

## О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ВЛАГООБОРОТА И РАЗДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЗАРЯДОВ В АТМОСФЕРЕ

*\*Институт прикладной физики АНМ,  
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD–2028, Республика Молдова  
\*\*Государственный аграрный университет Молдовы,  
ул. Мирчеица, г. Кишинев, MD–2049, Республика Молдова*

**1. Вводные замечания.** Одним из самых распространенных природных атмосферных циклов является влагооборот, представляющий собой следующую последовательность термодинамических процессов: испарение воды с земной поверхности, ее подъем в виде пара в верхние, более холодные слои атмосферы, конденсация пара в этих слоях и образование облаков, выпадение воды на землю в виде осадков [1]. Весь этот цикл более или менее отчетливо сопровождается электрическими явлениями, обусловленными разделением электрических зарядов и завершающимися разрядами в виде разнообразных молний и свечений.

Изучение этих процессов и явлений в совокупности актуально, по крайней мере, в следующих целях: прогноз и управление погодой, получение воды и электрической энергии из атмосферы, причем это возможно как непосредственно на самих природных явлениях, так и на физико-математических (теоретических) или/и экспериментальных в естественных или лабораторных условиях.

В настоящее время атмосферные процессы изучаются в глобальных масштабах с помощью искусственных спутников Земли с использованием компьютерного моделирования соответствующих математических уравнений и их решений. Результаты этих исследований находят огромное количество приложений, в частности для достижения указанных выше целей, а также в авиации, мореплавании, сельском хозяйстве и т.д.

Что касается процессов получения воды и электроэнергии, то здесь необходимо локальное моделирование атмосферного влагооборота и сопутствующего ему атмосферного электричества. Именно о таком моделировании и идет речь в настоящей работе, при этом для получения воды из атмосферы и почвы достаточно моделирования лишь водного цикла.

**2. Моделирование влагооборота в естественных условиях.** Получение воды непосредственно для практических нужд (питья, орошения и т.д.) предполагает проведение не лабораторного, а природного моделирования. Решение этой задачи заявлено в АС [2, 3] (первые части).

Суть решения состоит в следующем. На склоне некоторого холма строится так называемый солнечный коллектор пара (СКП), представляющий собой по существу теплицу, расположенную вдоль склона (см. схему рис.1) таким образом, чтобы один ее конец оказался внизу склона, в более теплых слоях атмосферы, а другой - вверху, в более холодных. Для этого теплица (СКП) должна быть достаточно длинной, порядка десятков, а возможно, и сотен метров. Тогда может быть ощутима разность давлений за счет соответствующих разностей высот и температур, которые привели бы к движению влажного воздуха вверх внутри СКП.

К склону предъявляются два основных требования: он должен быть на солнечной стороне и достаточно влажным, то есть местность следует выбирать вблизи водоемов, источников воды, болота и т.д. Оба эти требования отвечают условию получения в теплице влажного воздуха в достаточно большом количестве. Сама влага образуется в результате ее испарения из почвы в основании СКП (рис.1). Как уже упоминалось, на торцах возникает разность давлений, поэтому в нижней и верхней частях СКП предусмотрены регулируемые окошки для входа (внизу) и выхода воздуха. Таким образом, влага в коллектор сможет поступать не только из почвы, но и из окружающей атмосферы.

В СКП моделируются испарение влаги и ее подъем в виде пара. Процесс конденсации осуществляется в специально построенном для этих целей наверху СКП конденсатора пара (КП), где моде-

лируется его конденсация в облаках. Конденсатор охлаждается извне за счет ветра, поэтому солнечный коллектор вместе с конденсатором названы солнечно-ветровой установкой (СВУ). Обратное поступление конденсата из КП в коллектор через кран  $K$  искусственно имитировал бы природный цикл, однако в практических целях конденсат поступает в специальный резервуар для воды (РВ). Этим и завершается процесс влагооборота и его использования в солнечно-ветровой установке (рис.1).

**3. Получение электрической энергии.** Для решения второй задачи предусмотрен электрогазодинамический генератор (ЭГДГ) [2–4], упрощенный расчет которого приведен в работе [5].

Принцип действия ЭГДГ следующий. Имеется система электродов типа “игла-кольцо”, на которую подается высокое постоянное напряжение ( $U \geq 2-3$  кВ). В такой системе, как известно, возникает коронный разряд [6], а в свою очередь и униполярный объемный заряд знака коронирующего электрода, в нашем случае – иглы. Если коронирующая система обдувается ветром, то объемный заряд сдувается в сторону третьего - противоэлектрода-коллектора обычно в виде металлической сетки. Таким образом, заряд от коронирующего электрода “накачивается” к противоэлектроду, создавая разность потенциалов, препятствующую “накачиванию” ветром зарядов. Эта разность и будет э.д.с. ЭГДГ.

Однако на чистом воздухе эффект генерирования э.д.с. слаб из-за малой парусности ионов воздуха [7] (высокая подвижность), поэтому в качестве рабочей среды в ЭГДГ предложено использовать аэрозоль воды [2,3,4,7], получаемый при смешении теплого влажного воздуха из СКП и холодного окружающего ветра (рис.1), поданного через специальный патрубок в ЭГДГ [2,3]. При этом ЭГД-эффект значительно возрастает.

Представляется, что нечто подобное имеет место и в атмосферных условиях, поэтому предположительно в ЭГДГ моделируются отдельные аспекты процесса разделения зарядов в облаках.

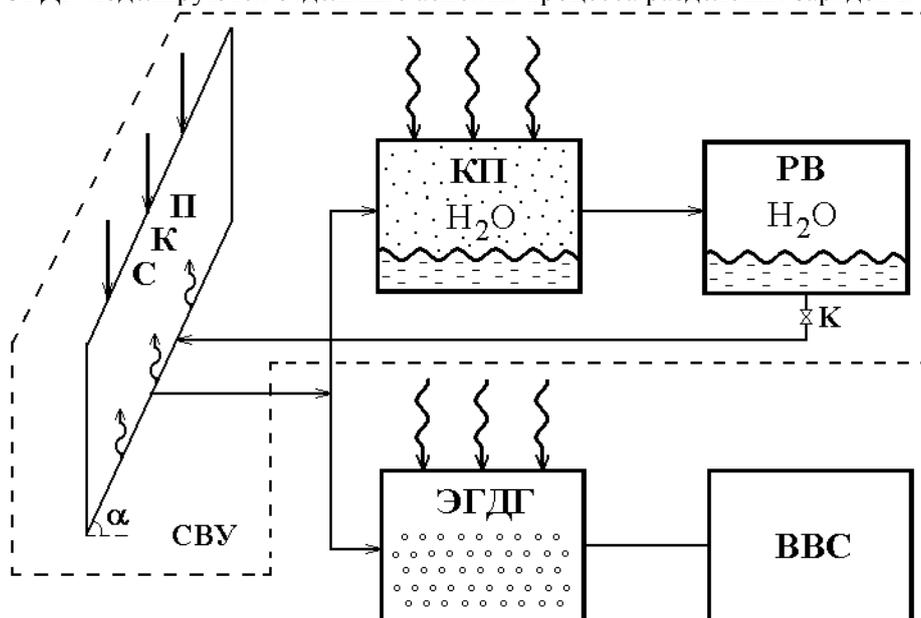


Рис.1. Солнечно-ветровой энергетический комплекс. СКП - солнечный коллектор; КП - конденсатор пара; РВ - резервуар для воды; ЭГДГ - электрогазодинамический генератор; ВВС – высоковольтная сеть;  $K$  – кран;  $\downarrow$  - солнечные лучи;  $\uparrow$  – ветер;  $\uparrow$  - пар

Солнечно-ветровая установка (обведена штрихом) вместе с ЭГДГ образуют солнечно-ветровой энергетический комплекс (СВЭК). Для практической реализации данного комплекса, очевидно, требуются дополнительные экспериментальные исследования в лабораторных условиях.

**4. Лабораторное моделирование атмосферных процессов влагооборота и разделения зарядов.** Ниже описаны конструктивные особенности экспериментального комплекса и происходящие в нем физические процессы, а также обсуждаются основные полученные результаты.

**4.1. Солнечный коллектор пара.** Экспериментальная модель СВУ представлена на рис. 2, на котором изображен коллектор в виде желоба длиной  $l = 1,40$  м, шириной  $b = 0,25$  м и регулируемой высотой слоя влажного воздуха ( $0,02 \leq h \leq 0,15$  м). Желоб более чем наполовину заполнен почвой (в основном смесью песка и керамзита) толщиной  $H = 0,20$  м. Посредине почвенного слоя  $l$  в продоль-

ном направлении проложены дренажные трубки 3 для подачи получаемого конденсата обратно в почву и имитации цикла влагооборота. Желоб сверху накрыт полиэтиленовой пленкой 2.

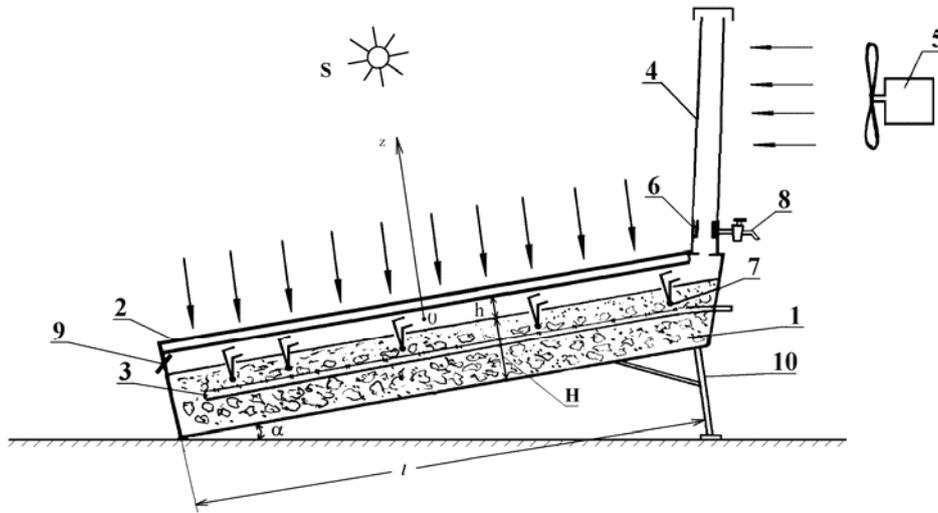


Рис. 2. Солнечный коллектор пара. 1 – почва, 2 – пленка, 3 – дренажная трубка, 4 – конденсатор, 5 – вентилятор, 6 – конденсат, 7 – термопара, 8 – кран, 9 – окошко, 10 – опора

Электрическая фотолампа  $S$  имитировала Солнце. С помощью термопар 7 измерялась температура поверхности почвы и внутри нее. Окошко 9 служит для регулирования подачи наружного воздуха в СКП. Регулируемым параметром, помимо высоты  $h$ , является еще и угол наклона к горизонту  $\alpha$ , который мог меняться в пределах  $0 \leq \alpha \leq 45^\circ$ . Почва увлажнялась водой. Нагрев почвы осуществлялся с помощью фотолампы, однако выяснилось, что такой нагрев быстро (примерно через 30 мин) приводит к высыханию поверхности почвы и резкому уменьшению интенсивности парообразования в коллекторе. Теоретические оценки показали, что в природных условиях время высыхания гораздо больше ( $\tau \sim 10$  час), поэтому нагрев лампой не моделирует природный процесс, и пришлось в глубь почвы на расстоянии  $\sim 2-3$  см вмонтировать проволочный нагреватель в керамической электроизоляции.

Задача о транспорте (движении) влажного воздуха в СКП в ламинарном режиме решена в работе [8], в которой расход воды в виде пара через поперечное сечение канала СКП выражается формулой

$$G_v = \gamma b \left( \frac{s_0}{b} G + \frac{Ah^3 r_s}{120} \right), \quad (1)$$

где  $\gamma$  – плотность влажного воздуха,  $s_0$  – средняя на уровне  $z = 0$  (рис. 2) относительная влажность воздуха,  $G$  – его объемный расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ , определяемый по формуле

$$G = b \int_{-h/2}^{h/2} v(z) dz = -\frac{\Delta P}{l} \cdot \frac{bh^3}{12\eta}, \quad (2)$$

где  $\Delta P/l$  – падение давления вдоль канала длиной  $l$ ,  $\eta$  – динамический коэффициент вязкости воздуха. Параметр  $A$  характеризует естественную конвекцию (ЕК) смешанной природы (термической –  $\beta\theta_s$  и влажностной –  $\beta_s r_s$ ) и равен:

$$A \equiv \frac{g(\beta\theta_s + \beta_s r_s) \sin \alpha}{6\nu}, \quad (3)$$

где  $\beta = -\frac{1}{\gamma_0} \left( \frac{\partial \gamma}{\partial T} \right)_0$ ;  $\beta_s = -\frac{1}{\gamma_0} \left( \frac{\partial \gamma}{\partial s} \right)_0$ ;  $\nu \equiv \eta/\gamma$ ,

а разности температур  $\theta_s$  и влажностей  $r_s$  на нижнем и верхнем основаниях слоя представлены выражениями:

$$\theta_s \equiv T_2 - T_1 = T\left(-\frac{h}{2}\right) - T\left(\frac{h}{2}\right); \quad r_s \equiv S_2 - S_1 = S\left(-\frac{h}{2}\right) - S\left(\frac{h}{2}\right). \quad (4)$$

Формулы (1) и (2)–(4) дают полную физическую картину того, что следует предпринимать в целях увеличения производительности (пара) СКП.

Остановившись вкратце на физических аспектах формулы (1), отметим, что первое слагаемое описывает поток пара, обусловленный неуравновешенным градиентом давления  $\Delta P/l$ , например ветровым напором, и если канал на торцах закрыт, то  $G = 0$ , и согласно формуле (1) массоперенос пара осуществляется исключительно за счет *ЕК*:

$$G_v = \frac{\gamma g (\beta\theta_s + \beta_s r_s) b h^3 r_s \cdot \sin \alpha}{720\nu}, \quad (5)$$

причем именно влажностный фактор ( $r_s \neq 0$ ) приводит к влагопереносу ( $G_v \neq 0$ ). При этом профиль скоростей – кубический ( $v \sim z^3$ ). В случае открытого канала на кубический профиль накладывается и параболический квадратичный, обусловленный именно перепадом давления, однако в лабораторных условиях (малые  $l$ ) перепад мал, и на первых порах им будем пренебрегать, ограничиваясь в расчетных целях формулой (5). Конвективный перенос влаги, в отличие от гидродинамического ( $\Delta P \neq 0$ ), представляет одну из особенностей функционирования солнечного коллектора в лабораторных условиях.

Отметим, что одномерное конвективное течение является неустойчивым при числах Грассгоффа:

$$Gr \equiv \frac{g (\beta\theta_s + \beta_s r_s) h^3}{\nu^2}, \quad (6)$$

близких к критическим  $Gr^* \leq 10^4$  и при  $\alpha \sim 30^\circ$  [9]. Полагая в (6)  $\beta\theta_s + \beta_s r_s \sim 10^{-3}$  и  $\nu \sim 10^{-4}$  м<sup>2</sup>/с [10], находим критическую высоту  $h_* \sim 20$  см, выше которой поток перестраивается в ячеистый - ячейки типа Бенара [10], катящиеся вниз-вверх в продольном направлении; при дальнейшем увеличении числа  $Gr$  поток становится турбулентным [9]. Критические значения  $h$  по более точным оценкам не превышают десятка сантиметров. Однако на первых порах, как уже отмечалось, ограничимся формулой (5), которая справедлива при двух условиях:

$$h < h_* \equiv \left( \frac{\nu^2 Gr^*}{g (\beta\theta_s + \beta_s r_s)} \right)^{1/3}, \quad (7)$$

$$h \ll b. \quad (8)$$

Второе из них не связано с устойчивостью движения, а является условием плоско-параллельности потока. Разумеется, из двух значений  $h$ , удовлетворяющих совместно условиям (7), (8), следует выбрать меньшее.

**4.2. Конденсатор пара.** Поток влажного воздуха из коллектора поступает в конденсатор пара 4 (рис. 2), который представляет собой тонкостенный металлический цилиндр высотой  $h_c = 880$  мм и диаметром  $d_c = 70$  мм. Снаружи конденсатор обдувался обычным комнатным вентилятором, который не только имитировал ветер, но и фактически охлаждал конденсатор. Следует заметить, что охлаждение происходило и за счет естественной конвекции.

Расход конденсата на основе [11] определялся обобщенной формулой:

$$\frac{G_c}{G_{co}} = 5,88 \cdot 10^{-3} \cdot \Pi \cdot (Gr Pr)^{0,25} \cdot Re^{0,6}, \quad (9)$$

где  $G_{co}$  – расход массы пара на входе в конденсатор,  $\Pi \equiv \frac{\lambda \theta_0 S}{r \cdot d \cdot G_{co}}$ ;  $Re \equiv \frac{v \cdot d}{\nu}$ ;  $Pr \equiv \nu/a$ ;

$Pr \equiv \nu/a$ ;  $S$  – боковая площадь конденсатора;  $d$  – диаметр;  $v$  – скорость обдува вентилятором;  $\theta_0$  – разность температур поверхности конденсатора и окружающего воздуха.

**4.3. Электродинамический генератор.** Выше в общих чертах был описан ЭДГ-генератор, предусмотренный для природного энергетического комплекса, в котором аэрозоль образовывался в результате смешения пара с холодным воздухом на входе в ЭДГ. Первые опыты с таким способом получения аэрозоля показали недостаточную эффективность работы ЭДГ, поэтому был использован другой вариант, когда коронирующий электрод (в виде ошипованной сферической поверхности) орошался водой и одновременно обдувался воздушным потоком. В результате возникало диспергирование воды вследствие как электростатических сил отталкивания, так и гидродинамических факторов. В этом состоит и другая особенность лабораторной модели ЭДГ.

Этот способ получения грубодисперсной рабочей среды для ЭДГ оказался более эффективным, но предусматривающим автономный источник высокого напряжения для поддержания коронного разряда, который отсутствует в природных условиях или завуалирован. Потребовалось такое решение задачи, когда электричество “просто” возникает, и в лабораторных условиях ее решает очень остроумно генератор Кельвина (ГК), схема которого приведена на рис. 3.

Принцип его работы следующий. Пусть первая, например упавшая из капилляра  $a'$  капля, имеет случайный положительный заряд. Этот заряд, падая в изолированный от земли металлический сосуд  $a$ , зарядит его и электрически связанный с ним цилиндрический электрод  $B$  (рис. 3). Тогда очередная капля, падающая из капилляра  $b'$ , зарядится наведенным от электрода  $B$  отрицательным зарядом, и этот заряд будет передан сосуду  $b$  и электроду  $A$ . При этом последующие капли из капилляра  $a'$  будут усиливать свой положительный заряд, а из  $b'$  - отрицательный.

Таким образом, между сосудами ( $a, b$ ) или электродами ( $A, B$ ) возникает разность потенциалов, которую можно непосредственно измерить с помощью электростатического киловольтметра, и в данном случае фактически это будет э.д.с. ГК. Если замкнуть цилиндры  $A, B$  высокоомным резистором, то по нему потечет ток, а резистор является сопротивлением нагрузки.

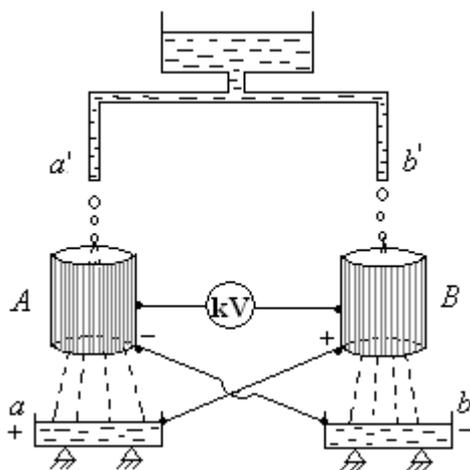


Рис. 3. Генератор Кельвина

$a', b'$  – капилляры;  $A, B$  – цилиндры-электроды;  $a, b$  – сосуды для сбора заряженной воды

Система сосудов и электродов ( $a, B$ ) и ( $b, A$ ) представляет конденсатор, и заряд, накопленный им, определится по формуле

$$Q = C \cdot \varepsilon, \quad (10)$$

где  $C$  – электрическая емкость,  $\varepsilon$  = э.д.с. ГК.

Отсюда сила тока зарядки конденсатора равна:

$$I = \frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{d\varepsilon}{dt}. \quad (11)$$

Отметим, что по мере увеличения размеров капель происходит их слияние и возникает струйный режим работы ГК, когда генерируемая разность потенциалов значительно увеличивается. Простейший ГК размерами сосудов ( $a, b$ ) и цилиндров ( $A, B$ )  $\sim (10 \times 10)$  см могут обеспечить э.д.с.  $\varepsilon$  до 10–15 кВ за время в несколько минут. В струйном режиме зарядка происходит за считанные секунды.

Более эффективным оказывается комбинированный ЭГД-генератор, когда капли из капилляров  $a, b$  дополнительно сдуваются потоком воздуха (ветром) с помощью специальной конструкции в виде трубки  $C$ , надетой на капельницах  $a, b$  согласно рис. 4.

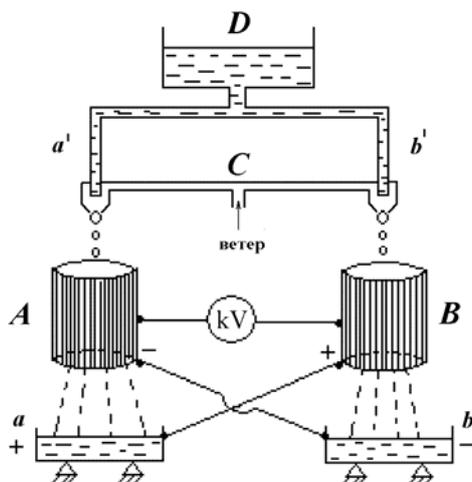


Рис. 4 Комбинированный ЭГД-генератор

Детали работы “генератора Кельвина” в грозовых облаках не затрагиваем. Возможно, влаговоздушные струи в комбинированном варианте рис.4 дадут определенные пояснения.

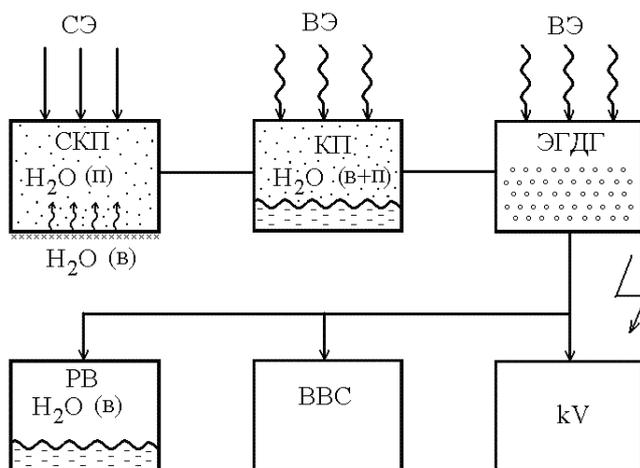


Рис. 5. Блок-схема ветроэнергетического комплекса с электрогидродинамическим генератором. СКП – солнечный коллектор пара; КП – конденсатор пара; ЭГДГ – электрогидродинамический генератор; РВ – резервуар воды; ВЭС – высоковольтная сеть; СЭ – солнечная энергия; ВЭ – ветровая энергия;  $\downarrow\downarrow$  – солнечная радиация;  $\sim\sim\sim$  – ветер;  $\uparrow\uparrow$  – пар

Связь предыдущих компонент комплекса с ЭГД-генератором осуществляется непосредственно путем стока конденсата в сосуд  $D$ , питающий ЭГД-генератор; схема всего энергетического комплекса представлена на рис.5. Наличие генератора Кельвина вместо электрогазодинамического представляет собой еще одно отличие первоначального варианта комплекса от рассматриваемого лабораторного.

Комплекс работает согласно следующей схеме. Благодаря солнечному нагреву вода испаряется из почвы, образуя в коллекторе влажный воздух. При благоприятных условиях допустимо попадание влажного воздуха и снаружи СКП. Влажный воздух за счет естественной конвекции попадает в конденсатор пара (КП), откуда в виде конденсата попадает в ЭГД-генератор или типа Кельвина, или же комбинированного типа. В случае необходимости через кран  $K$  конденсат может попадать в резервуар непосредственно для воды (РВ). Из ЭГДГ отработанная вода попадает в РВ, откуда при орга-

низации цикла может снова попасть в коллектор по дренажным трубкам. Генерируемая ЭДС после соответствующих преобразований подается в высоковольтную сеть к потребителю электроэнергии.

В ламинарном режиме при  $h = 0,07$  м,  $\alpha = 27^\circ$  в среднем было получено  $G_c \approx 10^{-4}$  кг/с и э.д.с.  $\sim 15$  кВ при  $I \sim 1$  мкА. В природных условиях эти эффекты проявляются в десятки раз сильнее.

**Выводы.** Рассмотрены возможности получения воды и электроэнергии из атмосферы и почвы; обсуждены пути их осуществления.

Приводятся физические соображения и формулы, согласно которым создана экспериментальная установка, имитирующая природные атмосферные процессы влагооборота и разделения электрических зарядов.

Показана принципиальная возможность физического моделирования указанных процессов в лабораторных условиях и их практического использования.

На сложном пути изучения атмосферных явлений, включая электрические, не только в научных, но и прикладных целях сделаны лишь первые шаги, свидетельствующие о том, что имеются резервы для усовершенствования солнечно-энергетического электрогидродинамического комплекса.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. Т.2. Л.: Гидрометеиздат, 1978.
2. Cojuhari I., Bologa M. Instalație eoliană electrohidrodinamică. Brevet de invenție. MD-2199, (13) B1, 2003.
3. Bologa M., Cojuhari I., Leu V. Instalație eoliană electrohidrodinamică. Brevet de invenție. MD-2028, BOP1, 2005.
4. Рубашов И.Б., Бортников Ю.С. Электрогазодинамика. М.: Атомиздат, 1971.
5. Болога М.К., Гросу Ф.П., Кожухарь И.А. К расчету ветрового электрогазодинамического генератора // Электронная обработка материалов. 2003. № 4. С. 37.
6. Капцов Н.А. Электрические явления в газах и вакууме. М.: Гостехиздат, 1950.
7. Ветро-энергетика / Под ред. Д. де Рензо. М.: Энергоатомиздат, 1982.
8. Гросу Ф.П. Естественная конвекция заряженного влажного воздуха в наклонном плоском конденсаторе // Электронная обработка материалов. 2005. № 3. С. 50.
9. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. Т. VI. М.: Наука, 1986.
11. Исаченко В.П., Осипов В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1975.

Поступила 06.03.07

## Summary

Possibilities of obtaining water and electric energy from atmosphere by means of simulation of the local atmospheric moisture cycle as well as electrical phenomena which accompany it both in the natural (on the hill slope) and laboratory conditions are discussed. Principal possibility of achieving these purposes according to the natural analogy is shown experimentally.