

УДК 614.841; 551.515

*Кустов М.В., канд. техн. наук, ст. преп., НУГЗУ,
Поспелов Б.Б., д-р техн. наук, вед. науч. сотр., НУГЗУ*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИСКУССТВЕННОЙ СТИМУЛЯЦИИ ОСАДКОВ ПРИ ЧАСТИЧНОЙ ИОНИЗАЦИИ АТМОСФЕРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

(представлено д-ром физ.-мат. наук Яковлевым С.В.)

Экспериментальным путём установлена возможность протекания процессов активного каплеобразования при частичной ионизации атмосферы в области воздействия электромагнитного излучения. Теоретически обоснован механизм каплеобразования в области с существенно меньшей, относительно расчётной, напряжённостью электромагнитного поля

Ключевые слова: процесс каплеобразования, искусственная ионизированная область, электромагнитное излучение, напряжённость электромагнитного поля

Постановка проблемы. Чрезвычайные ситуации (ЧС), возникающие по причине недостатка либо избытка осадков в регионе приводят к значительному ущербу не только в области сельского хозяйства, но и в общей системе жизнедеятельности человека. Для борьбы с ЧС такого характера необходимы технические средства искусственной интенсификации осадкообразования над прогнозируемой зоной осаднения. Искусственное влияние на атмосферные процессы характеризуется существенными энергозатратами. В этой связи, одной из проблем, подлежащих разрешению, является снижение энергозатрат при искусственной стимуляции осадков в атмосфере.

Анализ последних исследований и публикаций. По причине низкой энергозатратности и высокой эффективности среди механизмов воздействия на процессы осадкообразования наибольшее распространение получил механизм искусственного увеличения концентрации центров нуклеации и роста капель [1]. Наиболее активными центрами каплеобразования в атмосфере земли являются свободные ионы [2-4]. Обширный цикл экспериментальных и теоретических исследований по созданию искусственной ионизированной области (ИИО) в атмосфере с помощью импульсного СВЧ-излучения был выполнен в 80-е годы в СССР и

Кустов М.В., Поспелов Б.Б.

США [6-9]. Возможность искусственной интенсификации осадкообразования за счёт создания ИИО рассмотрена в работе [10]. Однако вопрос определения необходимой напряжённости электромагнитного поля для искусственной стимуляции осадков электромагнитным излучением остаётся нерешённым.

Постановка задачи и её решение. Целью работы является оценка величины напряжённости электромагнитного поля, необходимой для интенсивного каплеобразования в атмосфере над предполагаемой зоной осадков за счёт воздействия искусственного электромагнитного СВЧ излучения.

Результат современного теоретического расчёта критической напряжённости электромагнитного поля E_{cr} (кВ·см⁻¹), необходимой для создания ИИО, который хорошо согласуется с данными наблюдений и основан на кинетической теории поведения электронов в электромагнитных полях, имеет следующий вид [11]

$$E_{cr} = 28,2 \cdot C \left(\frac{\nu_c}{\omega} \right) \frac{N_m}{2,7 \cdot 10^{19}} \cdot \left(1 + \frac{\omega^2}{\nu_c^2} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где, $\nu_c = 1,7 N_m \cdot 10^{-7}$ – характерная частота соударений электронов с молекулами, с⁻¹; N_m – концентрация молекул воздуха, см⁻³; $C(\nu_c/\omega)$ – коэффициент порядка единицы; ω – круговая частота СВЧ-излучения.

Полагая, что концентрация молекул воздуха при давлении 760 мм. рт. ст. и температуре $T=300$ К для высоты $H=0$ км относительно уровня моря составляет $2,7 \cdot 10^{19}$ см⁻³ выражение (1) возможно представить в виде

$$E_{cr} \approx 10,44 \cdot (N_H^2 + (369 \cdot f)^2)^{0,5} \cdot 10^{-19}, \quad (2)$$

где, N_H – концентрация молекул воздуха на высоте H , см⁻³; f – линейная частота СВЧ-излучения, ГГц.

На рис. 1 приведены зависимости, полученные на основе соотношения (1) для высот H , равных 0 км и 10 км.

Из анализа приведенных данных следует, что с увеличением частоты СВЧ излучения до значений $f_{кр}$ необходимая величина напряжённости E_{cr} для полной ионизации изменяется незначительно. При прочих равных условиях с увеличением высоты вели-

чина E_{cr} знижується в відповідності со зниженням концентрації молекул. Для верхніх шарів тропосфери (10 км) потрібний рівень напруженності E_{cr} складає величину 890 кВ·м⁻¹.

Однако для процесу нуклеації водяного пару на іонах і наступуючого росту крапель необхідна суттєво менша концентрація активних центрів краплеутворення [3, 4]. Поєтому представляється цілесобразним дослідити процес іонізації в області докритических значеній напруженностей ($E \ll E_{cr}$).

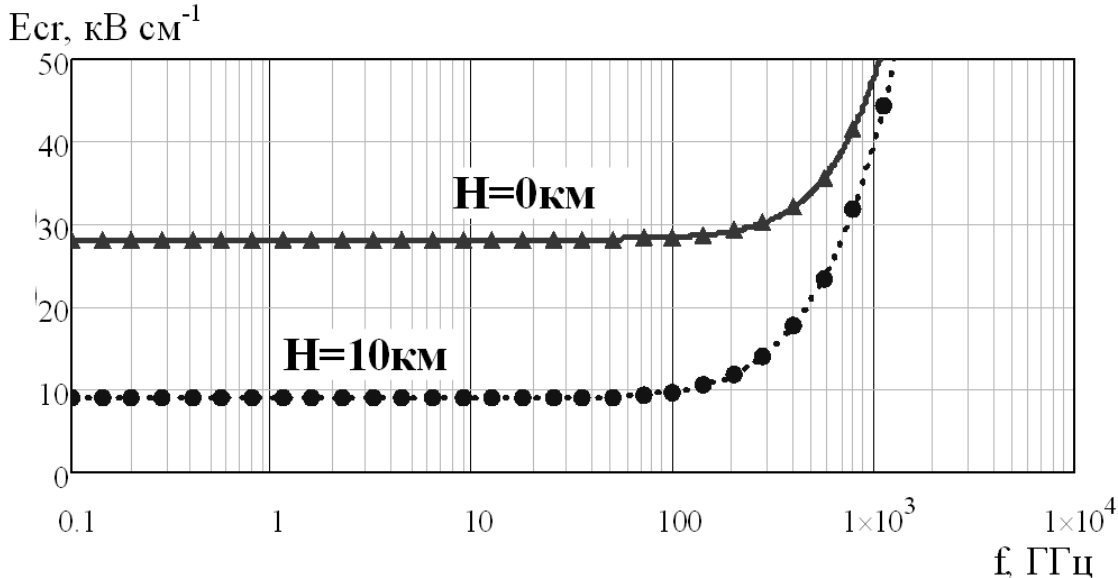


Рис. 1 – Зависимость напруженности E_{cr} от высоты зоны облучения H и частоты СВЧ излучения f

Рост концентрации электронов во времени характеризуется отношением частот ионизации ν_i и прилипания электронов к молекулам кислорода ν_{am} , где $\nu_{am} \approx 7,6 N_m \cdot 10^{-13} \text{ с}^{-1}$ – максимальная частота диссоциативного прилипания во время импульса. Приближённая аналитическая формула, определяющая концентрацию ионов в воздухе, согласно [11], имеет вид

$$\frac{\nu_i}{\nu_{am}} = F\left(\frac{E}{E_{cr}}\right) \cdot \left(\frac{E}{E_{cr}}\right)^2 \cdot C_1\left(\frac{\nu_c}{\omega}\right) \cdot \exp\left[-4,7\left(C_2\left(\frac{\nu_c}{\omega}\right)\frac{E_{cr}}{E} - 1\right)\right], \quad (3)$$

где, $F(x) = 0,7 \cdot [1 + 6,3 \exp(-2,6/x)]$, коэффициенты $C_1(\omega/\nu_c)$, $C_2(\omega/\nu_c)$ близки к единице и весьма слабо зависят от своих аргументов.

Для искусственного образования осадков в области тропосферы представляет интерес исследование характера изменения частоты ионизации воздуха в области докритических значений напряжённости СВЧ излучения.

С целью экспериментального исследования процесса искусственного каплеобразования под воздействием электромагнитного излучения в докритической области поставлен эксперимент на установке, детально описанной в [12]. Принцип её действия основан на регистрации роста капель воды на различных центрах каплеобразования. Контроль роста капель осуществляется путём регистрации уровня лазерного сигнала, прошедшего через исследуемый объем камеры (рис. 2). Частичная ионизация воздушной среды в камере осуществлялась за счёт СВЧ излучения формируемого магнетроном. Напряжённость электромагнитного поля регулировалась за счёт изменения затухания, вводимого в тракт излучателя.



Рис. 2 – Внешний вид лабораторной камеры

При проведении эксперимента передняя стенка камеры (рис. 2) закрывалась металлическим экраном. Таким образом, камера представляла собой объемный резонатор для электромагнитных волн СВЧ диапазона.

Структура результирующего поля в камере определялась структурой поля E волны для отрезка $L = 1$ м прямоугольном вол-

новода соответствующего сечения ($a = 0,8\text{м}$ х $b = 0,5\text{м}$), закороченного с обеих сторон проводящими поверхностями, с учетом излучателя в виде прямоугольной щели заданного размера. Если оси x , y , z совпадают с соответствующими сторонами камеры a , b и L , то для произвольной точки внутри камеры с координатами (x, y, z) структура поля без учета направленности излучателя будет определяться выражениями для напряженностей электрического и магнитного поля заданной частоты ω

$$\begin{aligned}\dot{E}_{mv}(x, y, z) &= \dot{E}_v^0(x, y) \exp(-i\beta z), \\ \dot{H}_{mv}(x, y, z) &= \dot{H}_v^0(x, y) \exp(-i\beta z),\end{aligned}\quad (4)$$

где

$$\begin{aligned}\dot{E}_x^0(x, y) &= -i(\beta / \gamma_{\perp}^2) E_{02} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cos \left(\frac{m\pi}{a} x \right) \sin \left(\frac{n\pi}{b} y \right); \\ \dot{E}_y^0(x, y) &= -i(\beta / \gamma_{\perp}^2) E_{02} \left(\frac{n\pi}{b} \right) \sin \left(\frac{m\pi}{a} x \right) \cos \left(\frac{n\pi}{b} y \right); \\ \dot{E}_z^0(x, y) &= E_{02} \sin \left(\frac{m\pi}{a} x \right) \sin \left(\frac{n\pi}{b} y \right); \\ \dot{H}_x^0(x, y) &= i(\omega \varepsilon / \gamma_{\perp}^2) E_{02} \left(\frac{n\pi}{b} \right) \sin \left(\frac{m\pi}{a} x \right) \cos \left(\frac{n\pi}{b} y \right); \\ \dot{H}_y^0(x, y) &= i(\omega \varepsilon / \gamma_{\perp}^2) E_{02} \left(\frac{m\pi}{a} \right) \cos \left(\frac{m\pi}{a} x \right) \sin \left(\frac{n\pi}{b} y \right); \\ \dot{H}_z^0(x, y) &= 0.\end{aligned}\quad (5)$$

В выражении (5) $\gamma_{\perp} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}$ и $\beta = \sqrt{\omega^2 \varepsilon \mu - \left(\frac{2\pi}{\lambda_{кр}}\right)^2}$

при условии, что $\lambda_{кр} = \frac{2\pi}{\gamma_{\perp}}$, а величины ε и μ определяют диэлектрическую и магнитную проницаемости среды, заполняющую камеру.

Структура поля в камере, согласно (5), имеет достаточно сложный решетчатый характер, определяемый базовой структурой поля волны E_{11} .

Зная структуру поля в камере, определялись необходимые координаты для размещения измерительного оборудования с целью обеспечения условия образования пучности на траектории лазерного луча фоторегистратора, для исследования процесса каплеобразования в камере.

В качестве излучателя в камере использовалась прямоугольная щель с размерами $a_n = 0,08\text{м}$ и $b_n = 0,045\text{м}$, возбуждаемая магнетроном на частоте $2,45\text{ ГГц}$. Коэффициент направленного действия излучателя определялся в соответствии с выражением

Максимальная напряжённость поля в камере, соответствующая пучностям, определена с учётом направленных свойств щели, определялась по формуле

$$КНД = 10,2 \frac{a_n b_n}{\lambda^2}, \quad (6)$$

где $\lambda = \frac{c}{f}$ – длина волны, м; c – скорость света, м/с; f – частота СВЧ излучения, Гц. Положение излучателя выбиралось исходя из обеспечения минимума возможной интерференции в области пространства камеры. С учетом направленности излучателя максимальная напряжённость поля в соответствующих точках камеры (5) рассчитывалась по формуле

$$E = \frac{\sqrt{30P_A G}}{r}, \quad (7)$$

где P_A – мощность магнетрона, Вт; $G = D\eta_A$ – коэффициент усиления излучателя; D – КНД излучателя; η_A – КПД излучателя; r – расстояние от излучателя до соответствующей точки максимума напряженности поля, определяемого (5), внутри камеры. Учитывая мощность излучателя $P_A = 1\text{кВт}$, $КНД = 2,47$, $КПД = 0,8$, максимальное значение напряженности поля в камере составляет $E \approx 1,96\text{ кВ}\cdot\text{м}^{-1}$.

При исследовании учитывалось, что в процессе коагуляции мелких капель и их роста количество капель уменьшается. Поэтому интенсивность рассеянного света максимальна после заполнения объема камеры мелкодиспергированной жидкостью (до включения СВЧ генератора) и снижается в процессе СВЧ излучения

Исследование процессов искусственной стимуляции осадков при частичной ионизации атмосферы электромагнитным излучением

(рис. 3). Дополнительно производился контроль концентрации аэроионов в газовой области. Однако в силу короткого времени жизни свободных аэроионов определенные их значения оказываются несколько ниже действительной концентрации.

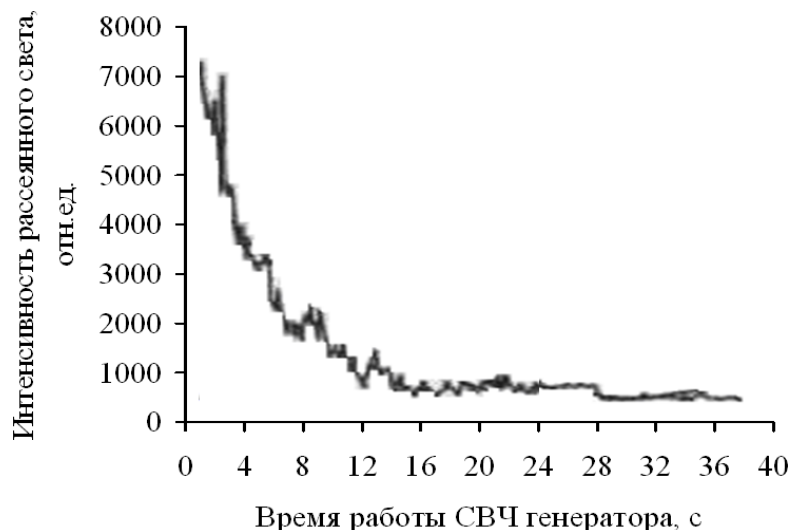


Рис. 3 – Кривая рассеяния светового излучения при $E \approx 0,5 \text{ кВ}\cdot\text{м}^{-1}$

Результаты исследований зависимости времени осаждения аэрозоля от напряжённости электромагнитного поля в зоне облучения представлены на рис. 4. Приведенные данные (кр. 1) получены на основе усреднения времени завершения резкого спада интенсивности по 4 измерениям для каждого значения E . Для сравнительного анализа на рис. 4 приведена теоретическая концентрация аэроионов (кр.2), которая определялась на основе выражения (3).

Из рис. 4 видно, что время осаждения аквааэрозоля зависит от концентрации аэроионов, как центров каплеобразования. Таким образом результаты теоретических и экспериментальных исследований показали возможность организации процессов осадкообразования при меньшей напряжённости поля, относительно расчётной (1), вплоть до значения $50 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}$ при концентрации ионов $8 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$. При меньшем значении напряжённости поля время осаждения аэрозоля под действием СВЧ излучения сопоставимо со временем свободного осаждения в объеме камеры. Регистрируемая частичная ионизация газа объясняется появлением в области газовой среды сильного переменного поля, что приводит к быстрому нагреванию первичных электронов, часть которых при-

обретає енергію, перевищуючу потенціал іонізації молекул [7].

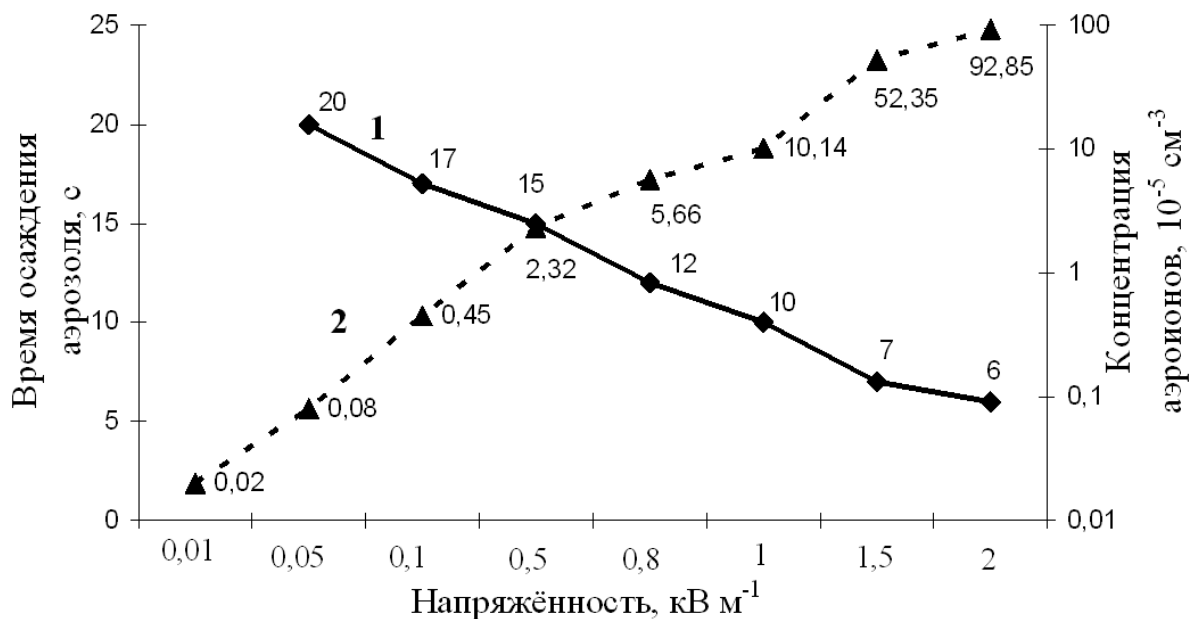


Рис. 4 – Залежність часу осадження аерозолю (кр. 1) та концентрації аеріонів (кр. 2) від напруженності поля в камері

При $E < 50 \text{ В}\cdot\text{м}^{-1}$ концентрація аеріонів (кр. 2 рис. 4) вище фоновій, однак недостатня для осадкоутворення. Критична концентрація аеріонів, при якій реєструється процес коагуляції крапель, за значеннями відповідає концентрації активних центрів крапельотворення в зоні розвитку хмарних систем в атмосфері при опадах [1, 3, 4]. Протікання процесів коагуляції крапель при частковій іонізації області осадкоутворення можна пояснити утворенням достатньої концентрації активних центрів крапельотворення (рис. 4), тоді як вираження (1) визначає критичну напруженність поля для повної іонізації газу в зоні облучення.

Висновки. В роботі вперше теоретично показано і експериментально підтверджено можливість інтенсифікації протікання процесів осадкоутворення при частковій іонізації атмосфери СВЧ випромінюванням. Визначено мінімальну напруженність електромагнітного поля, при якій спостерігаються процеси осадкоутворення, яка на два порядки менше розрахункової, необхідної для повної іонізації. Встановлено зв'язок інтенсивності коагуляції крапель в атмосферній аквааерозолі від кон-

центрации ионов, как активных центров каплеобразования. Полученные результаты позволяют делать прогноз о возможности интенсификации осадкообразования путём воздействия СВЧ излучения относительно низкой мощности с целью ликвидации угрозы возникновения или снижения последствий ЧС различного характера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивлев Л.С. Физика атмосферных аэрозольных систем / Л.С. Ивлев, Ю.А. Довгалюк. — СПб.: НИИХ СПбГУ, 1999. — 194с.
2. Гинзбург А.С. Влияние естественных и антропогенных аэрозолей на глобальный и региональный климат / А.С. Гинзбург, Д.П. Губанова, В.М. Минашкин // Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). — 2008. - т.ЛП, № 5 - С. 112-119.
3. Палей А.А. Исследование процессов конденсации паров на электрически заряженных аэрозольных частицах / А.А. Палей, В.Б. Лапшин, Н.В. Жохова, В.В. Москаленко // Электронный научный журнал «Исследовано в России» - <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/027.pdf>.
4. Крымский Г.Ф. Конденсации пара в присутствии ионизирующих воздействий / Г.Ф. Крымский, В.В. Колосов, И.С. Тырышкин // Оптика атмосферы и океана. - 2010.- № 9. — С. 826-829.
5. Кустов М.В. Влияние климатических факторов на процессы развития и прекращения крупных пожаров на открытой местности / М.В. Кустов, В.Д. Калугин, В.В. Коврегин // Проблемы пожарной безопасности. — Х.: НУГЗУ, 2011. — Вып. 29. — С. 127-135.
6. Борисов Н.Д. Искусственная ионизированная область в атмосфере / Н.Д. Борисов, А.В. Гуревич, Г.М. Милих. — М.: ИЗМИРАН, 1986. — 348 с.
7. Вихарев А.Л. Электродинамика неравновесного высокочастотного разряда в волновых полях / А.Л. Вихарев, В.Б. Гильденбург, А.В. Ким и др. // Высокочастотный разряд в волновых полях. — Горький: ИПФ АН СССР, 1988. — С. 41-136.
8. Гуревич А.В. Искусственная ионизированная область как источник озона в стратосфере / А.В. Гуревич, А.Г. Литвак и др. //

- Успехи физических наук, 2000. – Т. 170, № 11. – С. 1181 – 1202.
9. Armstrong W.T. et al., in Proc. 18th Intern. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. - Vol. 4 – Swansea, UK: Adam Hilger, 1987. – p. 850.
 10. Кустов М.В. Исследование механизма каплеобразования при тушении пожаров атмосферными осадками / М.В. Кустов // Проблемы пожарной безопасности. – Х.: НУГЗУ, 2011. – Вып. 30. – С. 139-146.
 11. Gurevich A.V. Physics of Microwave Discharges: Artificially Ionized Regions in the Atmosphere / A.V. Gurevich, N.D. Borisov, G.M. Milikh. – Amsterdam: Gordon and Breach, 1997.
 12. Кустов М.В. Установка для моделирования процессов конденсации в атмосферных аквааэрозолях / М.В. Кустов, В.Д. Калугин // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Х.: НУЦЗУ, 2012. – Вып. 16. – С. 54-58.
 13. Демьянчук Б.А. Принципы и применения микроволнового нагрева / Б.А. Демьянчук. – Одесса: «Черноморье», 2004. – 520 с.

Кустов М.В., Поспелов Б.Б.

Дослідження процесів штучної стимуляції опадів при частковій іонізації атмосфери електромагнітним випромінюванням

Експериментальним шляхом встановлена можливість протікання процесів активного каплеутворення при частковій іонізації області впливу електромагнітного випромінювання. Теоретично обґрунтований механізм каплеутворення в області з істотно меншою, щодо розрахункової, напруженістю електромагнітного поля.

Ключові слова: процес каплеутворення, штучна іонізована область, електромагнітне випромінювання, напруженість електромагнітного поля

Kustov M.V., Pospelov B.B.

The artificial stimulation processes of the precipitation at partial ionization of the atmosphere by electromagnetic radiation is research

Possibility of active drops formation processes course is experimentally established at partial ionization area of influence of electromagnetic radiation. The mechanism of drops formation in area with essentially smaller, concerning settlement, intensity of an electromagnetic field is theoretically proved.

Key words: process of drops formation, the artificial ionized area, electromagnetic radiation, intensity of an electromagnetic field