

Е. В. Обухов, д. эконом. н., **Е. С. Корягина**, инж.

Одесский государственный экологический университет

ДЕФИЦИТ НАСЫЩЕНИЯ ВОДЯНОГО ПАРА И ИСПАРЕНИЕ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КАХОВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

На основе реальной гидрометеорологической информации за 55 лет эксплуатации водохранилища исследовано влияние дефицита насыщения водяного пара над водной поверхностью для характерных лет на гидрометеорологические показатели Каховского водохранилища.

Ключевые слова: водохранилище, водная поверхность, испарение, показатели, температура, дефицит, водяной пар.

Введение и постановка проблемы. Составление водного баланса водохранилищ один из важных разделов схемы комплексного использования водных ресурсов водоемов. Сооружение водохранилищ и увеличение потерь воды на испарение и фильтрацию приводит к изменениям естественных водных ресурсов.

Бесперывный процесс циркуляции воды в природе под влиянием солнечной радиации приводит к испарению с водной поверхности планеты около 505 тыс. км³ воды. Эта вода в атмосфере конденсируется и возвращается обратно в океан в виде осадков – 458 тыс. км³ [1,2]. Разница объемов между испарением и осадками переносится воздушными течениями на сушу и является источником осадков на ее поверхности. Интенсивность влагооборота, совершаемого в атмосфере водяными парами, в среднем за год, составляет 42 влагооборота [1]. Любые водохозяйственные мероприятия всегда приводят к изменениям во влагообороте.

Таким образом, испарение является одной из основных составляющих теплового и водного баланса, т.к. за счет испарения атмосфера обогащается влагой [3]. Величина испарения существенно меняется в зависимости от метеорологических условий и изменений климата.

Расчет испарения с водной поверхности водохранилищ проводится по довольно простым эмпирическим формулам, для которых используется стандартная гидрометеорологическая информация. В основу их положен закон французского физика Дальтона о пропорциональности испарения разности парциального давления водяного пара над этой поверхностью [1,4-8].

Структура расчетной зависимости имеет вид

$$E = An(e_0 - e_2)(1 + aw_2), \quad (1)$$

где:

E – испарение с водной поверхности за месяц, мм;

A – числовой коэффициент, который суммарно учитывает влияние на процесс испарения некоторых его факторов;

n – количество суток в месяце;

e_0 – давление насыщенного водяного пара, которое рассчитывается по температуре воды на ее поверхности, (мм; гПа);

e_2 – парциальное давление водяного пара в воздухе на высоте 2 м над водной поверхностью, (мм; гПа);

α – числовой коэффициент;

w_2 – среднемесячная скорость ветра на высоте 2 м, м/с.

Выражение $(e_0 - e_2)$ в мм или гПа определяет дефицит влажности в приземном слое атмосферы [1] или дефицит насыщения водяного пара (недостаток насыщения) [9].

Содержание водяного пара в атмосфере называется влажностью воздуха, которая характеризуется абсолютной, относительной и удельной влажностью, парциальным давлением водяного пара и давлением насыщенного пара, дефицитом насыщения водяного пара, температурой точки росы.

Водяной пар непрерывно поступает в атмосферу вследствие испарения воды с деятельной поверхности и его содержание в атмосфере эквивалентно слою воды 25,5 мм [9]. Его содержание также ограничивается температурой.

Дефицит насыщения водяного пара комплексно отражает тепло- и влагосодержание воздуха. При увеличении относительной влажности (f) дефицит насыщения водяного пара (d) уменьшается до нуля (при $f=100\%$). Относительная влажность до высоты 2-3 км изменяется особенно неравномерно и с высотой в среднем уменьшается.

Парциальное давление водяного пара с высотой уменьшается и на высоте 6 км в 9-10 раз меньше, чем на уровне моря. Парциальное давление водяного пара в воздухе соответствует температуре воздуха: чем выше температура, тем большее количество водяного пара может в нем находиться [3, 9].

Суточный ход дефицита насыщения водяного пара соответствует ходу температуры воздуха и наибольший в 14-15 часов. Годовой ход дефицита насыщения водяного пара имеет максимум в самый жаркий месяц, а минимум – в самый холодный [1, 9].

Целью работы является исследование изменений дефицита насыщения водяного пара над водной поверхностью Каховского водохранилища в условиях изменения климата.

Основными материалами исследования являются систематизированная гидрометеорологическая информация с Каховской гидрометеорологической обсерватории за 55 лет наблюдений, составляющие водных балансов водохранилища и результаты исследований за прошлые годы [5-8].

Каховское водохранилище – шестое в Днепровском каскаде. Среднегодовое сток Днепра в створе водохранилища – 52,2 км³. Полная и полезная емкость водохранилища – 18,2 и 6,8 км³. Площадь зеркала водохранилища при нормальном подпёртом уровне – 2155 км², длина его 230 км, максимальная и средняя глубина – 36 и 8,4 м. Напоры: максимальный статичный – 16,5 м, расчетный – 15 м, минимальный – 8,9 м.

Берега водохранилища высокие, состоящие в основном из суглинков, порезанные глубокими оврагами и долинами мелких степных рек, которые сегодня стали его заливами.

В водохранилище выделяют пять участков (рис.1). Первый участок от г.Н.Каховка до с.Бабино – приплотинный, самая глубокая зона шириной 5-6 км,

глубиной от 13 до 25 м, а иногда и 32 м. Площадь первого участка – 495 км². Второй участок от с.Бабино до г.Никополь шириной 8-15 км, преобладающие глубины – 10-12 м. Площадь второго участка – 532 км². Третий участок от г.Никополь до с.В.Тарасовка шириной от 8 до 16 км с глубинами 8-10 м. Площадь третьего участка – 365 км². Гидрологический режим второго и третьего участка – переходный от речного до озеровидного. Четвертый участок от с. Благовещенка до с. Плавни – пойменный, отделен от руслового – пятого участка – песчаной грядой и имеет вид мелководного озера с преобладающими глубинами 3-5 м, а также большая площадь с глубинами 1 м. Площадь четвертого участка – 690 км². Русловой – пятый – участок расположен от с.В.Тарасовка до с.Розумовка. Площадь пятого участка 73 км².



Рис. 1 – Каховское водохранилище и его участки

Результаты исследований и их анализ. На основе систематизированной информации за 55 лет эксплуатации Каховского водохранилища были выделены характерные годы:

- с максимальным годовым слоем испарения E (мм) – 2007 г.;
- с минимальным годовым слоем испарения E (мм) – 1980 г.;
- с максимальным годовым слоем осадков X (мм) – 1997 г.;
- с минимальным годовым слоем осадков X (мм) – 1975 г.

Хронологический график выше указанных слоев приведен на рис. 2

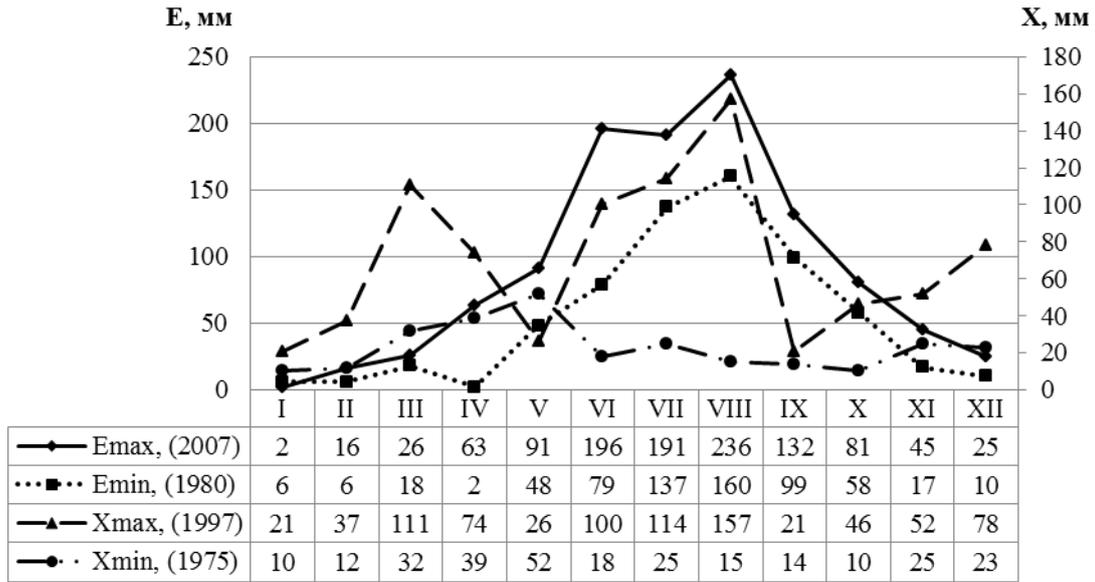


Рис. 2 – Хронологический график хода слоев осадков (X, мм), выпавших на акваторию, и испарения (E, мм) с поверхности Каховского водохранилища

На рис. 3 приведен хронологический график среднемноголетней температуры воздуха и воды для характерных лет с максимальными и минимальными их значениями:

- температура воздуха максимальная – 2007 г.;
- температура воздуха минимальная – 1985 г.;
- температура воды максимальная – 2007 г.;
- температура воды минимальная – 1987 г.

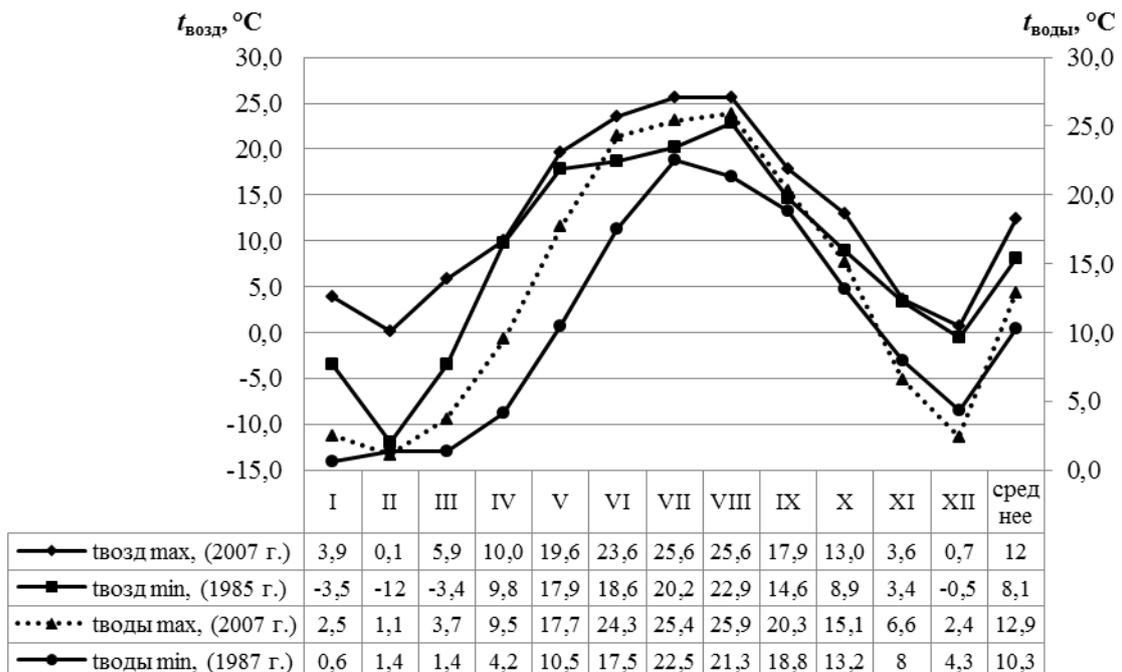


Рис. 3 – Хронологический график изменений температуры воздуха ($t_{\text{возд}}$) и воды ($t_{\text{воды}}$) по акватории Каховского водохранилища

В исследованиях также рассматривались характерные по водности годы: многоводный (1970 г.) и маловодный (1972 г.). Объемы стока $W_{ст}$ и испарения We за эти годы (млн м³) приведены на рис. 4.

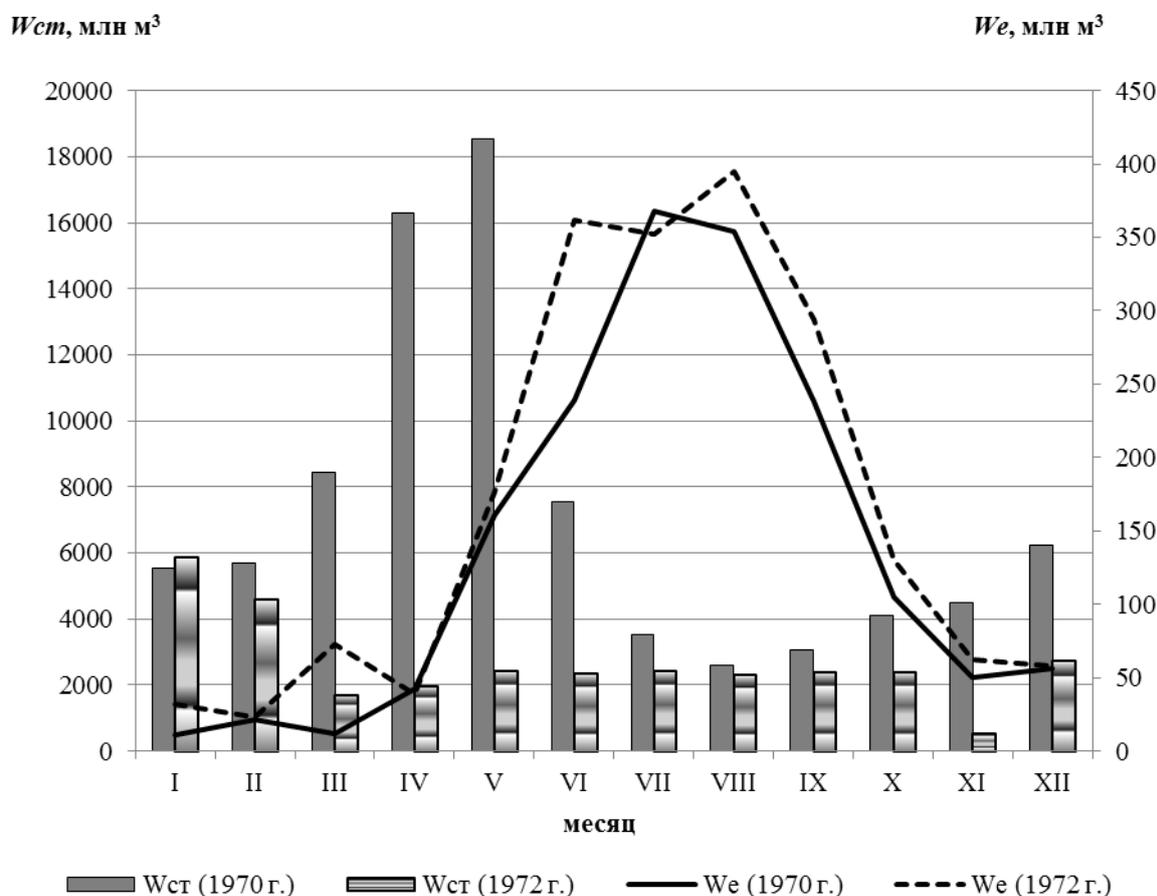


Рис. 4 – Хронологический график объемов стока ($W_{ст}$) и испарения (We) с водной поверхности Каховского водохранилища

Дефицит насыщения водяного пара над водной поверхностью водохранилища за характерные годы хронологически показан в виде кривых изменения $(e_0 - e_2)$ в гПа на рис. 5.

Отметим, что семейство кривых $(e_0 - e_2)$ ограничивается, в основном, сверху годом с максимальным (2007 г.), а снизу минимальным (1980 г.) годовым слоем испарения. На графике также нанесена линия среднемноголетнего дефицита насыщения водяного пара над водохранилищем за 55 лет эксплуатации водохранилища. Максимальная амплитуда колебания ограничивающих кривых находится в пределах от -10 до +13,55 гПа, а осредненной кривой от -0,89 до +11,81 гПа.

Учитывая, что на дефицит насыщения водяного пара над водохранилищем значительно влияет температура воды и воздуха, была построена зависимость дефицита $(e_0 - e_2)$ от температуры воды $t_{воды}, ^\circ\text{C}$ для всех характерных лет с определением коэффициентов корреляции по каждому году (рис. 6).

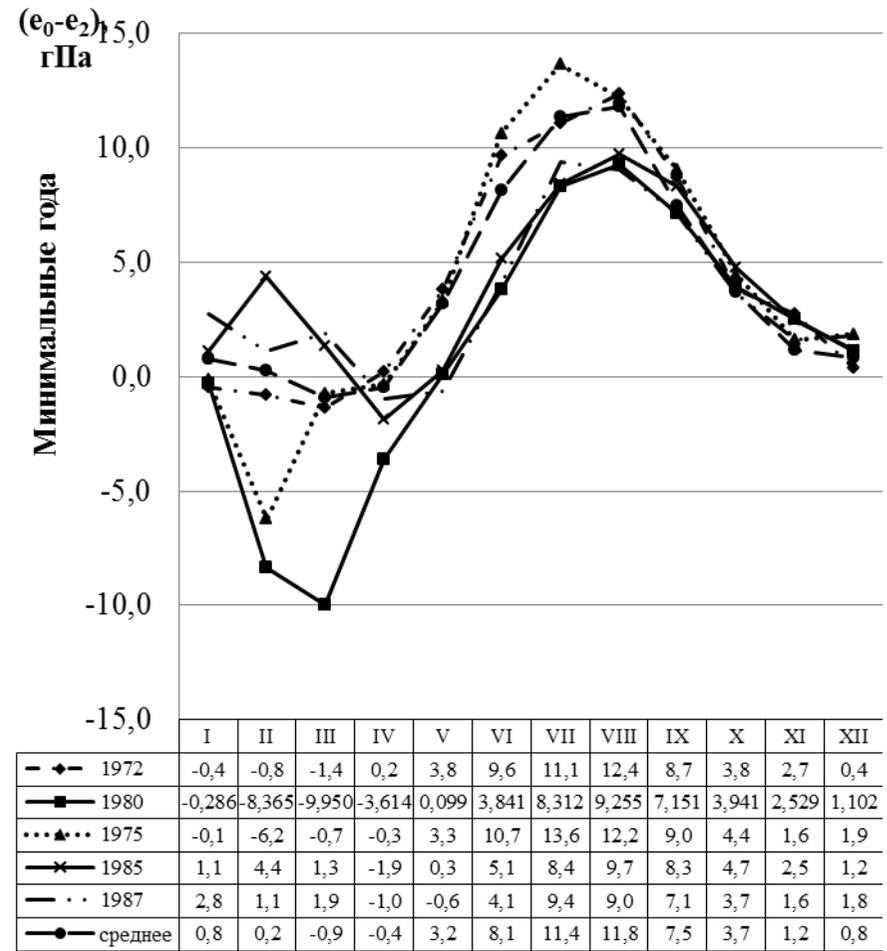
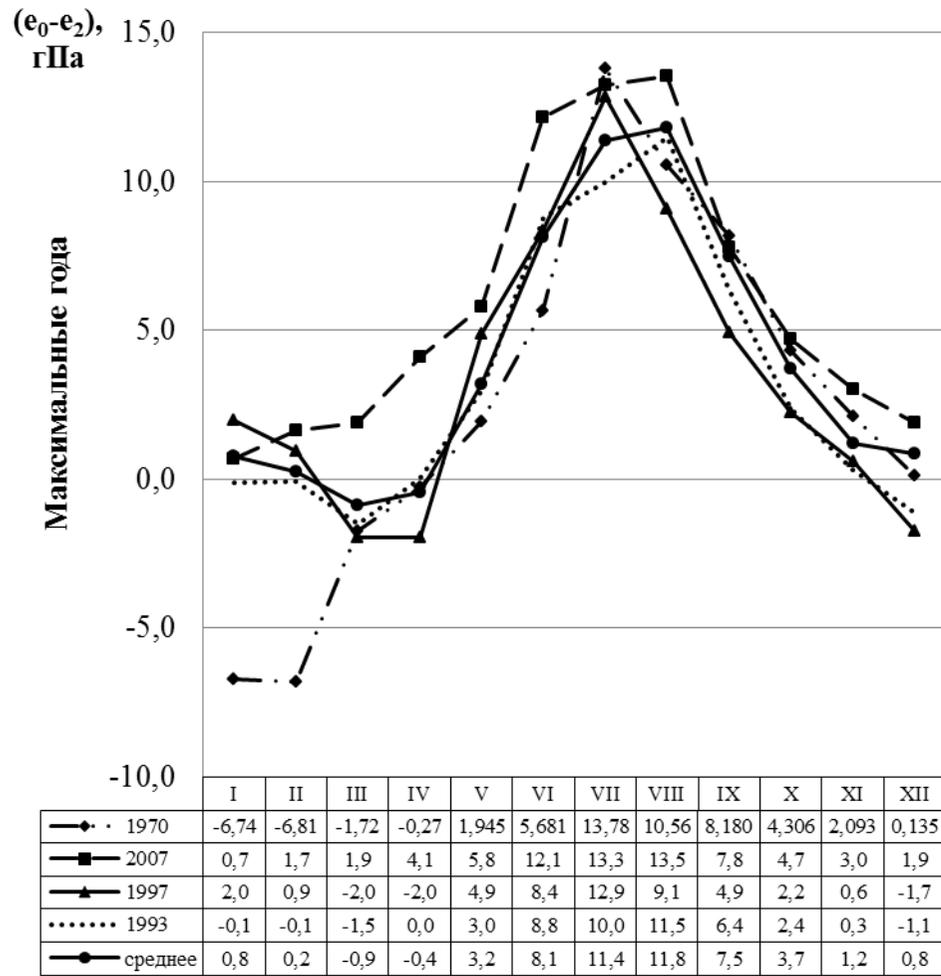


Рис. 5 – Хронологический график $(e_0 - e_2)$ за характерные годы для Каховского водохранилища

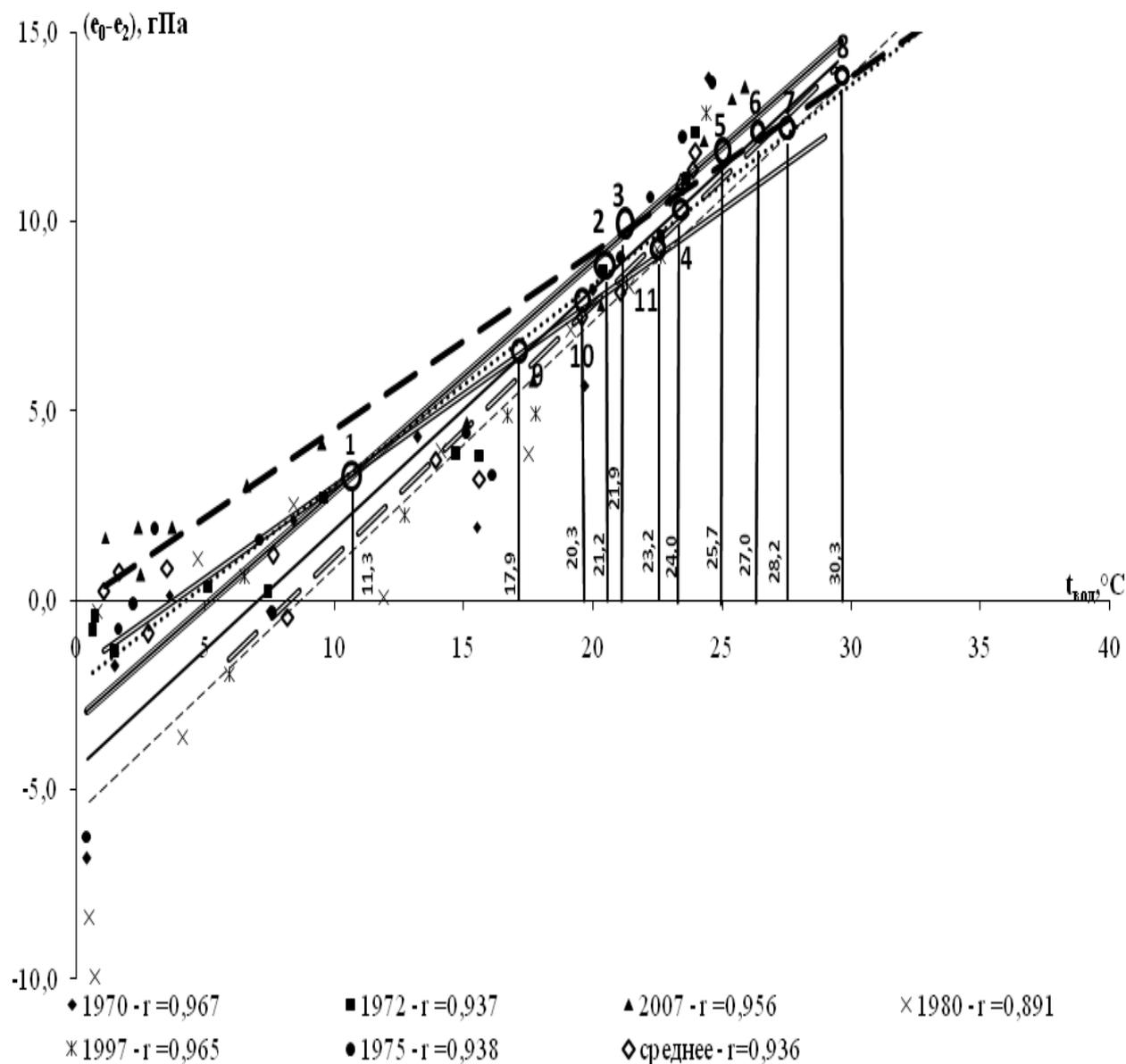


Рис. 6 – Зависимость $(e_0 - e_2) = f(t_{\text{воды}})$ для Каховского водохранилища

По среднемноголетним данным была построена также прямая, уравнение которой имеет вид:

$$(e_0 - e_2) = 0,485t_{\text{воды}} - 1,83. \quad (2)$$

Коэффициент корреляции $r=0,936$.

Следует отметить, что построенные прямые для характерных лет пересекаются и образуют систему характерных точек, для которых наблюдается общая величина температуры воды и дефицита насыщения водяного пара над водохранилищем (табл.1).

Таблица 1 – Характерные точки зависимости $(e_0 - e_2) = f(t_{\text{воды}})$ для характерных лет

№/№ точки	Пересечение прямых (лет)	Температура воды, $t_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	Дефицит насыщения водяного пара, $(e_0 - e_2)$, гПа	Коэффициент корреляции, r
1	1975×1972×среднее	11,3	3,5	0,938×0,937×0,936
2	1972×1970	21,2	8,7	0,937×0,967
3	1975×2007	21,9	10,0	0,938×0,956
4	1997×1972	24,0	10,3	0,965×0,937
5	2007×1970	25,7	12,0	0,956×0,967
6	2007×1997×1970	27,0	12,3	0,956×0,965×0,967
7	1972×1980	28,2	12,5	0,937×0,891
8	2007×1972×1980	30,3	13,8	0,956×0,937×0,891
9	среднее×1970	17,9	6,9	0,936×0,967
10	среднее×1997	20,3	7,9	0,936×0,965
11	среднее×1980	23,2	9,2	0,936×0,891

Отметим что, в 8-ой характерной точке пересекаются самые противоположные по значениям годового слоя испарения линии, т.е. в этой точке при $t_{\text{воды}}=30,3$ °C дефицит насыщения водяного пара будет одинаковым для 2007 и 1980 гг. и составляет +14 гПа. Это говорит о том, что с ростом температуры воды дефицит насыщения водяного пара приближается с года с максимальным к году с минимальным испарением, при $t_{\text{воды}}=30,3$ °C он сравнивается. В других характерных точках происходит тоже для других характерных лет. Кстати следует отметить очень высокие значения коэффициентов корреляции для зависимостей всех характерных лет.

На рис. 7 приведена графическая зависимость объемов и слоев испарения от дефицита насыщения водяного пара над водной поверхностью Каховского водохранилища для четырех характерных лет его эксплуатации.

Отметим, что коэффициент корреляции для приведенных зависимостей колеблется от 0,80 до 0,99, а также некоторое логичное совпадение зависимостей $We = f(e_0 - e_2)$ и $E = f(e_0 - e_2)$ для 2007 и 1972 годов, а также для 1980 и 1970 годов, т.е. для годов с высоким годовым испарением и маловодным по стоку, и для годов с низким годовым испарением и многоводным по стоку.

Аналитическое выражение зависимостей $We = f(e_0 - e_2)$ и $E = f(e_0 - e_2)$ для среднесезонных показателей характерных лет будет:

$$We = 28,36(e_0 - e_2) + 38,85; \quad R^2 = 0,963; \quad (3)$$

$$E = 13,17(e_0 - e_2) + 15,66; \quad R^2 = 0,958. \quad (4)$$

Обратим внимание, что при дефиците насыщения водяного пара (4÷5) гПа и объеме испарения 180 млн м³ все зависимости по We для исследуемых лет будут показывать одинаковые результаты.

Аналогичное совпадение будет и для слоя испарения E при дефиците насыщения водяного пара равном 6 гПа и суммарном слое около 90 мм.

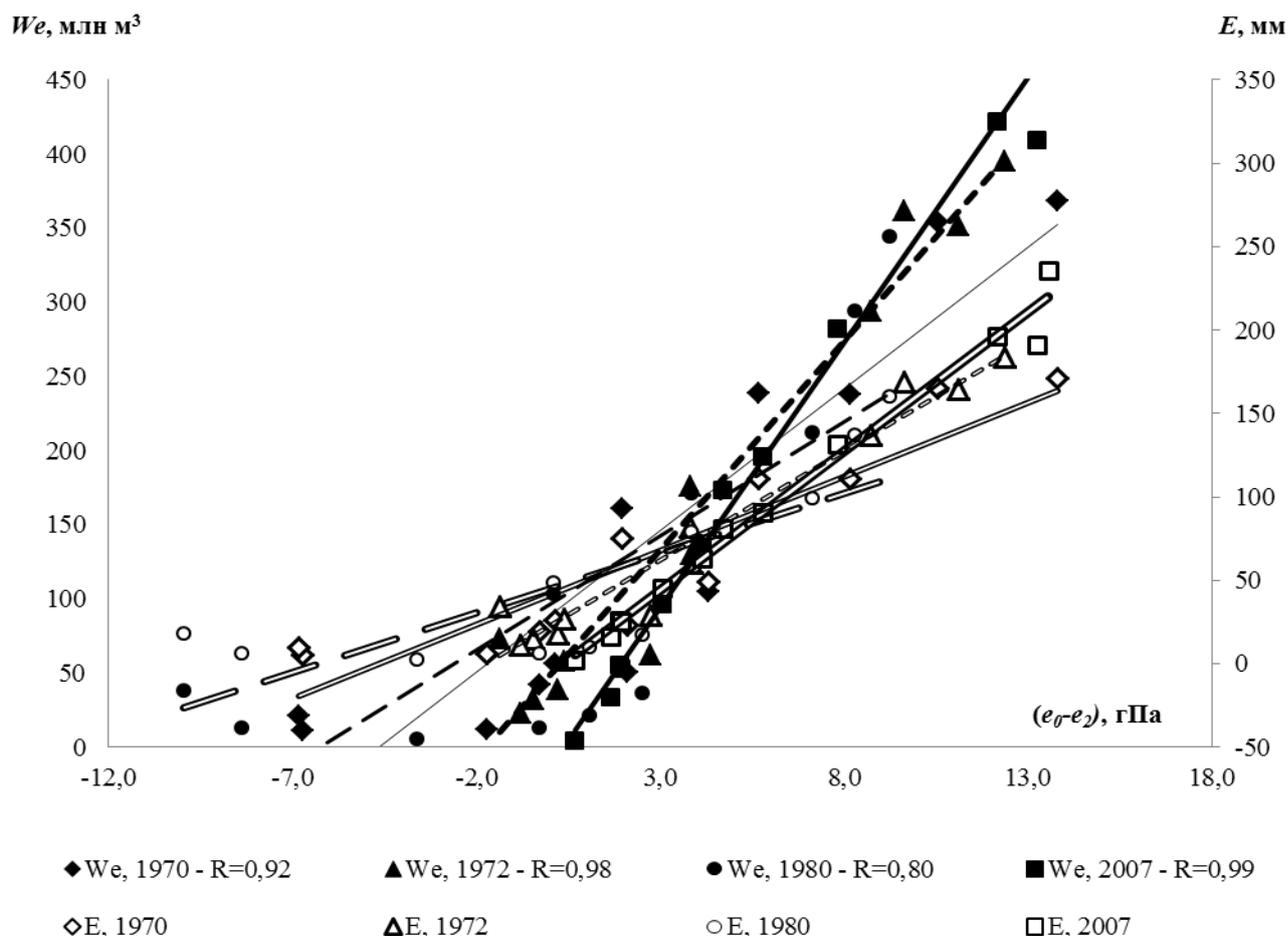


Рис. 7 – Зависимость объемов (We) и слоев (E) испарения от дефицита насыщения водяного пара для Каховского водохранилища

Построенное семейство разностных интегральных кривых на основе средних значений дефицита насыщения водяного пара над Каховским водохранилищем в 2007г. (рис. 8) показывает насколько различаются изменения дефицита насыщения водяного пара по отношению к самому «испаряемому» году (2007) для года с минимальным суммарным годовым испарением (1980), для многоводного (1970) и маловодного (1972).

Самая верхняя кривая соответствует 2007 году с высокими значениями дефицита насыщения водяного пара, а самая нижняя кривая – 1980 году с самыми низкими его значениями, т.е. эти кривые являются граничными для остальных характерных лет. На рис. 7 видно, что многоводный и маловодный годы заняли промежуточное положение между граничными интегральными кривыми.

Отметим, что кривые расположены через равные интервалы после июня. Максимальное отклонение кривой 1980 года от 2007 года в декабре оставляет 10 гПа, а в сентябре – 9,5 гПа. Амплитуда по каждой кривой между апрелем и декабрем уменьшается от 2007 года до 1980 года с 4 до 1 гПа.

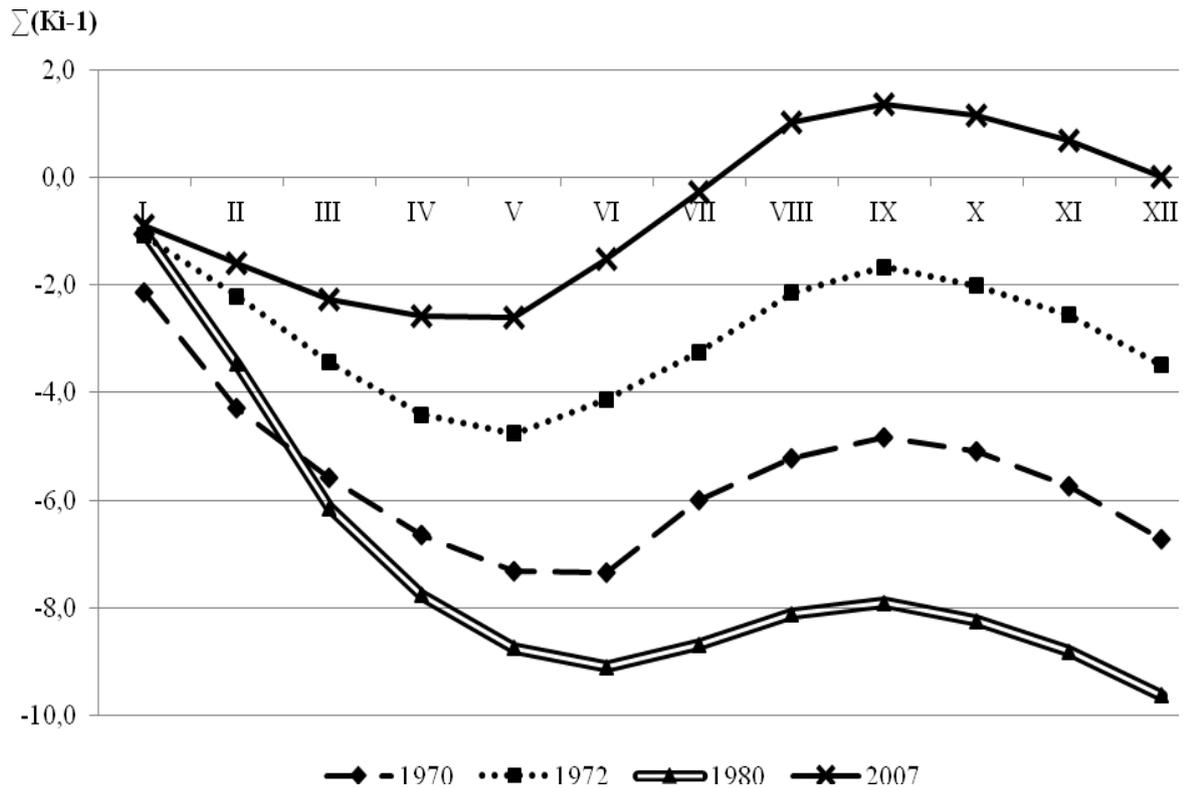


Рис. 8 – Разностные интегральные кривые дефицита насыщения водяного пара ($e_0 - e_2$) над водной поверхностью Каховского водохранилища

Выводы и рекомендации.

1. Годы с максимальным суммарным годовым испарением (2007 г.), а также максимальной среднегодовой температурой воздуха, и с минимальным суммарным годовым испарением (1980 г.) оказались определяющими и ограничивающими по изменениям всех гидрометеорологических показателей на Каховском водохранилище.
2. Получена обобщенная зависимость среднемноголетнего дефицита насыщения водяного пара над Каховским водохранилищем от среднемноголетней температуры воды его акватории с высоким коэффициентом корреляции 0,936.
3. Построенный график $(e_0 - e_2) = f(t_{\text{воды}})$ позволил для всех характерных лет выявить 11 характерных точек, объединяющих соответствующие прямые по температуре воды и дефициту насыщения водяного пара.
4. Выявлена обобщенная аналитическая зависимость среднемноголетнего объема и слоя испарения от среднемноголетней величины дефицита насыщения водяного пара над Каховским водохранилищем с коэффициентом корреляции 0,963 и 0,958 соответственно.
5. Разностные интегральные кривые показывают насколько различаются изменения дефицита насыщения водяного пара по отношению к самому «испаряемому» году (2007) для года с минимальным суммарным годовым испарением (1980), для многоводного (1970) и маловодного (1972).

Список литературы

1. *Леви И.И.* Инженерная гидрология. – М.: Высшая школа, 1968. – 240 с.
2. *Яцик А.В.* Водні ресурси: використання, охорона, відтворення, управління: Підручник для студентів вищих навч. закладів / А.В.Яцик, Ю.М.Грищенко, Л.А.Волкова, І.А.Пашенюк – К.: Генеза, 2007. - 360 с.
3. *Климат Одессы* / Под ред. Смекаловой Л.К. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 174 с.
4. *Указания по расчету испарения с поверхности водоемов.* – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 83 с.
5. *Вуглинский В.С.* Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 223 с.
6. *Справочник по водным ресурсам*/Под ред. Б.И. Стрельца.– К.:Урожай, 1987.– 304 с.
7. *Обухов Є.В., Корягіна О.С., Корецький Є.П.* Узагальнені оцінки випаровування з Каховського водосховища: Монографія. – Одеса: Поліграф, 2012. – 130 с.
8. *Обухов Є.В., Корягіна О.С., Корецький Є.П.* Порівняльні розрахунки випаровування з водної поверхні Каховського водосховища в сучасних умовах // Вісник Одеського державного екологічного університету. – Одеса, 2012. – Вип. 13. – С.187-195.
9. *Водяной пар в атмосфере* [Электронный ресурс] – режим доступа: rudocs.exdat.com/docs/index-398172.html.
10. *Клімат України* / За ред. В.М. Ліпінського, В.А Дячука, В.М. Бабіченко. – К.: Вид-во Раєвського, 2003. – 343 с.

Обухов Є.В., Корягіна О.С. Дефіцит насичення водяної пари та випаровування з водної поверхні Каховського водосховища.

На основі реальної гідрометеорологічної інформації за 55 років експлуатації водосховища досліджено вплив дефіциту насичення водяної пари над ним для характерних років його гідрометеорологічних показників.

Ключеві слова: водосховище, водна поверхня, випаровування, показники, температура, дефіцит, водяна пара.

Obukhov E.V., Koryagina E.S. Deficit a saturated water vapor and evaporation from the water surface Kakhovka reservoir

The effect of water vapor saturation deficit over the reservoir for typical years of its meteorological indicators based on the true hydrometeorological information for 55 years of operation of the reservoir was studied.

Keywords: reservoir, water surface, evaporation, indicators, temperature, lack of water vapor.