

## ГАЗОДИНАМИКА

УДК 533:536.46+537

*Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г.*

*Владимирский государственный университет. г. Владимир, ул. Горького 87. Россия.*

*E-mail: [artemi-k@mail.ru](mailto:artemi-k@mail.ru)*

### **Генерация носителей электрического заряда малой подвижности**

*Приводятся результаты натурных экспериментов с метеотронным комплексом «Атмосфера». Для стимулирования развития облаков в восходящий поток вводится до 100 кг/с водного тумана, образующегося при распылении воды струей турбореактивного двигателя. Проведен предварительный анализ результатов модельных опытов по электризации водно-капельного потока.*

**Введение.** Естественные процессы электризации капель топлива в разной степени обеспечивают в объеме факела пламени метеотрона наличие некомпенсированного отрицательного электрического заряда [1]. Работа установки метеотрон сопровождается возмущением локального электрического поля [2]. Разработка способов управления параметрами возмущенного электрического поля требует решения двух задач: принудительного введения в восходящую нагретую струю метеотрона носителей электрических зарядов малой подвижности и сообщения им электрического заряда. Количество микро-загрязнений в топливе ТС-1 из отстойного резервуара не превышает 1 грамм на тонну топлива, а размеры частиц нагретой струи турбореактивного двигателя (РД) составляют 1 – 40 мкм с превалированием (до 90 %) размера 1 – 3 мкм [3]. В качестве транспорта электрических зарядов до уровня инверсионного слоя было предложено использовать частицы водяного пара, образующегося при встрече потока водного аэрозоля с нагретой струей РД.

**Эксперименты по генерации водного аэрозоля.** Система генерации водного тумана состоит из турбореактивного двигателя (РД) 1, системы управления и отстойного резервуара 2, трубопровода для подачи воды 3 с насадкой 4, системы водозабора 5, насосной станции 6, расходомера 7, контрольного манометра 8, вентиляей 9 и трубы слива 10 воды в бассейн с подводной антенной [4] (рис. 1).

На номинальном режиме работы РД типа ВК1А [5] и расходах воды до 100 л/с исследована эффективность генерации водного аэрозоля в нагретой струе РД при различном расположении насадка разбрызгивателя относительно оси сопла (рис. 1 а, б). Оригинальная конструкция насадка 4 с площадкой разбрызгивателя (рис. 1, 2) обеспечила эффективную генерацию водяного аэрозоля в интервале расходов воды (40 – 100) л/с (рис. 2).

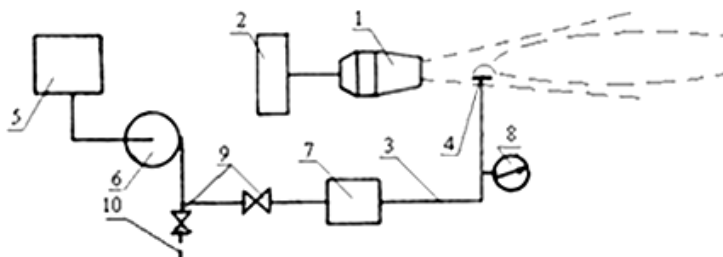


Рис. 1 Принципиальная схема системы генерации водного тумана

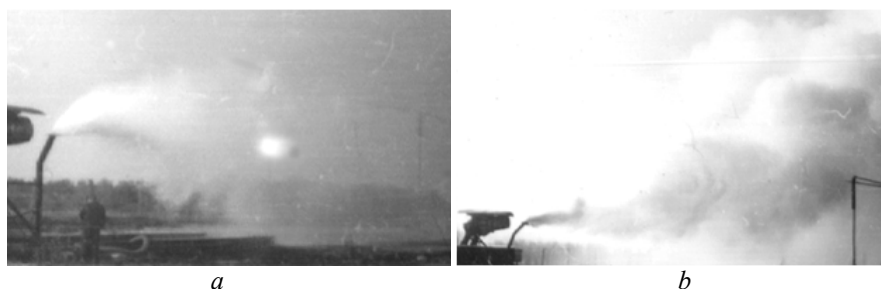


Рис. 2 Копия фотографии распылительной части (1 – 4 по рис. 1) при работе системы генерации водного аэрозоля в нагретой струе РД при двух ориентациях насадки разбрызгивателя относительно оси сопла РД: 60° (а); 45° (б). Двигатель работает на номинальном режиме: 8000 об/мин, средняя начальная скорость – 400 м/с, температура продуктов сгорания на срезе сопла 600°С. Расход воды – 100 л/с, дальность – 68 м

При большом угле наклона насадка (рис. 2а) жидкая среда при выходе срезается скоростным напором продуктов сгорания на направляющую площадку [5] и далее, при срывах с нее, формируется иной по качеству поток воды с мелкомасштабной турбулентностью. Барботирование нагретых продуктов сгорания РД с водным потоком происходит генерацией и эволюцией последнего пленочным сдуванием (срывом) сплошной воды с направляющей площадки, захватом и дроблением скоростным напором струи РД с текущим испарением и результирующим рассеянием в пределах активного участка (до 10 м). Авторы не сумели обнаружить четких границ получающейся водно-капельной (туманной) дымки, хотя на фотографии (рис. 2а) левая граница визуально четко прослеживается.

При уменьшении угла наклона насадка разбрызгивателя относительно оси сопла РД (рис. 2б) размер горизонтальной площадки на выходе разбрызгивателя корректировался удлинением. Струя продуктов сгорания РД захватывает поток воды в нагретый скоростной «кокон». Периферийные слои инерционного потока воды нагреваются и срываются. Вся струя воды сбалансировано смещается в целом вниз в поле тяготения и вверх в результате прогрева. Объемное расширение струи свидетельствует о завершении формирования паровоздушной фазы с характерными особенностями: зависанием над поверхностью

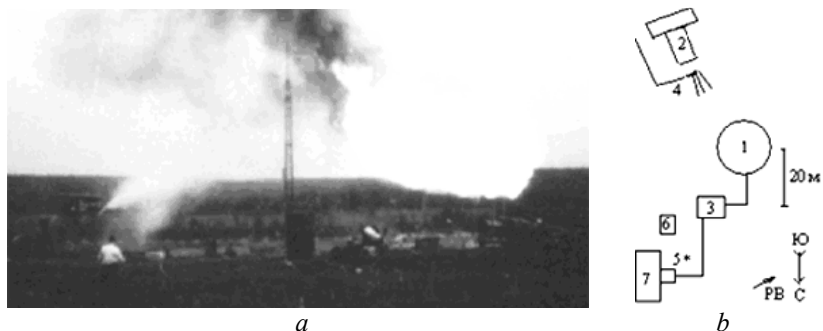
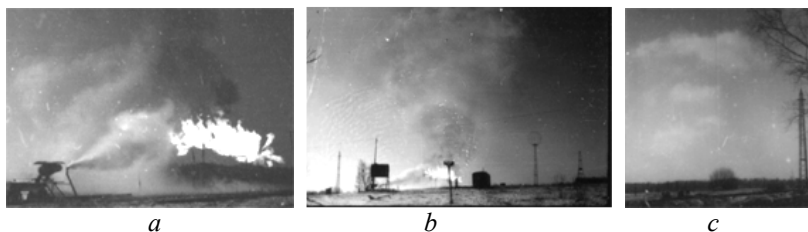


Рис. 3 Компьютерная версия фотографии работы МКА (а) и схема расположения элементов МКА (б)

земли и четко очерченными границами. Теплое аэрозольное облако автономно перемещалось в поле зрения при слабопеременной ветровой нагрузке (1 – 2 м/с) в форме локального адвективного тумана без заметного рассеяния и оседания. Простая оценка, основанная на стремлении сил сопротивления к минимальному значению, показывает, что для облака диаметром 100 м и средним диаметром капель 50 мкм верхняя предельная концентрация капель, при которой облако еще будет рассеиваться ветром, составляет  $3 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ . При большей концентрации размеры облака при ветровой нагрузке не меняются, подтверждая известный факт о практической трудности рассеяния облака при его обдувании. Облачное образование рассматривается единым объектом [6].

**Вертикальный транспорт водяного пара нагретой струей метеотрона до уровня слоя инверсии.** Турбореактивный двигатель (РД), система подачи воды и метеотрон составили метеотронный комплекс «Атмосфера» (МКА) (рис. 3а). Относительное расположение системы устройств МКА на рис. 3а схематично представлено на рис. 3б в проекции фотоснимка. Вода подавалась по водопроводу к направляющей площадке разбрызгивателя 4, расположенной на оси сопла РД 2. Нагретый водяной аэрозоль подавался в нулевое сечение струи метеотрона 1, работающего при открытом сгорании топлива керосин ТС1. На номинальном режиме работы топливо подавалось из емкости 7 системой подкачивающих насосов 5 низкого давления к системе насосов высокого давления 3. Фотография (рис. 1) сделана оператором на насосах 5 (место съемки обозначено \*). Наблюдатель 6 включен в снимок в качестве масштабной единицы. На рис. 3б показано и направление «фозы ветров» (РВ).

Наземное расположение РД и системы подачи воды не позволяет «достреливать» водный аэрозоль до начального сечения тепловой колонны факела без взаимодействия с радиационным излучением очага пламени, что приводит к огромным потерям воды. При работе метеотрона на номинальном режиме при давлении подачи топлива 100 атм водный аэрозоль в потоке струи РД мгновенно испарялся на значительном расстоянии от факела метеотрона. Это видно ви-

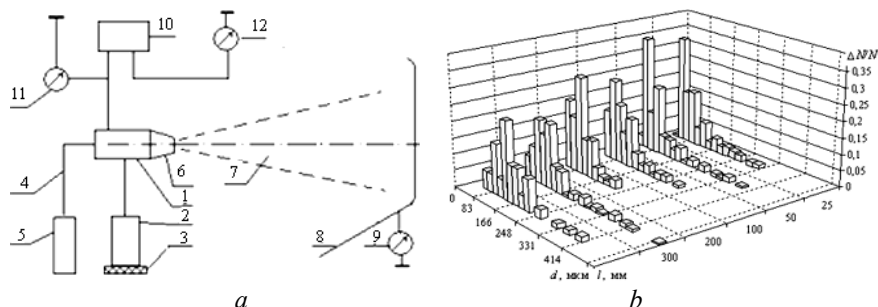


**Рис. 4** Компьютерные версии фотографий работы МКА в опыте по образованию облачного следа – от начала работы: через 20 минут (а), через 40 минут (b), через 60 минут при выключенной установке (с)

зуально – струя как бы «срезается» вертикальной плоскостью, за которой ее уже не видно (см. рис. 3а). Далее циркуляционные течения захватывали паровоздушную смесь и в конечном итоге втягивали в струю метеотрона. Однако, в вертикальный температурный конус радиационного прогрева попадали лишь малые частицы, а крупные частицы выпадали. Большая часть паров воды уходила также на пассивный участок струи (рис. 4а). Облачный след «по ветру» на слое изотермии был получен (рис. 4b,c), но пробить этот слой влажной нагретой струей не удалось. В рамках рассматриваемой системы устройств пришлось уйти от номинального (без задымления) режима работы метеотрона в сторону снижения мощности тепловыделения. Подъем очага пламени на высокие штативы стал не обязательным и даже вредным с позиции сохранения сплошности факела. В конечном итоге, топливные плети были сближены и опущены на штативы высотой 1 м (малый метеотрон). При слабой и медленно формируемой циркуляции воздуха появилась возможность подавать водный аэрозоль под малым углом наклона непосредственно в нагретую вертикальную колонну.

**Электризация водно-капельного потока. Моделирование.** При решении второй поставленной задачи одним из способов сообщения электрического заряда, сочетающимся с системой распыления и транспортировки капель воды в струю метеотрона [7], представляется электризация капельно-воздушной смеси с устройства постоянного потенциала относительно земли. Для выяснения параметров полевого источника [7] и механизмов эффективной электризации водно-капельной струи, была создана его лабораторная модель, состоящая из пульверизатора 1, емкости для распыляемой жидкости 2, установленных на изоляторе 3. Пульверизатор был помещен в струю воздуха, который подавался по изолирующему трубопроводу 4 компрессором 5 с насадкой 6. Струя капель 7 улавливалась на коллекторе 8 из металлической пластины, ток с которой на землю измерялся гальванометром 9. Разность потенциалов  $U$  между пульверизатором и землей поддерживалась высоковольтным источником 10 и измерялась вольтметром 11, а ток с пульверизатора – гальванометром 12 (рис. 5а).

При распылении водопроводной воды размер капель определялся микрофотографированием парафинированной стеклянной пластинки, вводимой в капельную струю на расстоянии  $l$  от сопла насадка пульверизатора. На расстоя-

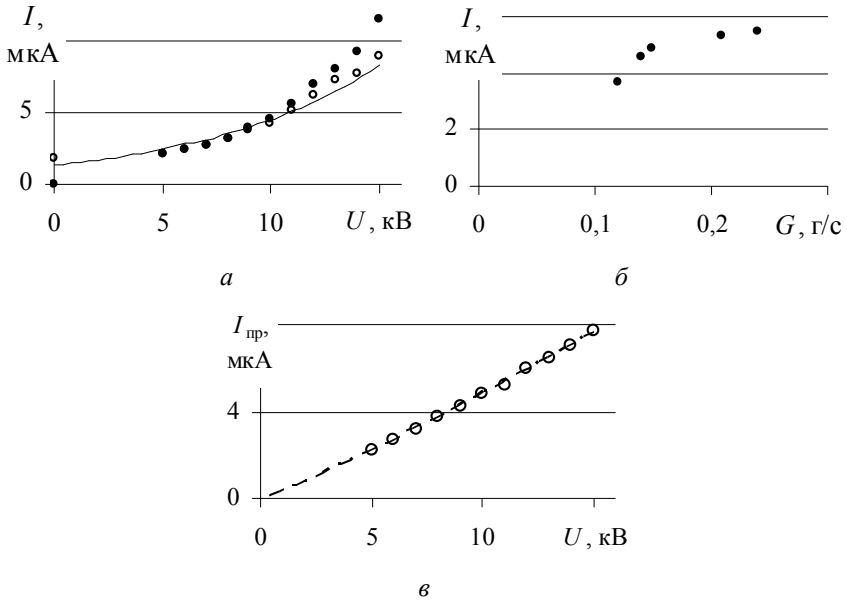


**Рис. 5** Схема установки электризации распыленной водяной струи (а) и распределение капель по диаметру  $d$  в распыленной струе на расстоянии  $l$  от сопла насадка пульверизатора (b).

нии  $l = 25$  мм и  $l = 50$  мм стекло проносилось сквозь струю за время порядка 0,1 с. При больших расстояниях время «засветки» увеличивалось. На гистограммах диаметров  $d$  каплей в зависимости от  $l$  по оси ординат отложена относительная частота попаданий  $\Delta N/N$  значений диаметров в соответствующий интервал  $\Delta d$  (рис. 5b). При росте  $l$  сильная асимметрия экспериментального полигона постепенно уменьшается смещением наиболее вероятного значения диаметра каплей в сторону трехкратного укрупнения с падением представительности, указывая на нелинейную интенсификацию коагуляции каплей по длине струи. Оказалось, что при поиске соответствия параметров струи конвекционному току на коллектор необходимо проводить измерения в приближении к насадке ( $l = 25 - 50$  мм).

При постоянном расходе воды  $G$  и давлении компрессора воздуха рост потенциала  $U$  на распылителе относительно «земли» сопровождался одинаковым ростом тока  $I$  с распылителя и коллектора до значений  $U = 10$  кВ. Далее, при росте  $U$ , ток с коллектора начинал превышать исходный ток. Отношение этих токов растет слабо пропорционально росту  $U$ , указывая на влияние электрического поля распылителя на потенциал металлической пластины коллектора (рис. 6а). Оставляя в стороне это влияние и проводя исследования в пределах 10 кВ, получаем постоянство среднего электрического заряда  $\langle q \rangle$  в струе при фиксированном значении  $U$ . Электрический заряд, уносимый каплями воды в единицу времени с пульверизатора (распылителя), адекватно определяет величину измеряемого конвекционного тока при разности потенциалов до 10 кВ. Прямым подтверждением принятого механизма электризации распыленной водной струи является отсутствие тока с пульверизатора при распылении, если на него надеть металлический цилиндр так, чтобы отрыв каплей происходил внутри него, а вылетающая струя не касалась этого цилиндрика.

Для конвекционного тока  $\langle q \rangle = I/\langle n \rangle$ , где средний расход капель одинакового среднего размера (диаметра  $\langle d \rangle$ )  $\langle n \rangle = G/(\rho \langle V \rangle)$  при среднем объеме  $\langle V \rangle$  капли воды массовой плотностью  $\rho$ . Это позволяет оценить средний заряд на капле  $\langle q \rangle = I\rho \langle V \rangle / G$  и размер капли, осредненный по току с распылителя. При расходе воды  $G = 0,278$  г/с и токе  $I = 1$  мкА средний заряд капли определя-



**Рис. 6** Графические зависимости тока  $I$  с коллектора (+) и pulverизатора (o) от разности потенциалов  $U$  (а), тока с распылителя  $I$ : от расхода воды  $G$  при постоянном потенциале  $U = 10 \text{ кВ}$  (б) и от потенциала распылителя  $U$  при приведенном расходе воды  $G = 0,278 \text{ г/с}$  с линией тренда  $I_{\text{пр}} = 0,35U^{1,13}$  при достоверности аппроксимации  $R^2 = 1$  (в)

ется сильной зависимостью от среднего диаметра капли:  $\langle q \rangle \approx 2\langle d \rangle^3$ , Кл. С другой стороны, полагая  $\langle q \rangle = \langle C \rangle U$ , при электроемкости сферической капли  $C = 4\pi\epsilon\epsilon_0\langle r \rangle$  и линейной зависимости  $I = kU$  получаем  $\langle r \rangle = \sqrt{\frac{3\epsilon_0 G}{k\rho}}$ , что при  $k = 5 \cdot 10^{-10} \text{ А/В}$ , дает результат  $\langle d \rangle = 243 \text{ мкм}$ . Однако, даже среднее по потоку (в шести сечениях) значение диаметра (94 мкм) более чем в 2,5 раза меньше расчетного. Кроме этого, на расстоянии  $l = 25 \text{ мм}$  от распылителя средний электрический заряд  $\langle q_k \rangle = \langle C_k \rangle U = 4,7 \cdot 10^{-11} \text{ Кл}$ , или  $3 \cdot 10^8$  элементарных зарядов ( $q$ , эл. зар.), что превышает почти на порядок предел Релея ( $4,45 \cdot 10^7$  эл. зар.) для капель воды с  $\langle r \rangle = 50 \text{ мкм}$  [6]. Это ставит под сомнение, что все капли при отрыве принимают потенциал распылителя и, в свою очередь, линейную зависимость заряда капель от их радиуса [8] в описанных выше условиях эксперимента. Подтверждением первого сомнения является участок насыщения по току с распылителя при росте расхода воды (рис. 6б).

Фактически линейная связь тока и потенциала при постоянном расходе (рис. 6в) ставит под сомнение второе допущение, так как, следуя принятой логике максимальное значение по току при  $U = 10 \text{ кВ}$  не должно меняться и при росте  $U$ . Постоянный расход воды на заданной установке с постоянными харак-

теристиками обдува и распыла обеспечивает постоянным среднее число капель с заданным распределением по размеру. Растущий пропорционально потенциалу ток с распылителя, указывает на рост заряда, уходящего с распылителя в единицу времени, а, следовательно, на пропорциональный рост зарядов на каплях, точно в соответствие с подвергнутой сомнению формулой. В таком случае резонно предположить, что помимо процессов барботирования при распыле воды с обдувом воздухом, включается иной процесс – электрического дробления капель при превышении внешней силы электрического поля на поверхности капли над внутренней силой ее поверхностного натяжения. При сильных электрических полях собственный потенциал капли, ограничен указанным процессом. Ток растет за счет роста количества носителей меньшего радиуса, что и позволяет переносить водно-капельному потоку больший заряд в единицу времени. Это предполагает смещение функции распределения капель по размерам в сторону меньших диаметров (см. рис. 5b).

### Литература:

1. *Кузнецов А.А.* Зондовая диагностика пламени метеотрона // Физика горения и взрыва. – 2003. – Т. 39, № 3. – С. 39 – 49.
2. *Конопасов Н.Г., Кунин В.Н., Кузнецов А.А.* Электромагнитное поле увлажненной тепловой вертикальной струи метеотрона // Физика атмосферы и океана. – 1985. – Т. 21, № 6. – С. 662 – 666.
3. *Зрелов В.Н., Пискунов В.А.* Реактивные двигатели и топливо. – М.: Машиностроение. – 1968. – 312 с.
4. *Кузнецов А. А., Конопасов Н. Г.* Комплекс антенных устройств для регистрации вариаций напряженности электрического поля при работе установки метеотрон // Антенны. – 2010. – № 8. – С. 44 – 52.
5. *Конопасов Н. Г., Кузнецов А.А.* Установка генерации водно-капельных потоков // Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники. Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. – М.: Изд-во РАН, 2014. – С. 64 – 66.
6. *Райст П.* Аэрозоли. Введение в теорию: Пер. с англ. под ред. Б.Ф. Садовского. – М.: Мир, 1987. – 280 с.
7. *Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г., Конопасова З.Г.* Эксперименты по образованию облаков // Дисперсные системы. Материалы XXV научной конференции. – Украина, Одесса: ОНУ, 2012. – С. 149 – 150.
8. *Климин Н.Н.* Распределение зарядов капель, образующихся при распылении воды // Атмосферное электричество. Труды ГГО. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – Вып. 498. – С. 25 – 31.

**Кузнецов А.А., Конопасов Н.Г.**

## **Генерація носіїв електричного заряду малої рухливості**

### **АНОТАЦІЯ**

*Обговорюються результати натурних експериментів з метеотронним комплексом "Атмосфера". Для стимулювання розвитку хмар у вихідний потік вводиться до 100 кг/с водяного туману, що утворюється при розпилі води струменем турбореактивного двигуна. Проведений попередній аналіз результатів модельних дослідів по електризації водно-крапельного потоку.*

**Kuznetsov A.A., Konopasov N.G.**

## **Generation of an electric charge of particles with small mobility**

### **SUMMARY**

*Results of natural experiments with meteoron complex "Atmosphere" are discussed. For stimulation of clouds development in an ascending stream it is entered up to 100 kg/c the water fog formed water atomization charged particles by a turbo jet. The preliminary analysis of results of modeling experiences on електризаціїи water-drop stream is carried out.*