беларуси (часть вторая) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ggcbs.gomel.by/templates/ggcbs/images/ecology/3853.pdf> – Дата доступа: 28.03.2021.

4. Расчет высоты профиля рельефа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://antenna102.ru/pages/perepad_vysot_po_marshrutu.php – Дата доступа: 28.03.2021.

5. Государственный водный кадастр [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.cricuwr.by/static/files/cadastr_2016.pdf – Дата доступа: 28.03.2021.

6. Эксперты оценили гидроэнергетический потенциал малых и средних рек Беларуси [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belta.by/economics/view/eksperty-otsenili-gidroenergeticheskij-potentsial-malyh-i-srednih-rek-belarusi-426126-2021/> – Дата доступа: 30.03.2021.

7. Зорина, Т. Г. Возможности развития гидроэнергетики в Республике Беларусь / Т. Г. Зорина // Менеджмент и маркетинг: опыт и проблемы : сб. науч. тр. / Белорус. гос. экон. ун-т ; под общ. ред. И. Л. Акулича. – Минск, 2015. – С. 176–179.

Оценка потенциала солнечной энергии в Республике Беларусь

Любчик О. А.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация: В статье производится расчет теоретического и технически возможного потенциала солнечной энергии в Республике Беларусь на основе метеорологических данных об удельном поступлении солнечной радиации на территорию страны. Дается оценка возможного объема выработки электроэнергии при помощи солнечных батарей. Оценивается влияние реализации потенциала солнечной энергии на энергетическую безопасность Республики Беларусь.

Текст доклада: По мнению многих экспертов, в группе возобновляемых источников энергии солнечная энергетика обладает наибольшим, в разы превышающим иные ВИЭ, потенциалом в Республике Беларусь. В то же время в некоторых источниках отмечалось, что климатические условия страны позволяют использовать энергию солнца преимущественно для производства тепловой энергии [1]. Потенциал получения тепловой энергии при помощи гелиоводонагревателей оценивался в размере до 10 тыс. т у.т. [1]. Однако повышение эффективности солнечных батарей и наличие в настоящее время моделей, позволяющих производить электроэнергию под воздействием как прямой, так и рассеянной солнечной радиации, расширяет возможности использования энергии солнца для энергетических целей в Республике Беларусь. В работе [2] теоретический потенциал солнечной энергетики был оценен в 1000 млрд кВт·ч или 123 млн т у.т., технически возможный – 150–250 млрд кВт·ч или 18–31 млн т у.т.

Согласно метеорологическим наблюдениям, среднегодовой поступление солнечной радиации на территорию Республики Беларусь составляет 2,8 кВт·ч/м² [3]. Интенсивность поступления радиации неравномерна на территории страны и зависит от географической широты и средней облачности. Согласно количеству поступающей от солнца энергии территорию страны можно подразделить на радиационно-климатические пояса, примеры которых приведены на рисунках 1 и 2.

Теоретическим потенциалом для солнечной энергетики является вся солнечная энергия, поступающая на территорию страны. При помощи карт годового поступления солнечной энергии (рисунки 1 и 2) были определены площади областей с равным диапазоном среднегодового поступления энергии от солнца. В таблицах 1 и 2 приведен расчет, позволяющий получить значение теоретического потенциала солнечной энергии.

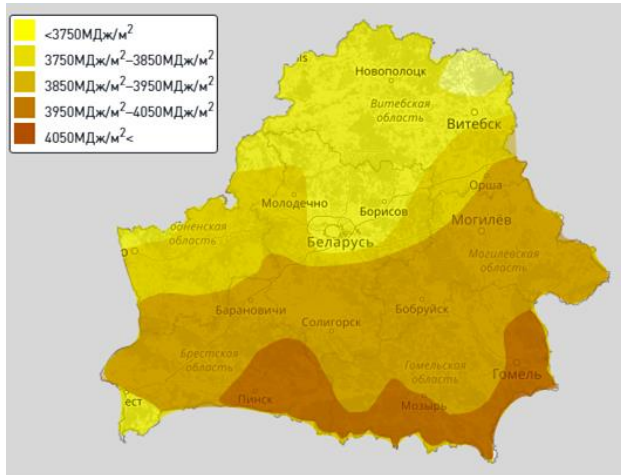


Рис. 1. Годовая суммарная солнечная радиация, МДж/м² (вариант 1) [3]

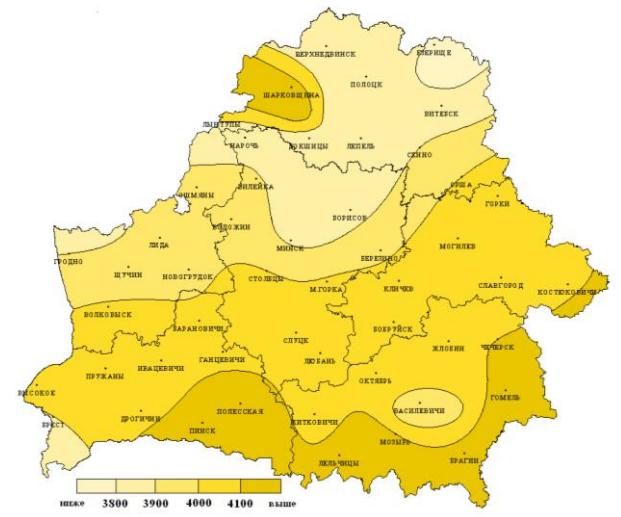


Рис. 2. Годовая суммарная солнечная радиация, МДж/м² (вариант 2) [4]

Таблица 1 – Поступление солнечной энергии на территорию Республики Беларусь (вариант 1)

Пояс	1	2	3	4	5
Размер области, тыс. км ²	3,1	49,2	35,4	95	24,9
Среднегодовой поток солнечного излучения, МДж/м ²	3700	3800	3900	4000	4050
Приход солнечной энергии на весь участок, млрд МДж	11 470	186 960	138 060	380 000	100 845
Приход солнечной энергии на весь участок, млн т у.т.	391	6381	4712	12 969	3442
Приход солнечной энергии на весь участок, млрд кВт·ч	3189	51 975	38 381	105 640	28 035

Таблица 2 – Поступление солнечной энергии на территорию Республики Беларусь (вариант 2)

Пояс	1	2	3	4	5
Размер области, тыс. км ²	3,4	42,1	36,7	93,7	31,7
Среднегодовой поток солнечного излучения, МДж/м ²	3750	3850	3950	4050	4150
Приход солнечной энергии на весь участок, млрд МДж	12750	162 085	144 965	379 485	131 555
Приход солнечной энергии на весь участок, млн т у.т.	435	5532	4948	12 952	4490
Приход солнечной энергии на весь участок, млрд кВт·ч	3545	45 060	40 300	105 497	36 572

Исходя из расчетов суммарно за год на территорию страны поступает 227,2–231,0 трлн. кВт·ч энергии от солнца, что эквивалентно 27,9–28,4 млрд т у.т.

Альтернативные оценки могут быть получены на основе данных Глобального солнечного атласа, согласно которому, на территорию Республики Беларусь приходится от 1040 до 1090 кВт·ч/м² солнечного излучения в течение года. При такой оценке годовой приход энергии от солнца на всю территорию страны будет равен 215,9–226,3 трлн. кВт·ч, что эквивалентно 26,5–27,8 млрд т у.т. и сопоставимо с полученными ранее данными.

Полностью теоретический потенциал реализовать не представляется возможным, так как для установки преобразователей солнечной энергии в таком случае потребуется использовать всю территорию страны. Согласно [2], под солнечные установки можно использовать от 1 до 10 % неис-

пользуемых земель. Для расчета примем диапазон от 4 до 6 %. Площадь неиспользуемых земель, по данным Главного информационно-аналитического центра Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь, составляет 2,0 % территории страны и равна 415,5 тыс. га [5]. Исходя из принятых ограничений, технически возможный потенциал солнечной энергии в Республике Беларусь можно оценить как:

$$P_{\text{техн}} = P_{\text{теор}} \cdot \varphi_{\text{неисп}} \cdot \varphi_{PV},$$

где $P_{\text{теор}}$ – теоретический потенциал солнечной энергии, млрд кВт·ч.;
 $\varphi_{\text{неисп}}$ – доля неиспользуемых земель в территории страны;
 φ_{PV} – доля неиспользуемых земель, которую можно занять солнечными установками.

Минимальный и максимальный технически возможный потенциал солнечной энергии составит:

$$P_{\text{техн}}^{\text{мин}} = 215,9 \cdot 10^3 \cdot 0,02 \cdot 0,04 = 173 \text{ млрд кВт}\cdot\text{ч};$$

$$P_{\text{техн}}^{\text{макс}} = 226,3 \cdot 10^3 \cdot 0,02 \cdot 0,06 = 277 \text{ млрд кВт}\cdot\text{ч}.$$

С учетом коэффициента преобразования солнечной энергии в электрическую в размере 20 %, с использованием солнечной энергии в Республике Беларусь может быть выработано 34,5–55,4 млрд кВт·ч электрической энергии.

Таким образом, на основании проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- теоретический потенциал энергии солнца в Республике Беларусь можно оценить 215,9–231,0 трлн. кВт·ч/год, что эквивалентно 26,5–28,4 млрд т у.т./год; технически возможный потенциал составляет 173–277 млрд кВт·ч/год или 21,2–34,0 млн т у.т./год;

- полное освоение технически возможного потенциала энергии солнца с учетом эффективности солнечных батарей в размере 20 % позволит произвести 34,5–55,4 млрд кВт·ч/год электрической энергии в год, что с учетом эффективности производства электрической энергии на предприятиях ГПО «Белэнерго», эквивалентно замещению 8,24–13,22 млн т у.т. или 7,16–11,50 млрд м³ природного газа в год.

- кроме того, полное освоение технически возможного потенциала солнечной энергии с учетом вышеназванной эффективности позволит заместить 31–50 % потребляемых в Республике Беларусь топливно-

энергетических ресурсов (ТЭР), 44–70 % ТЭР, расходуемых в стране на получение тепловой и электрической энергии, или покрыть не менее 91 % потребности в электрической энергии в стране по состоянию на 2020 г.

– также будет иметь место повышение энергетической безопасности страны, что численно может быть выражено в увеличении значений индикаторов блока «Энергетическая самостоятельность»: № 1 «Отношение объема производства (добычи) первичной энергии к валовому потреблению ТЭР» и № 2 «Отношение объема производства (добычи) первичной энергии из возобновляемых источников энергии к валовому потреблению ТЭР», каждого на 31–50 %, и снижении значения индикатора блока «Диверсификация поставщиков и видов энергоресурсов» № 4 «Доля доминирующего вида топлива в валовом потреблении ТЭР» также на 31–50 %.

Литература

1. Стратегия развития энергетического потенциала Республики Беларусь [Электронный ресурс] : утв. постановлением Совета Министров Республики Беларусь 09.08.2010 № 1180. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.by/law/postanovleniya-soveta-ministrov-respubliki-belarus/>. – Дата доступа: 27.12.2020.

2. Михалевич А. А. Энергетическая безопасность и возобновляемая энергетика / А. А. Михалевич // Возобновляемые источники энергии: потенциал, достижения, перспективы : материалы Междунар. семинара экспертов, Минск, 3–4 декабря 2013 г. / Национальная академия наук Беларуси ; под ред. академика Михалевича А. А. – Минск, 2013. – С. 7–24.

3. Государственный кадастр возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс] // Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. – Режим доступа: <http://195.50.7.239/GeoData> – Дата доступа: 06.03.2021.

4. ГУ «Белгидромет». – Режим доступа: <https://belgidromet.by/ru/>. – Дата доступа: 15.08.2019.

5. Мониторинг земель [Электронный ресурс] // Главный информационно-аналитический центр Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://www.nsmos.by/uploads/archive/Sborniki/1%20SOIL%20Monitoring%202019.pdf>. – Дата доступа: 17.02.2021.

Возможности применения светодиодных светильников в тепличном овощеводстве с учетом спектральные требования растений

Липницкий Л. А.¹, Шалькевич П. К.¹, Климович С. В.²

¹ Международного государственного экологического института имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета

² Белорусский национальный технический университет

Аннотация: Светодиодные светильники при высокой светоотдаче и сроке службы в отличие от применяемых в теплицах источников света позволяют создавать освещение с учетом спектральных требований растений и обеспечивать регулировку светового потока, что дает возможность эффективно управлять ростом и развитием растений.

Текст доклада: Солнечный свет является важным источником энергии, без которой невозможен фотосинтез. Важную роль в развития растений играет спектр света, постольку не весь спектр солнечного света используется растениями. Наибольшее влияние на их развитие оказывают красный и синий цвета светового спектра. Желтый и зеленый спектры не оказывает какое-либо значительное влияние на развитие растения.

Процессы, которые происходят в растении под действием света различного спектрального состава и интенсивности называются фотоморфогенезом [1]. Присутствие в растении пигмента хлорофилла, активно влияющим на фотосинтез, определяет зеленый цвет листьев и соответственно отражает желто-зеленую составляющую света.

Еще одним важным элементом в растении является пигмент фитохром, который реагирует на красный свет (660 нм) и дальний красный свет (730 нм). Первый красный свет запускает процессы роста и цветения растений, а дальний красный свет тормозит процессы развития.

Синий цвет имеет не менее важную роль в развитии растений, и это определяется еще одним пигментом, присутствующим в растении – криптохромом. Он реагирует на синий цвет, находящийся в диапазоне 400–500 нм. Присутствие этого цвета угнетает рост стеблей растений и сдерживает рост семян, а также определяет направление, к которому будет изгибаться растение при прорастании и росте. Синий свет стимулирует деление клеток, но препятствует их вытяжению.

Из указанного следует, что световой спектр активным образом влияет на процессы фотоморфогенеза и фотосинтеза в растении, а, следовательно, и на их рост и продуктивность. Свет, который получают различные пигменты, может идти на активизацию различных процессов в растении в

различные периоды их вегетации. Это дает возможность использовать избирательный спектр источников света для повышения урожайности растений и ускорения их роста.

Для организации устойчивого и нормального роста растений необходимо наличие освещения не менее 15 часов в сутки. Однако во многих географических регионах особенно в осенне-весенний период освещения оказывается недостаточно, чтобы обеспечить нормальный рост и развитие растения.

Согласно нормам технологического проектирования для репродукционных теплиц и селекционных комплексов недостаток естественной обеспеченности растений солнечным светом должен быть компенсирован искусственным освещением [2]. Оно используется в тех случаях, если количество поступающего в теплицу внешнего освещения снижается на 10 % от количества, которое необходимо для нормального развития растения.

Для обеспечения освещения растений используются различные виды световых систем. При этом наиболее используемыми в теплицах являются натриевые и металлогалогенные лампы.

Натриевые лампы высокого давления обладают существенно более высокой светоотдачей (80–130 Лм/Вт) и большей экономичностью, значительным сроком службы, но при этом обеспечивают только красно-оранжевую часть спектра, не выдавая необходимый растениям синий свет [3, 4]. В результате натриевые лампы высокого давления не могут использоваться на ранних стадиях роста, так как приводят к вытяжению растений и могут рекомендоваться к использованию при сочетании их вместе с лампами синего света. У указанных ламп достаточно высокое количество энергии, которое идет на выделение тепла, что в теплое время года ведет к перегреву растений, и относительно низкий КПД фотосинтетически активной радиации.

Металлогалогенные лампы в отличие от натриевых ламп высокого давления имеют явные преимущества за счет спектра, максимально приближенного к солнечному [3, 4]. Их применение в теплицах стало целесообразным также благодаря высокой стабильности параметров и высокому КПД. В тоже время освещение с использованием этих ламп отличается высокой себестоимостью, их спектр зависит от качества напряжения, а надежность работы и срок службы значительно ограничены и зависят от ряда внешних параметров.

Использование светодиодного (LED) освещения долгое время сдерживалось рядом факторов. Прежде всего высокая цена не позволяла их широко использовать, в том числе, для сельского хозяйства. Однако активное развитие технологий привело к тому, что себестоимость освещения с ис-

пользованием светодиодных источников максимально приблизилась к другим видам используемых световых систем. Особенность светодиодных источников является то, что LED-кристалл создает излучение в узком диапазоне спектра, который зависит состава применяемого полупроводника. Применение нескольких светодиодов с различным излучением позволяет на сегодня получить различные диапазон спектра. При этом LED-светильники обладает рядом несравнимых с другими источниками света преимуществ:

- длительный срок службы, позволяющий эксплуатировать источник света на протяжении 5 лет и более, что в значительной степени определяется качеством их изготовления;
- высокая светоотдача при низком энергопотреблении (светодиодная лампа обладает наиболее высоким показателем 80–120 лм/Вт);
- высокий КПД фотосинтетически активной радиации, превышающий в несколько раз аналогичное значение у традиционных источников света для теплиц;
- незначительное выделение тепла, что практически не влияет на микроклимат теплиц и не создает ожогов для растений;
- направленный световой поток, что в условиях эксплуатации в теплицах, позволяет рационально использовать получаемое освещение;
- возможность регулировки светового потока;
- возможность работы при перепадах температуры и высокой влажности;
- высокая механическая прочность по сравнению с другими источниками света и отсутствие вредных компонентов в их составе, такие как, например, ртуть содержащаяся в натриевых и металлогалогенных лампах.

Отмеченные особенности и преимущества светодиодных светильников дают ряд преимуществ для их использования в тепличном овощеводстве. Прежде всего узкий спектр светодиодных источников позволяет подобрать световой диапазон таким образом, чтобы поучить световой спектр в необходимом для растений биологически активном диапазоне, прежде всего в красном и синем, минимально расходуя или не расходуя энергию на ту часть спектра, которая не используется для роста, цветения и плодоношения растений.

Кроме того, на определенной фазе роста растений можно включать или отключать определенную часть спектра света, участвующего в жизнедеятельности растений. Также возможно изменять спектр света в зависимости от вида растений. Способность регулировки величины светового потока в светодиодных светильниках позволяет осуществлять указанные мероприятия с использованием автоматической системы управления, а также добав-

лять или уменьшать величину светового потока в зависимости от уровня наружного солнечного освещения и фазы развития растения.

Благодаря низкой теплоотдаче и компактности LED-светильников их можно при необходимости размещать над низкорастущими растениями, что не только повышает эффективность использования светового излучения, но и позволяет использовать многоуровневую посадку, что наряду с экономией энергии, получаемой от применения светильников, дает возможность достичь дополнительную экономию тепловой энергии за счет более рационального размещения растений в теплицах.

Применение адаптированных под особенности растений светодиодных светильников позволит кроме энергетической эффективности добиться увеличения набора биомассы и количества хлорофилла при замедлении роста растений в высоту, будет способствовать более активному развитию корневой системы, ускорению цветения и плодоношения растений.

Светодиодное освещение значительно расширяет возможности управления светом в теплицах. Высокая светоотдача и КПД, большой срок службы позволяют добиваться высокой эффективности от использования светодиодных систем освещения в теплицах, создавая наиболее оптимальные комфортные условия для быстрого роста и развития растений. За счет изменения и подбора светового спектра в светодиодных светильниках появилась возможность адаптировать данные осветительные приборы под спектральные требования растений и регулировать их параметры с помощью автоматического управления. Достоинства данного вида освещения позволяет существенно изменить процесс управления выращиванием растений и добиться заметного экономического эффекта от их внедрения.

Литература

1. Развитие растений при светодиодном освещении [Электронный ресурс]. –

Режим доступа: http://etalonsvet.by/index.php?route=tlblog/tlblog&tltpath=blogs&tlblog_id=8. – Дата доступа: 25.02.2021.

2. Нормы технологического проектирования селекционных комплексов и репродукционных теплиц: НТП-АПК 1.10.09.001-02 утв. Министерством сельского хозяйства Российской Федерации введ. 01.01 2003. – Москва: Минсельхоз РФ, 2003 – 91 с.

3. Освещение в теплице: нормы, требования, нюансы и советы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.asutpp.ru/osveschenie-v-teplitse.html>. – Дата доступа: 25.02.2021.

4. Долгих, П. П. Критерии оценки эффективности источников излучения для теплиц / П. П. Долгих // Эпоха науки. – 2018. – № 15. – С. 96–99.

УДК 621.383.51

Изучение влияния спектра излучения на эффективность солнечных фотоэлектрических преобразователей в учебном процессе

Новик А. В.

Белорусский национальный технический университет

Аннотация: Получение более полной вольт-амперной характеристики фотоэлектрических преобразователей и исследования ее спектральной зависимости в учебном процессе, для оценки эффективности использования.

Текст доклада: В рамках изучения студентами специальности 1 – 43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» дисциплины «Возобновляемые источники энергии». При подготовке специалистов энергетиков и энергоменеджеров, достаточно большое внимание уделяется рассмотрению физических принципов работы, вариантов технической реализации и вопросам эксплуатации солнечных фотоэлектрических установок (СФЭУ) рис.1. На особенности эксплуатации СФЭУ влияют технические характеристики ее элементов – фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) рис. 2.



Рис. 1. Солнечные фотоэлектрических установки

ФЭПы являются основным базовым элементом для создания солнечных батарей. В рамках лабораторного практикума, при исследовании фотоэлектрических явлений, с использованием имитатора солнечного излучения, как правило, определяются следующие параметры

При различных значениях плотности потока излучения измеряются: напряжения холостого хода (U_{xx}), тока короткого замыкания ($I_{кз}$), вольт-

амперная характеристика (ВАХ) и определение зависимости мощности от напряжения. Для понимания механизмов работы ФЭП этой информации не достаточно.

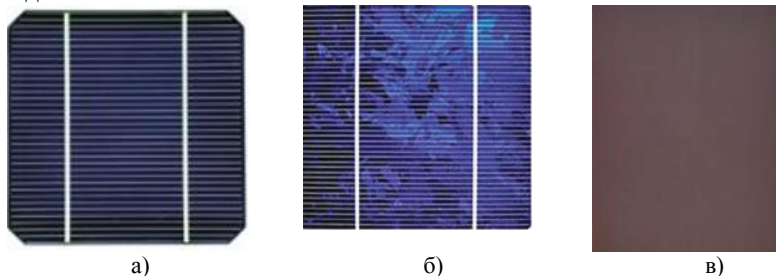


Рис. 2. Элементы фотоэлектрических преобразователей:

а) из монокристаллического кремния; б) из поликристаллического кремния; в) из аморфного кремния

Учитывая зонную энергетическую структуру полупроводников (в частности Si), а также отличающиеся свойства материала при взаимодействии с различными, в энергетическом плане, участками спектра возбуждающего излучения, более полную характеристику, возможно получить проведя исследования спектральной зависимости ВАХ.

Полученные, в ходе измерений данные, позволят рассчитать коэффициент заполнения ВАХ (или коэффициент формы), с помощью которого можно оценить качество солнечных элементов. Коэффициент заполнения рассчитывается по формуле:

$$\xi = \frac{P_{\max}}{U_{xx} \cdot I_{кз}}$$

где P_{\max} – максимальная мощность ФЭП (Вт);

U_{xx} – напряжение холостого хода (В);

$I_{кз}$ – ток короткого замыкания (А).

Таким образом, получив значение коэффициента заполнения, мы можем оценить насколько реально получаемые характеристики отличаются от идеальных теоретических.

Проведение измерений спектральных зависимостей, может быть реализовано двумя наиболее простыми путями:

1. Использование одного имитатора солнечного излучения, с попеременно используемыми светофильтрами, отсекающими определенную часть спектра возбуждающего светового потока.

В этом случае, характеристики спектра излучения, необходимо предварительно получить с помощью спектрофотометров. Также, необходимо

проводить оценку плотности светового потока для каждой конфигурации экспериментальной установки с последующей обязательной нормировкой на величину плотности исходного источника.

2. Применение различных источников света.

В качестве наиболее простого в реализации варианта, для формирования светового потока используются различные лампы, накаливания, люминесцентные и светодиодные лампы. Спектр излучения, в этом случае, определяется либо с помощью спектрофотометра, либо используются паспортные данные применяемых ламп. В этом варианте также необходима нормировка плотности светового потока.

Вне зависимости, от выбранного варианта реализации имитации солнечного света, после проведенных измерений рассчитывается коэффициент полезного действия ФЭП и определяется его взаимосвязь со спектральным составом возбуждающего излучения. Принимая во внимание, что существенное влияние на характеристики ФЭП оказывает, кроме физических свойств материала, спектральный состав излучения, можно провести приблизительный расчет количества фотонов в различных спектральных интервалах, а следовательно, и оценить их энергетический потенциал. Проводя оценку получаемых результатов, также следует учитывать влияние прямого нагрева исследуемых образцов в ходе облучения, особенно при использовании ламп накаливания. Электрическая мощность ФЭП зависит от температуры и уменьшение КПД, может быть связано именно с влиянием данного фактора.

Литература:

1. Патрин, А. А., Сулов В. А., Фань Тхань Дау. Спектральное распределение фото-ЭДС системы р-кремний электролит, Рук. Деп.ВИНИТИ, ред. Журн. Изв. АН СССР, сер.физ.-мат. Наук, деп. № 1806-В, 1988.

2. V. M. Andreev, V. A. Griliches, V. D. Rumiantzev. A photoelectric conversion of concentrated solar radiation. – L.: Science, 1989. – 310 p. [in Russian].

3. Исследование фотоэлектрического преобразователя энергии – солнечной батареи [Электронный ресурс]: лабораторный практикум для энергетических специальностей ВУЗа / БНТУ; сост. И. Н. Прокопеня [и др.]. – Минск : БНТУ, 2018.

4. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: методические указания к курсовой работе для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» / сост. Ю .К. Кривошеев, Н. Г. Хутская. – Минск : БНТУ, 2011. – 35 с. : ил.

**Исследования конвективной теплоотдачи труб с круглыми
алюминиевыми ребрами разной высоты
в различных режимах свободной конвекции**

Данильчик Е. С.^{1,2}, Сухоцкий А. Б.¹

¹ Белорусский государственный технологический университет

² Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси

Аннотация: Проведены экспериментальные исследования конвективной теплоотдачи однорядного пучка из шести труб с круглыми алюминиевыми ребрами разной высоты в различных режимах свободной конвекции.

Текст доклада: Одним из наиболее распространенных направлений в повышении эффективности теплообменных аппаратов является увеличение поверхности теплообмена в том числе и путем оребрения труб. Широкое применение в промышленности и технике получили биметаллические ребристые трубы (БРТ) с круглыми винтовыми алюминиевыми ребрами [1].

Воздухоохлаждаемые теплообменники (ВОТ) с биметаллическими ребристыми трубами применяются в различных отраслях промышленности для охлаждения технологических продуктов и энергоносителей. Однорядные пучки нашли распространение в системах отопления в качестве калориферов и системах утилизации сбросного тепла и т.д. Одним из способов снижения энергопотребления в данных системах является перевод ВОТ в режим свободной конвекции без затрат электроэнергии на привод вентиляторов. Недостатком ВОТ являются малые коэффициенты теплопередачи и существенные масса-габаритные характеристики. Проблема может быть решена при оснащении ВОТ дополнительными устройствами, позволяющими интенсифицировать свободную конвекцию без или с уменьшением потребления электроэнергии электрическим двигателям вентилятора. К таким устройствам является вытяжная шахта, установленная над ВОТ, для усиления тяги воздуха.

Увеличение высоты ребер труб теплообменника приводит к росту коэффициента оребрения, но при этом снижается средний коэффициент теплоотдачи за счет уменьшения скоростей потока воздуха в межреберном пространстве и снижения энергетической эффективности ребер. Следовательно, имеется оптимальная высота оребрения труб теплообменника для различных областей интенсивности конвективного теплообмена.

В данной работе были проведены экспериментальные исследования однорядного пучка из шести труб с поперечным шагом $S_1 = 64$ мм. Геомет-

рические размеры биметаллических оребренных труб со спиральными накатными ребрами следующие:

- наружный диаметр оребрения $d = 56,0$ мм;
- диаметр трубы по основанию $d_0 = 26,8$ мм;
- высота ребра $h = 14,6$ мм; шаг ребра $s = 2,5$ мм;
- средняя толщина ребра $\Delta = 0,5$ мм;
- коэффициент оребрения трубы $\phi = 19,3$ (I тип, $h / s = 5,84$).

Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы – углеродистая сталь, длина трубы $l_n = 330$ мм (теплоотдающая длина $l = 300$ мм). Диаметр несущей трубы $d_n = 25$ мм, толщина стенки $\delta = 2$ мм.

Для изменения высоты оребрения трубы ее ребра стачивались путем шлифования с образованием новых типов труб, а компоновка однорядных пучков производилась с постоянным относительным поперечным шагом $\sigma_1 = S_1 / d = 1,14 = \text{const}$: II тип – $h / s = 4,80$; III тип – $h / s = 3,20$; IV тип – $h / s = 1,64$; V тип – $h / s = 0,80$; VI тип – условно гладкая труба [2], $h / s \approx 0$.

Для интенсификации свободно-конвективного теплообмена [3] над поверхностью однорядного пучка устанавливались два типа шахт – с регулируемым проходным сечением и регулируемой высотой [4].

Во время экспериментального исследования однорядного пучка электрическая мощность, подводимая к трубам, изменялась в пределах $W = 6\text{--}230$ Вт, средняя температура стенки у основания ребер составляла $t_{\text{ст}} = 30\text{--}250$ °С, а температура окружающего воздуха в камере $t_0 = 16\text{--}27$ °С.

По данным измерений рассчитывался средний приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией, отнесенный к полной наружной поверхности круглоребристой трубы α_k , Вт/(м²·К) [2, 3].

Полученные данные были обобщены в виде чисел подобия Нуссельта и Рэлея ($Nu = f(Ra)$), а при оснащении теплообменного пучка вытяжной шахтой, также с помощью зависимости числа Нуссельта и от числа Рейнольдса ($Nu = f(Re)$).

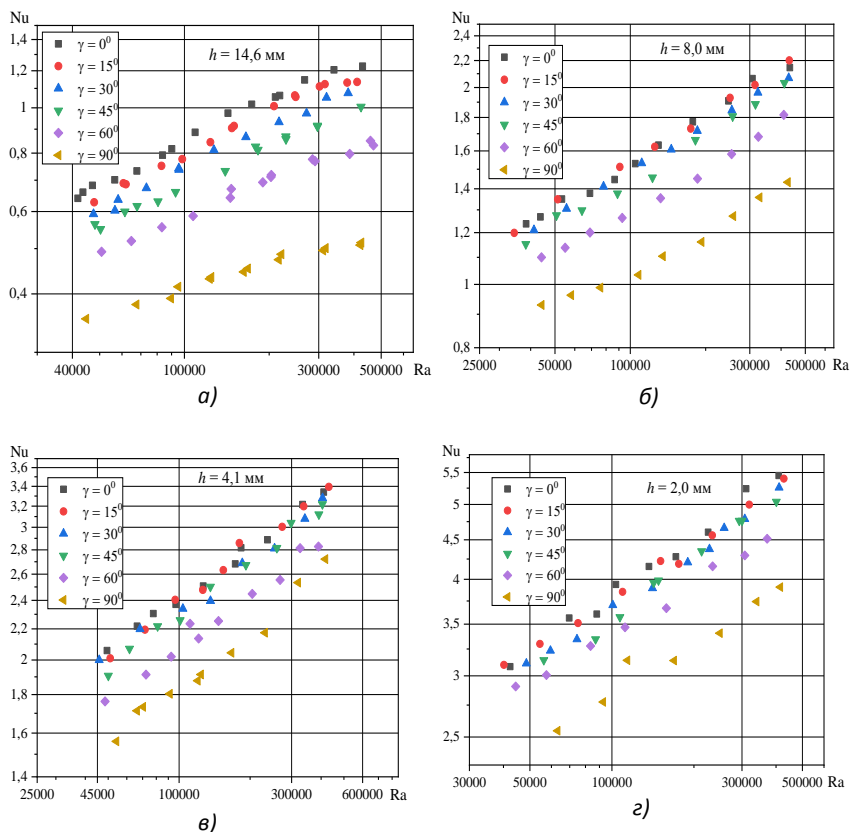


Рис. 1. Свободно-конвективная теплоотдача ребристых труб при углах наклона $\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$ и 90° к горизонтальной плоскости с различными высотами ребра труб:

a) h = 14,6 мм; б) h = 8,0 мм в) h = 4,1 мм; г) h = 2,0 мм;

Из рис. 1 видно, что увеличение угла наклона оребренной трубы от 0 до 90° сопровождается снижением теплоотдачи, при чем характер ее снижения для труб с различной высотой оребрения различается. При этом теплоотдача при $\gamma = 15^\circ$ (в случае труб с $h = 8,0, 4,1$ и $2,0$ мм и при $\gamma = 30$ и 45°) очень близка к полученным ее значениям при $\gamma = 0^\circ$, а теплоотдача вертикальной оребренной трубы с различной высотой оребрения приблизительно в 2 раза хуже теплоотдачи горизонтальной трубы.

Литература

1. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения : справочник / А.Н. Бессонный [и др.] ; под общ.ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. – СПб. : Недра, 1996. – С. 28–37, 89–104.
2. Данильчик Е. С. Экспериментальные исследования теплоотдачи одиночной биметаллической ребристой трубы с различной высотой оребрения к воздуху в режиме свободной конвекции // Тепло- и массоперенос–2019. Минск: Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. 2020. – С. 42–52.
3. Сухоцкий А. Б., Данильчик Е. С. Исследование свободно конвективного теплообмена оребренной трубы и однородного пучка при различных углах наклона труб к горизонтальной плоскости // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 2 (222). – С. 272–279.
4. Сидорик Г. С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглоребристых труб и пучков // Труды БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. – № 1. – С. 85–93.

Типичные ошибки при проведении пусконаладочных работ на холодильном оборудовании

Жук Н. П.

Белорусский национальный технический университет

Рассмотрим типичные нарушения и ошибки ремонтников при проведении пусконаладочных операций на холодильном оборудовании.

Этап 1. Испытание на герметичность

Одной из главных и первой по очередности в ряду операций на завершающем этапе монтажа является испытание смонтированных трубопроводов холодильной установки на герметичность (принятое упрощенное название среди холодильщиков – опрессовка). Главная цель этой операции – выявление мест утечки. Неправильное проведение данной процедуры, а зачастую и ее полное отсутствие, приводит к необоснованным потерям холодильного агента через вовремя не обнаруженные места негерметичности, зачастую до того момента тока не выйдет из строя компрессор.

Сама процедура испытания на герметичность вполне подробно и корректно описана и в учебной литературе и в нормативных документах. Как правило, для большинства фреоновых холодильных систем вполне достаточно 10 bar для проверки на герметичность. Однако для некоторых установок, например работающих на R410, потребуется подъем давления до 20 bar. В любом случае есть смысл обратиться к технической документации на оборудование для уточнения норматива испытательного давления.

При проведении испытаний потребуется убедиться, что падение испытательного давления связано только со снижением температуры окружающей среды, а не с утечкой. Для этого проводится перерасчет давления по известной формуле Шарля – $P_1/T_1 = P_2/T_2$ (где давления P и температуры T соответственно в начале и конце испытания подставляются в абсолютных значениях). Для точного контроля давления не стоит пользоваться манометрами с широким диапазоном шкалы (более 20 bar), т.к. уловить изменения давления в десятые доли bar будет проблематично. Для этой цели идеально подойдут цифровые манометры.

Правильное проведение опрессовки и своевременное оформление соответствующей документации гарантирует в первую очередь герметичность системы. Это также снизит риск возникновения проблем и непониманий в дальнейшем при работающем оборудовании, т.к. возникшие утечки, скорее всего, будут рассматриваться как последствия некачественной эксплуатации, а не возникшие по вине монтажников.

Этап 2. Вакуумирование

Второй процедурой, от качественного проведения которой зависит дальнейшая корректная работа холодильной установки, является вакуумирование всей системы трубопроводов. Необходимо четко понимать, что целью вакуумирования является – удаление газов из системы и осушка контура от влаги. Вакуумирование ни в коем случае не является испытанием на герметичность, испытательные процедуры которого описаны ранее. На этот счет много уже сказано и уделено должное внимание во всех возможных источниках информации. Хотелось бы заострить вопрос на некоторых нюансах, при незнании и непонимании важности которых качественное вакуумирование не произойдет. Это три момента.

Первое: при вакуумировании необходимо открыть все ручные и электронные запорные и регулирующие устройства, для удаления всех газов из всех участков трубопроводов. Необходимо очень внимательно изучить схему трубопроводов и наличие всех возможных устройств, которые могут быть перекрыты при атмосферном давлении в системе, а также при вакуумировании. Почти никогда не забывают открыть ручные запорные вентили (шаровые или другого типа), проконтролировать это не представляет труда. Часто забывают открыть соленоидные клапаны, которые можно открыть либо, включив их (что не всегда возможно из-за сложной схемы электрических соединений), или используя специальный кольцевой магнит, что проще, однако такое приспособление необходимо иметь в наличии, а иногда и несколько штук. Надеяться на то, что за счет перепада давления все-таки все участки трубопровода будут свакуумированы, не приходится. И главное, сложно представить в каком положении находятся пружинные регуляторы давления, при их наличии в системе (например, регуляторы давления кипения, конденсации, в картере, в ресивере). Как они себя поведут при создании вакуума с какой либо стороны, это задача даже теоретически не из легких. Поэтому их необходимо при вакуумировании полностью открыть и уже при работающей установке по новому перенастроить, на что конечно понадобится время. Такую же злую шутку могут сыграть и обратные клапаны на трубопроводах, а также клапаны компрессора, которые могут закрыться при создании вакуума не с той стороны. Не зря рекомендовано при вакуумировании подключаться к обеим сторонам трубопроводной системы, а лучше в нескольких точках. Или, если это невозможно, то продвигаясь по трубопроводам последовательно открывать запорные устройства, четко понимая в каком положении они находятся при создании вакуума с конкретной стороны. При соблюдении этих несложных рекомендаций обеспечиться тщательное удаление газов и

влаги из всей системы, а это гарант продолжительной работы холодильной установки в дальнейшем.

Второе: обязательное проведение процедуры срыва вакуума при первоначальном вакуумировании новой установки, иногда эту процедуру называют осушкой системы или промывкой, что технически более правильно. Она заключается в заполнении системы азотом (или хладагентом) после вакуумирования. Объяснить цель и технологию проведения такой процедуры можно следующим образом. Общеизвестно, что при создании соответствующего вакуума вода превращается в пар, который должен быть удален из системы вакуумным насосом, это главная цель вакуумирования. Однако при уже созданном вакууме не все пары и газы смогут перемещаться по трубопроводам в сторону насоса, т. к. уже нет перепада давления и движение газов в трубопроводах отсутствует, поэтому газы могут остаться и не удалиться вакуумным насосом. При заполнении системы азотом происходит перемешивание оставшихся газов с азотом, которые вместе стравливаются в атмосферу, а далее система опять вакуумируется насосом. Если провести такую процедуру два раза, а лучше трехкратно, можно с уверенностью гарантировать чистоту (или осушку) системы.

Третье: соблюдать достаточную продолжительность вакуумирования. Четкой продолжительности вакуумирования в документации не указано. Каждый монтажник это время устанавливает исходя из собственного опыта. Однако необходимо не забывать о цели вакуумирования – удаление из системы образовавшихся при испарении паров воды, а для их образования и удаления необходимо время. Поэтому это как раз тот случай, когда можно с уверенностью сказать: чем дольше – тем лучше. Если соблюсти рекомендации, которые описаны в предыдущем абзаце, то качественное вакуумирование можно провести и в достаточно короткие сроки. Если систему оставить под вакуумом на сутки, то можно проследить за образованием паров воды и сделать вывод о качестве проведения процедуры вакуумирования.

Нельзя забывать, что контроль только вакуума, без проведения процедуры опрессовки, ни в коем случае не является гарантом герметичности системы.

Этап 3. Заправка установки хладагентом

После проведения вышеперечисленных важных процедур следующим этапом является заправка системы. На этой стадии также могут быть допущены ошибки. Наиболее просто заправлять установки собранные на заводе-изготовителе (как правило, в качестве дросселирующего устройства – капиллярная трубка), там норма заправки точно указана, главное ее строго соблюдать. Как только отдельно проводился монтаж трубопрово-

дов к испарительным системам, оборудованным терморегулирующими вентилями, появляется необходимость в контроле заправки в процессе пуска наладки. Конечно, норму заправки можно просчитать, однако точность никогда не будет гарантирована, в любом случае потребуются ее уточнение. В первом приближении можно выбрать объем ресивера, опять же с большой долей ошибки. Наиболее точным способом определения точности заправки является контроль переохлаждения и перегрева соответственно на конденсаторе и испарителе холодильной установки. Для этого понадобится определенный опыт от монтажника и соответствующие измерительные инструменты.

Здесь хотелось бы обратить внимание на то, что часто о том, сколько заправили холодильного агента можно узнать только из слов монтажников, никакой документации на этот счет вообще не ведется. Это пугающая тенденция, которую необходимо всячески искоренять. Обязательно составляется Акт ввода в эксплуатацию оборудования, в котором количество заправленного хладагента должно быть обязательно указано.

Примечание: всем понятно, что четкое соблюдение всех перечисленных операций обеспечит качественную эффективную работу холодильной установки, предотвратит потери дорогостоящего хладагента и ..., но! потребуется много времени и усилий. Поэтому как зачастую поступает недобросовестный ремонтник: зачем проводить опрессовку, я в своей работе уверен, быстренько отвакуумировал, минут этак 15!, заправил по минимуму и все – пользуйся владелец. Воздух и вода остались внутри, окислится масло, коррозия неизбежна, загубится испаритель, конденсатор, сгорят обмотки электродвигателя, а виноват будет – как ни странно владелец, он будет первым доказывать, что проводил эксплуатацию и обслуживание установки должным образом.

Будем надеяться, что данная информация послужит определенным стимулом к наведению порядка в холодильной отрасли, для того чтобы специалисты с большей ответственностью относились к своим обязанностям и отвечали за выполненную работу. Также надеемся, что и владельцы оборудования с большей скрупулезностью будут выбирать подрядчиков для выполнения работ, более строго контролировать ведение соответствующей документации, понимая поднятые в статье проблемы.

**Повышение энергоэффективности системы вентиляции
для обеспечения качественного микроклимата
в период распространением вирусной инфекции**

Балабанова О. В.², Янцевич И. В.¹

¹ Белорусский национальный технический университет,

² УЗ «10-я городская больница»

Аннотация: В статье рассматриваются методы, позволяющие добиться экономии энергии в системах вентиляции и кондиционирования, не теряя качество воздуха.

Текст доклада: При создании проекта здания, исходят из его функционального назначения с учетом конструктивных и инженерных решений которые применяемых при строительстве и эксплуатации. При этом требования безопасности здоровья пребывающих в здании людей является основным. Система вентиляции и кондиционирования (СВК), обеспечивающая воздухообмен в здании в решении данной задачи из инженерных систем обеспечивающих эксплуатацию здания стоит на ведущем месте.

Современный к системам СВК и требованиям по обеспечению воздухообмена в зданиях начали формироваться в конце – 19, начале 20 века. В ее основе подхода к работе систем СВК было понимание, что люди являлись основным источником распространения инфекций воздушно-капельным путем. Можно вспомнить, что создания централизованных систем вентиляции в здания в США было связано с предотвращением распространения инфекционных заболеваний, такого как туберкулеза, воздушным путем, что в последствии привело к возникновению проблемы «легионеллы» в системах СВК, там же. Основным подходом при этом было обеспечение высокой нормы воздухообмена, но не предавалось большого значения устройству самих систем СВК. После этого возникло понимание, что здание и его инженерные системы, в частности СВК также могут и является источником инфекционной опасности., И с целью учета этих обстоятельства была увеличена норма воздухообмена в зданиях.

СНБ 4.02.01-03: «Вентиляция — обмен воздуха в помещениях для удаления избытков теплоты, влаги, вредных и других веществ с целью обеспечения допустимых параметров микроклимата и чистоты воздуха в обслуживаемой или рабочей зоне»[1]. Задача СВК эффективно удалять загрязнения из помещений за счет количества перемещаемого воздуха. Это и есть основная проблема СВК в плане снижения потребления энергии. Из

которой следует, что уменьшение объема вентиляционного воздуха приводит к уменьшению затрат энергии на работу системы СВК, но при этом ухудшается качество воздуха, проявляющееся в следующих моментах:

- 1) повышение риска инфекционных и аллергических заболеваний;
- 2) снижение производительности труда (повышенная температура воздуха в помещении, ощущения дискомфорта).

В период вирусной пандемии мировые и национальные сообщества специалистов в СВК – ABOK, ASHRAE, REHVA, AiCAAR и др., подготовили и опубликовали рекомендации, связанные с проектированием и эксплуатацией систем вентиляции с целью нераспространения в зданиях и сооружениях COVID-19 [3, 4].

В рекомендациях REHVA на первом месте, как самое эффективное мероприятие приводится не обходимость «по проветриванию помещений наружным воздухом, даже в помещениях с механической вентиляцией», REHVA также рекомендовал запретить использование рециркуляции воздуха в приточных установках систем вентиляции в эксплуатируемых зданиях в период пандемии.

ASHRAE дает следующую рекомендацию по проектированию систем вентиляции, для предотвращения распространению инфекции, использование вытесняющей вентиляции, безиспользования рециркуляции воздуха в приточных установках систем вентиляции.

Из мировой практике известно – доля затрат на нагрев воздуха в СВК в общем энергопотреблении систем обеспечения микроклимата общественных и жилых зданий составляет приблизительно 30–35 %. Отсюда следует, совершенствование систем вентиляции ощутимо повлияет на снижение энергопотребления в зданиях.

Существуют различные методы существенного снижения затрат энергии в СВК с сохранением или улучшением качества воздуха в помещениях здания. Они основываются на уточнение расчетных параметров, определяющих качество воздуха, утилизацию тепла, уточненном расчете и регулирование воздушных потоков в помещениях, контроле и удалении загрязнений, локальном регулирование микроклимата на рабочем месте.

В стандарте ЕС по проектированию содержится методика расчета систем вентиляции, в которой воздухообмен определяется исходя из фактического загрязнения (неприятный запах) и по концентрации вредных веществ. При проектировании СВК используется наибольшее из полученных значений.

Для определения фактического загрязнения используют следующую формулу:

$$Q_c = 10 \cdot G_c / (G_{c,i} - G_{c,0}) / e_v, \quad (1)$$

где Q_c – расход воздуха, необходимый для получения допустимого качества воздуха в помещении, л/с; G_c – выделение запахов всеми источниками, олф; $G_{c,i}$ – показатель допустимого качества воздуха в помещении, деципол; $G_{c,0}$ – показатель качества наружного воздуха, деципол; e_v – эффективность вентиляции ($e_v=1$ – смешительное воздухораспределение, $e_v=2$ – идеально равномерное воздухораспределение).

Для определения по концентрации вредных веществ формулу:

$$Q_c = 10 \cdot G_h / (G_{h,i} - G_{h,0}) / e_v, \quad (2)$$

где Q_h – воздухообмен, необходимый для ассимиляции химических загрязнений, л/с; G_h – интенсивность выделения химических загрязнений, мг/с; $G_{h,i}$ – допустимая концентрация химических загрязнений в воздухе помещения, мг/м³; $G_{h,0}$ – концентрация химических и других загрязнений в наружном воздухе, мг/м³; e_v – эффективность вентиляции (e_v – смешительное воздухораспределение, e_v – идеально равномерное воздухораспределение).

Эффективность СВК зависит от эффективности воздухообмена, при эффективности воздухообмена 50 % ($e_v = 1$) соответствует воздухораспределению смешительного типа, 100 % (e_v) – идеально равномерному воздухораспределению. Для систем вытесняющей вентиляции эффективность находится в диапазоне 1–2, а для систем с «коротким» контуром циркуляции (вытяжные отверстия вблизи приточных) – менее 1. Данная методика расчета не отличается от методики стандарта ASHRAE по проектированию систем вентиляции. В нем эффективность вентиляции названа эффективностью воздухообмена. Численные значения данной величины не отличаются от приведенных выше. Расчет по формулам (1) и (2) показывает, что воздухообмен в здании определен оптимально, на основе реальных показателей загрязнения воздуха.

Улучшение работы СВК может достигаться без потери качества воздуха и перерасхода энергии. Для этого применяют следующие подходы:

1) метод улучшения качества воздушной среды без сокращения расхода энергии:

- корректный выбор расчетных параметров внутреннего и наружного воздуха для сбалансированного воздухообмена;
- повышение степени очистки приточного воздуха;
- повышение эффективности СВК за счет правильного размещения воздухозаборных устройств.

2) метод энергосбережения без ухудшения качества воздушной среды:

- утилизация тепла удаляемого воздуха;

- местное регулирование параметров воздуха в помещении.
- 3) метод улучшения качества воздушной среды при одновременной экономии энергии:
 - использование системы контроля загрязненного воздуха;
 - использование локализирующего воздуха удаления снормированной подачи наружного воздуха;
 - использование естественной вентиляции и охлаждения.
 - совершенствование системы регулирования и обслуживания.

Использование в СВК данных методов приводит к необходимости увеличение затрат на определение источников загрязнений и их интенсивности, к существенным изменениям в устоявшуюся практику проектирования и обслуживания СВК.

По опубликованным во многих странах данным исследований, можно говорить что значительное число людей, недовольно качеством воздуха в помещениях и наличии у них синдрома больного здания (Sick Building Syndrome), притом, что здания и их системы вентиляции были построены с соблюдением действующих стандартов [5].

Сейчас нужно говорить о том что существующие системы естественной и принудительной вентиляции зданий не являются гарантированным препятствием к распространению вирусов. Действующие требования к системам вентиляции зданий не учитывают вирусной пандемии. Более того, неуправляемая, не контролируемая СВК многоэтажных зданий различного назначения, может способствовать распространению вирусов. К сожалению в нашей стране это относится к большинству систем СВК в медицинских учреждениях.

Статьи, публикуемые в журналах «АВОК» [2, 6, 7], показывают, что сейчас нет единого мнения и подхода крешениям по системам СВК в многоэтажных зданиях.

Нам кажется, что в настоящее время необходимо пересмотреть подходы к решению задач по системам вентиляции особенно с учетом ситуацию с распространением вирусной инфекции.

Литература

1. СНБ 4.02.01-03 «Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха». [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://azbukatepla.by/wp-content/uploads/2016/01/SNB-4.02.01-03-Normy-Otoplenie-Ventilyaciya-Kondicionirovanie.pdf> – Дата доступа: 25.04.2021.

2. Применение систем механической вентиляции в жилых зданиях // АВОК. – 2015. – № 8.

3. Табунщиков Ю. А., Колубков А. Н. Инженерные системы в борьбе с распространением инфекции. Взгляд ученого и инженера // Энергосбережение. – 2020. – № 3.

4. Руководство RENV «Мероприятия для предотвращения распространения коронавирусной инфекции в системах ОВК общественных зданий». URL: https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=7520.

5. Fanger P. O. Качество внутреннего воздуха в XXI веке: в поисках совершенства // АВОК. – 2002. – № 2.

6. Тарабанов М. Г. Естественная, гибридная, механическая, местная? И все же СКВ // АВОК. – 2012. – № 3.

7. Voerstra A., Balvers J. Приточно-вытяжная вентиляция с механическим побуждением в индивидуальных жилых домах: проблемы, ошибки, решения // АВОК. – 2016. – № 1.