DOI: 10.65322/j.srd.05192026.66

УДК 628.511:504.3.054

ШАҲАР МУҲИТИДА АТМОСФЕРА ҲАВОСИНИ ТОЗАЛАШ УЧУН КЎП БОСҚИЧЛИ ФИЛЬТРЛАШГА АСОСЛАНГАН «ECO-TREE» ҚУРИЛМАСИНИ ИШЛАБ ЧИҚИШ ВА УНИНГ САМАРАДОРЛИГИНИ БАҲОЛАШ

Бутаев Т., *DSc, профессор,*
Абдувалиев Ж., *мустақил изланувчи,*
Қўқон давлат университети

Аннотация. *Мақолада шаҳар муҳитида атмосфера ҳавосини қаттиқ заррачалар (PM2.5, PM10) ва газсимон ифлослантирувчи моддалардан (NOx, VOC) тозалашга мўлжалланган «Eco-tree» қурилмасининг назарий асослари ишлаб чиқилган ва самарадорлиги тажрибада баҳоланган. Қурилма тўрт босқични кетма-кет бирлаштиради: механик олдиндан фильтрлаш, H13 синфли HEPA-фильтрлаш, кокос кўмири асосидаги адсорбция ва ионизация. Ҳар бир босқич толали фильтрлаш, Ленгмюр адсорбцияси ва Дойч–Андерсон тенгламалари асосида моделлаштирилди. Синовлар герметик камерада гравиметрик ва хроматографик усуллар билан ўтказилди. Тозалаш самарадорлиги PM2.5 бўйича 90–95%, PM10 бўйича 95–98%, NOx ва VOC бўйича 60–80% ни ташкил этди. Тозалангандан кейинги PM2.5 концентрацияси (7,5–15 мкг/м³) ЖССТнинг 2021 йилги 24 соатлик меъёридан (15 мкг/м³) ошмади. Энергия сарфи 250–400 Вт бўлиб, Smog Free Tower аналогидан 2,9–4,7 баробар кам.*

Аннотация. *В статье разработаны теоретические основы и экспериментально оценена эффективность устройства «Eco-tree» для очистки городского воздуха от твёрдых частиц (PM2.5, PM10) и газообразных загрязнителей (NOx, VOC). Устройство последовательно объединяет механическую предфильтрацию, HEPA-фильтрацию класса H13, адсорбцию на кокосовом активированном угле и ионизацию. Каждая ступень описана моделями волокнистой фильтрации, адсорбции Ленгмюра и уравнением Дойча–Андерсона. Испытания в герметичной камере гравиметрическим и хроматографическим методами показали эффективность 90–95% по PM2.5, 95–98% по PM10 и 60–80% по NOx и VOC. Остаточная концентрация PM2.5 (7,5–15 мкг/м³) не превышала суточного норматива ВОЗ 2021 г. (15 мкг/м³). Энергопотребление составляет 250–400 Вт, что в 2,9–4,7 раза ниже, чем у аналога Smog Free Tower.*

Abstract. *The article develops the theoretical basis and experimentally evaluates the «Eco-tree» device for removing particulate matter (PM2.5, PM10) and gaseous pollutants (NOx, VOC) from urban air. The device combines, in series, mechanical pre-filtration, H13-class HEPA filtration, adsorption on coconut-shell activated carbon and ionization. Each stage is described by fibrous filtration theory, the Langmuir adsorption model and the Deutsch–Anderson equation. Tests in a sealed chamber using gravimetric and chromatographic methods showed removal efficiencies of 90–95% for PM2.5, 95–98% for PM10 and 60–80% for NOx and VOC. Residual PM2.5 (7.5–15 μg/m³) did not exceed the 2021 WHO 24-hour guideline (15 μg/m³). Power consumption is 250–400 W, 2.9–4.7 times lower than that of the Smog Free Tower.*

Калит сўзлар: *атмосфера ифлосланиши, PM2.5, PM10, кўп босқичли фильтрлаш, HEPA-фильтр, фаоллаштирилган кўмир, адсорбция, ионизация, тозалаш самарадорлиги, шаҳар экологияси.*

Ключевые слова: *загрязнение атмосферы, PM2.5, PM10, многоступенчатая фильтрация, HEPA-фильтр, активированный уголь, адсорбция, ионизация, эффективность очистки, городская экология.*

Keywords: *air pollution, PM2.5, PM10, multi-stage filtration, HEPA filter, activated carbon, adsorption, ionization, removal efficiency, urban ecology.*

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.66

Кириш. Атмосфера ҳавосининг ифлосланиши бугунги кунда инсон саломатлигига таҳдид солувчи энг йирик экологик омиллардан биридир. Жаҳон соғлиқни сақлаш ташкилоти (ЖССТ) маълумотига кўра, дунё аҳолисининг қарийб 99% и белгиланган меъёрдан ортиқ ифлосланган ҳавода нафас олади, ташқи ҳаво ифлосланиши эса йилига тахминан 4,2 млн бевақт ўлим ҳолатига сабаб бўлади [1]. ЖССТнинг 2021 йилда қабул қилинган янги тавсияларида PM2.5 учун йиллик ўртача меъёр 5 мкг/м³ ва 24 соатлик меъёр 15 мкг/м³, PM10 учун еса мос равишда 15 ва 45 мкг/м³ этиб белгиланган [2].

Шаҳар ҳавосининг асосий ифлослантирувчилари – қаттиқ заррачалар (PM2.5, PM10), азот оксидлари (NOx), олтингугурт оксидлари (SOx) ва учувчан органик бирикмалар (VOC). Уларнинг асосий манбалари автотранспорт, саноат корхоналари, иссиқлик электр станциялари ва уй-рўзғор иситиш тизимларидир [3]. Марказий Осиё шаҳарларида бу омилларга қуруқ континентал иқлим, чанг-бўронлар ва қишки температура инверсиялари қўшилиб, заррачалар концентрациясининг вақти-вақти билан кескин ошишига олиб келади.

Ушбу муаммони ҳал этиш давлат сиёсати даражасида устувор вазифа этиб белгиланган. Хусусан, «Атмосфера ҳавосини муҳофаза қилиш тўғрисида»ги Қонун [4], Президентнинг 2019 йил 30 октябрдаги ПФ-5863-сон Фармони билан тасдиқланган 2030 йилгача атроф-муҳитни муҳофаза қилиш концепцияси [5] ва 2023 йил 11 сентябрдаги ПФ-158-сон Фармон билан тасдиқланган «Ўзбекистон – 2030» стратегияси [6] шаҳарларда ҳаво сифатини яхшилашни назарда тутади.

Шаҳар муҳити учун таклиф этилган хорижий ечимлар орасида Германияда ишлаб чиқилган мохли биофильтр CityTree ва Нидерландияда Д. Роосегаарде томонидан яратилган электростатик Smog Free Tower маълум [7, 8]. Бироқ биринчиси газсимон моддаларни чекланган даражада тозалайди ва мохни суғоришни талаб қилади, иккинчиси эса фақат заррачаларни тутади. Иссиқ ва чангли иқлимда уларнинг қўлланиши амалий жиҳатдан чекланган.

Шу нуқтаи назардан маҳаллий иқлим шароитига мослаштирилган, қаттиқ заррачалар ва газларни биргаликда тозалайдиган кўп босқичли «Eco-tree» қурилмасини ишлаб чиқиш ва унинг самарадорлигини назарий ҳамда тажрибада асослаш бўйича тадқиқотишлари олиб борилди.

Тадқиқот доирасида ҳаво тозалаш усуллари ва хорижий аналогларни таҳлил қилиш, кўп босқичли тизим самарадорлигининг математик моделини тузиш, қурилма конструкциясини ишлаб чиқиш ва лаборатория синовларини ўтказиш ҳамда натижаларни ЖССТ меъёрлари ва халқаро аналоглар билан қиёслаш масалалари кўриб чиқилди.

Мавзуга оид адабиётлар таҳлили. Майда заррачаларнинг соғлиққа таъсири кўп йиллик эпидемиологик тадқиқотларда исботланган. Д. Докери ва ҳамкорларининг «Олти шаҳар» тадқиқоти PM2.5 концентрацияси ва ўлим кўрсаткичи орасидаги боғлиқликни аниқлаган [9]. К. Поуп ва Д. Докери шарҳида бу боғлиқлик юрак-қон томир ва нафас йўллари касалликлари мисолида умумлаштирилган [10]. Ж. Лелиевельд ва ҳаммуаллифлар атмосфера ҳавоси ифлосланиши манбаларининг глобал ўлимга қўшган ҳиссасини баҳолаган [3].

Аэрозол заррачаларнинг толали муҳитда тутилиш назарияси Н.А. Фукс [11], У. Хайндс [12] ва Р. Браун [13] ишларида тизимлаштирилган. Уларда диффузия, илашиш ва инерцион урилиш механизмлари тавсифланган. Шунга кўра фильтр самарадорлиги заррача ўлчами тахминан 0,1–0,3 мкм бўлганда энг кичик қийматга эга (MPPS). HEPA ва ULPA фильтрлари айнан шу ўлчам бўйича EN 1822 ва ISO 29463 стандартларида синфларга ажратилади; H13 синфи учун MPPSдаги интеграл самарадорлик камида 99,95% [14, 15].

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.66

Газсимон моддаларни фаоллаштирилган кўмирда ютиш назарияси И. Ленгмюр ишидан [16] бошланиб, Р. Бансал ва М. Гоял монографиясида [17] амалий масалаларга татбиқ этилган. Электростатик чўктириш асослари Х. Уайт [18] ва К. Паркер [19] ишларида, саноат газларини чангдан тозалаш амалиёти В.Н. Ужов ва А.Ю. Вальдберг ишида [20] ёритилган.

Ҳаво тозалагичлар самарадорлигини таққослаш учун тоза ҳаво узатиш тезлиги (CADR) кўрсаткичи тавсия этилган. Р. Шонесси ва Р. Секстро бу кўрсаткич хона ҳажмига нисбатан баҳоланиши лозимлигини кўрсатган [21].

Адабиётлар таҳлили икки бўшлиқни кўрсатди. Биринчидан, мавжуд ишларда босқичлар алоҳида ўрганилган, уларнинг кетма-кет бирикиши ва очиқ ҳавода ишлаши етарли баҳоланмаган. Иккинчидан, Марказий Осиёнинг иссиқ, чангли иқлимига мослашган арзон шаҳар тозалагичлари бўйича тадқиқотлар деярли йўқ. Ушбу мақола айнан шу бўшлиқни тўлдиришга қаратилган.

Тадқиқот материаллари ва усуллари. Қурилманинг конструктив тузилиши. «Eco-tree» қурилмасида ҳаво оқими вентилятор ёрдамида тўрт босқичдан кетма-кет ўтади:

1. Механик фильтр. Полипропилен толали қатлам 10 мкм дан йирик заррачаларни (чанг, қум) 85–90% самарадорлик билан тутади ва кейинги босқичларнинг тез тўлишидан сақлайди.

2. HEPA-фильтр (H13). PM2.5 ва субмикрон заррачаларни диффузия, илашиш ва инерция механизмлари орқали ушлайди.

3. Фаоллаштирилган кўмир. Кокос пўстлоғидан тайёрланган қатлам NOx, SOx ва VOC молекулаларини физик адсорбция йўли билан ютади.

4. Ионизатор. Юқори кучланишли электродлар қолган субмикрон заррачаларни зарядлайди ва улар коллектор юзаларида чўкади.

Назарий модел. Кетма-кет уланган n босқичли тизимнинг умумий самарадорлиги ҳар бир босқичнинг ўтказиш коэффициентлари $P_i = 1 - E_i$ кўпайтмаси орқали аниқланади (1):

$$E_\Sigma = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - E_i) \qquad (1)$$

бу ерда E_i - i-босқичнинг мазкур модда бўйича самарадорлиги.

Толали фильтр (1- ва 2-босқич) самарадорлиги битта толанинг тутиш коэффициенти орқали ифодаланади [12, 13]:

$$E_f = 1 - \exp\left[-\frac{4\,\alpha\,\eta_\Sigma\,L}{\pi\,d_f\,(1-\alpha)}\right], \qquad \eta_\Sigma \approx \eta_D + \eta_R + \eta_I \qquad (2)$$

бу ерда α – фильтрнинг зичлик улуши; L – қатлам қалинлиги, м; d_f – тола диаметри, м; η_D, η_R, η_I – диффузия, илашиш ва инерцион урилиш бўйича битта тола самарадорлиги.

Фильтрнинг аэродинамик қаршилиги Дэвис ифодаси билан баҳоланади [13]; у вентилятор танлови ва энергия сарфини белгилайди:

$$\Delta p = \frac{64\,\mu\,U\,L\,\alpha^{3/2}\,(1 + 56\,\alpha^3)}{d_f^2} \qquad (3)$$

бу ерда μ – ҳавонинг динамик қовушқоқлиги, Па·с; U – фильтрлаш тезлиги, м/с.

Адсорбция босқичининг сиғими Ленгмюр изотермаси билан тавсифланади [16]:

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.66

$$q = \frac{q_m K C}{1 + K C} \quad (4)$$

бу ерда q – адсорбция қиймати, мг/г; q_m – моноқатлам сиғими, мг/г; K – Ленгмюр доимийси, м³/мг; C – газ концентрацияси, мг/м³.

Ионизация босқичи самарадорлиги Дойч–Андерсон тенгламаси билан аниқланади [18, 19]:

$$E_{ion} = 1 - \exp\left(-\frac{w A}{Q}\right) \quad (5)$$

бу ерда w – заррачанинг дрейф тезлиги, м/с; A – коллектор юзаси, м²; Q – ҳаво сарфи, м³/с.

Тажриба усуллари. Синовлар ҳажми V = 30 м³ бўлган герметик камерада, ҳаво сарфи Q = 300 м³/соат, температура 25 ± 2 °C ва нисбий намлик 50 ± 10 % да ўтказилди. Камерага ифлослантирувчилар белгиланган дастлабки концентрацияда киритилди, ҳар бир синов 3 марта такрорланди.

• Гравиметрик усул – PM2.5 ва PM10 масса концентрациясини ўлчаш учун.

• Хроматографик усул – NOx ва VOC концентрациясини аниқлаш учун.

• Қиёсий таҳлил – натижаларни ЖССТ меъёрлари ва халқаро аналоглар билан солиштириш учун.

Тозалаш самарадорлиги (6) ифода билан, тоза ҳаво узатиш тезлиги эса концентрациянинг камайиш тезлигидан (7) ифода билан ҳисобланди [21]:

$$\eta = \frac{C_0 - C_k}{C_0} \cdot 100\% \quad (6)$$

$$CADR = V\,(k_e - k_n), \qquad k = \frac{1}{t} \ln \frac{C_0}{C_k} \quad (7)$$

бу ерда C_0, C_k – дастлабки ва якуний концентрация, мкг/м³; V-камера хажми, м³; t- синов давомийлиги, соат; k_e – қурилма ишлагандаги, k_n – табиий камайиш доимийси, 1/соат; $CADR$- м³/соат.

Натижалар ва муҳокама. Ифлослантирувчиларни тозалаш самарадорлиги. Қурилма қаттиқ заррачаларни 90–98%, газсимон моддаларни 60–80% самарадорлик билан тозалади (1-жадвал).

1-жадвал

«Eco-tree» қурилмасининг тозалаш самарадорлиги ва ЖССТ меъёрлари билан қиёси

Ифлослантирувчи	C_0, мкг/м³	C_k, мкг/м³	η, %	ЖССТ 24 соатлик меъёри (2021), мкг/м³
PM2.5	150	7,5–15	90–95	15
PM10	200	4–10	95–98	45
NOx (NO_2 сифатида)	80	16–32	60–80	25 (NO_2)
VOC	500	100–200	60–80	–

Тозалангандан кейин PM2.5 ва PM10 концентрацияси ЖССТ меъёридан ошмади. NOx бўйича еса якуний қийматнинг юқори чегараси (32 мкг/м³) NO_2 учун белгиланган 25 мкг/м³ меъёрдан юқори. Бу адсорбция босқичини кучайтириш зарурлигини кўрсатади.

Газсимон моддалар самарадорлигининг пастроқлиги икки омил билан изоҳланади. Биринчидан, адсорбция диффузия билан чекланган жараён бўлиб, кўмир қатламида ҳавонинг тўхташ вақти етарли бўлишини талаб қилади. Иккинчидан, NO нинг

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.66

фаоллаштирилган кўмирда физик адсорбцияси суст; уни ана шимдирилган (масалан, $KMnO_4$ ёки ишқор билан) сорбентлар орқали ошириш мумкин [17].

Назарий ва тажриба натижаларининг қиёси. (1) ифодага кўра, фақат H13 босқичининг ўзи PM2.5 бўйича бир ўтишда камида 99,95% самарадорлик бериши лозим. Тажрибада олинган 90–95% бундан паст. Фарқ икки омил билан изоҳланади: фильтр атрофидан ҳаво сизиши (bypass) ва камера усулида натижа синов давомийлигига боғлиқлиги (7). Шунинг учун қурилма корпусининг зичлигини ошириш ва натижаларни CADR кўринишида ҳам бериш мақсадга мувофиқ.

Энергия сарфи. Қурилманинг қуввати вентилятор иш режимига (паст, ўрта, юқори тезлик) қараб 250–400 Вт ни ташкил этади. Суткалик узлуксиз ишлашда бу 6–9,6 кВт·соат га тенг. Энергия самарадорлигини баҳолаш учун CADR/P (1 Вт га м³/соат) кўрсаткичини аниқлаш тавсия этилади.

Халқаро аналоглар билан қиёсий таҳлил. «Eco-tree» PM2.5 самарадорлиги ва газларни тозалаш бўйича иккала аналогдан устун (2-жадвал).

2-жадвал

«Eco-tree» қурилмасининг халқаро аналоглар билан қиёси

Кўрсаткич	Eco-tree	CityTree [7]	Smog Free Tower [8]
Тозалаш принципи	4 босқич: механик + HEPA + кўмир + ионизация	Биологик (мох қатлами)	Электростатик чўктириш
PM2.5 самарадорлиги, %	90–95	50–65*	70–80*
Газларни тозалаш	60–80%	Чекланган	Йўқ
Энергия сарфи, Вт	250–400	Кам (асосан суғориш ва вентилятор)	≈ 1170
Дастлабки харажат	Ўрта	Юқори	Юқори
Хизмат кўрсатиш	Фильтр ва кўмирни даврий алмаштириш	Мохни парвариш	Электродларни тозалаш, юқори кучланиш

* Адабиёт ва ишлаб чиқарувчи маълумотлари асосидаги баҳо; синов шароитлари фарқ қилади.

Энергия сарфи бўйича «Eco-tree» Smog Free Towerдан 2,9–4,7 баробар тежамли. Аммо Smog Free Tower соатига тахминан 30 000 м³ ҳавони қайта ишлайди [8], шунинг учун адолатли қиёс учун «Eco-tree» ҳаво сарфи ва CADR/P кўрсаткичи ҳам келтирилиши лозим.

Тадқиқот чекловлари. Синовлар лаборатория камерасида ўтказилди; очиқ ҳавода шамол, намлик ва фильтрнинг чанг билан тўлиши самарадорликни пасайтириши мумкин. Ионизатор озон (O_3) ҳосил қилиши мумкин, шунинг учун кейинги синовларда чиқишдаги O_3 концентрацияси ҳам ўлчаниши керак.

Хулоса Тадқиқот натижасида «Eco-tree» қурилмасининг назарий модели ишлаб чиқилди ва самарадорлиги тажрибада тасдиқланди. Қуйидаги хулосаларга келинди:

1. Кўп босқичли тизим умумий самарадорлигини босқичлар бўйича баҳолаш модели (1)–(5) таклиф этилди. У толали фильтрлаш, Ленгмюр адсорбцияси ва Дойч–Андерсон тенгламаларини бирлаштиради.

2. Қурилма PM2.5 ни 90–95%, PM10 ни 95–98% самарадорлик билан тозалади; тозаланган ҳаво ЖССТнинг 24 соатлик меъёрларига жавоб беради.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.66

3. NOx ва VOC бўйича самарадорлик 60–80% ни ташкил этди; NO_2 меъёрига тўлиқ жавоб бериш учун адсорбция босқичини такомиллаштириш зарур.

4. Энергия сарфи 250–400 Вт бўлиб, Smog Free Tower аналогидан 2,9–4,7 баробар кам.

5. Қиёсий таҳлил қурилманинг қаттиқ заррачалар ва газларни биргаликда тозалаш бўйича рақобатбардошлигини кўрсатди.

Таклифлар. Кейинги босқичда қурилмани автомагистраллар ва саноат зоналари яқинида дала шароитида синаш тавсия этилади. Шунингдек, кўмир қатламининг хизмат муддатини узайтириш, ионизатордан чиқадиган озонни назорат қилиш ва қурилмани қуёш энергиясида ишлайдиган автоном тизимга айлантириш бўйича тадқиқотлар давом эттирилади.

Фойдаланилган адабиётлар

1. World Health Organization. Ambient (outdoor) air pollution: fact sheet. – Geneva: WHO, 2022.

2. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. – Geneva: World Health Organization, 2021.

3. Lelieveld J., Evans J.S., Fnais M., Giannadaki D., Pozzer A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale // Nature. – 2015. – Vol. 525. – P. 367–371.

4. Ўзбекистон Республикасининг «Атмосфера ҳавосини муҳофаза қилиш тўғрисида»ги Қонуни. 1996 йил 27 декабрь, № 353-I.

5. Ўзбекистон Республикаси Президентининг «2030 йилгача бўлган даврда Ўзбекистон Республикасининг атроф-муҳитни муҳофаза қилиш концепциясини тасдиқлаш тўғрисида»ги Фармони. 2019 йил 30 октябрь, ПФ-5863.

6. Ўзбекистон Республикаси Президентининг ««Ўзбекистон – 2030» стратегияси тўғрисида»ги Фармони. 2023 йил 11 сентябрь, ПФ-158.

7. Green City Solutions GmbH. CityTree. - URL: https://greencitysolutions.de.

8. Studio Roosegaarde. Smog Free Tower. URL: https://www.studioroosegaarde.net/project/smog-free-tower.

9. Dockery D.W., Pope C.A., Xu X. et al. An association between air pollution and mortality in six U.S. cities // New England Journal of Medicine. – 1993. – Vol. 329, No. 24. – P. 1753–1759.

10. Pope C.A., Dockery D.W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect // Journal of the Air & Waste Management Association. – 2006. – Vol. 56, No. 6. – P. 709–742.

11. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1955.

12. Hinds W.C. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. 2nd ed. – New York: Wiley, 1999.

13. Brown R.C. Air Filtration: An Integrated Approach to the Theory and Applications of Fibrous Filters. – Oxford: Pergamon Press, 1993.

14. EN 1822-1:2019. High efficiency air filters (EPA, HEPA and ULPA) – Part 1: Classification, performance testing, marking.

15. ISO 29463-1:2017. High efficiency filters and filter media for removing particles in air – Part 1.

16. Langmuir I. The adsorption of gases on plane surfaces of glass, mica and platinum // Journal of the American Chemical Society. – 1918. – Vol. 40, No. 9. – P. 1361–1403.

17. Bansal R.C., Goyal M. Activated Carbon Adsorption. – Boca Raton: CRC Press, 2005.

DOI: 10.65322/j.srd.05192026.66

18. White H.J. Industrial Electrostatic Precipitation. – Reading (MA): Addison-Wesley, 1963.

19. Parker K.R. (ed.). Applied Electrostatic Precipitation. – London: Blackie Academic & Professional, 1997.

20. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И.К. Очистка промышленных газов от пыли. – М.: Химия, 1981.

21. Shaughnessy R.J., Sextro R.G. What is an effective portable air cleaning device? A review // Journal of Occupational and Environmental Hygiene. – 2006. – Vol. 3, No. 4. – P. 169–181.