

<https://doi.org/10.3176/phys.math.1974.3.12>

УДК 533.6.07:551.511

А. ЭПШТЕЙН

## О МОДЕЛИРОВАНИИ РАССЕЯНИЯ В АТМОСФЕРЕ ВЫБРОСОВ ИЗ ДЫМОВЫХ ТРУБ ПРОМЫШЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Существующие методы расчета рассеяния вредных примесей от различных промышленных источников имеют пока еще относительно ограниченную область применения, в частности, используются при наличии одиночных объектов над ровной поверхностью [1]. В условиях же сложного рельефа окружающей местности, наличия близкорасположенных построек, возмущающих воздушные потоки, и т. д. расчетные методы становятся непригодными. В таком случае на помощь могут придти методы экспериментальные.

Очевидна, однако, сложность постановки эксперимента в условиях природы, которая заключается, помимо всего прочего, в невозможности управления атмосферными процессами. Кроме того, возможность такого эксперимента исключается для вновь проектируемых объектов.

Поэтому внимание ряда исследователей в настоящее время направлено на изучение распространения вредных примесей от различных объектов в лабораторных условиях — на уменьшенных моделях с учетом законов теории подобия [2]. В литературе описаны более или менее удачные исследования такого рода [3–10].

В настоящей статье рассматриваются теоретические основы и возможности практического осуществления моделирования рассеяния вредных примесей в атмосфере.

Полное подобие двух течений включает в себя геометрическое, кинематическое, динамическое, тепловое подобие и подобие граничных условий. Условия геометрического подобия особых пояснений не требуют. Остальные же условия подобия можно выявить, если основные уравнения, описывающие данный процесс (1)–(5), и соответствующие граничные условия (6)–(9) привести к безразмерному виду путем отнесения входящих в их число переменных к некоторым характерным параметрам, выбранным в качестве масштабных величин (таблица). Поскольку суммарное течение образуют два составляющих потока — основной воздушный поток в атмосфере (ветер) и дымовая струя, то и масштабные величины должны быть выбраны отдельно для обоих течений. В результате приведения уравнений (2)–(4) к безразмерному виду получим ряд комплексов, составленных из масштабных величин и внутренних параметров системы. Кроме того, дополнительно появляются безразмерные симплексы, представляющие собой отношения соответствующих однородных величин и внутренних параметров системы. Все эти безразмерные комплексы и симплексы, рассматриваемые как критерии подобия процесса, приведены в таблице. Как легко убедиться,

их число  $r$  в соответствии с важнейшей в анализе размерностей  $\pi$ -теоремой [2] равняется  $n - i$ , где  $n$  — общее число характерных параметров системы и  $i$  — число независимых размерностей. В данном случае  $n = 20$ ,  $i = 3$ , следовательно,  $r = 17$ . Следует отметить, что приведенный выше перечень критериев подобия, вообще говоря, не является исчерпывающим, так как система уравнений (1) — (5) не замкнута. Конкретный вид дополнительных критериев подобия, учитывающих турбулентные характеристики течения, зависит от принятия тех или иных способов замыкания данной системы уравнений. Вопрос об этих критериях подобия будет рассмотрен ниже. Кроме того, уравнения (2) и (3) записаны без учета диссипации энергии, которая проявляется лишь при близких к звуковым скоростях течения, т. е. при условиях, которые практически не встречаются. Наконец, предполагается отсутствие радиационного переноса тепла и отсутствие содержания водяных паров и частиц твердой примеси. В противном случае потребовался бы дополнительный анализ.

Условием полного подобия явлений служит, помимо геометрического подобия, равенство в натуре и на модели численных значений критериев подобия и одинаковость безразмерных распределений основных параметров на границах рассматриваемой области.

Оценим практические возможности выполнения указанных выше условий подобия при моделировании рассеяния в атмосфере вредных примесей от промышленных источников. Понятно, что соблюдение геометрического подобия, в которое входит и отношение  $\delta_0/D_0$ , не вызывает принципиальных трудностей. С другой стороны, очевидно также, что выполнение всех многочисленных условий подобия в полном объеме не представляется возможным. Однако далеко не все эти условия одинаково важны.

Прежде всего, как показали экспериментальные исследования [11–13], характер распределения основных параметров по выходному сечению источника не влияет заметным образом на развитие струи в поперечном потоке, которое определяется в первую очередь средними по сечению значениями этих параметров. Таким образом, если в качестве масштабов выбрать эти средние значения, то требование одинаковости безразмерных граничных условий по  $\bar{v}$ ,  $q_v$ ,  $T_v$  и  $\chi_v$  отпадает.

Если в качестве рабочей среды используется воздух или другие газы, то распределения плотности и температуры в натуре и на модели однозначно связаны друг с другом уравнением газового состояния (5). Если же рабочей средой в моделирующей установке служит вода или другая жидкость, то плотность практически не зависит от температуры. Однако от последней не будет зависеть здесь и поле скорости течения, а следовательно, и распределение концентрации примеси, определение которой — основная цель при моделировании. Поэтому в любом случае требование одинаковости отношения  $T_{w0}/T_{w0^*}$  и распределений  $T_w$  на границах моделируемой области можно считать излишним.

Одновременное выполнение одинаковости отношений  $q_{v0}/q_{v0^*}$  и  $T_{w0}/T_{w0^*}$  требуется лишь тогда, когда при использовании в качестве рабочей среды воздуха и других газов моделируется истечение примеси, заметно отличающейся по своему составу от воздуха. При этом, согласно уравнению газового состояния (5), отношение  $T_{v0}/T_{v0^*}$  либо  $q_{v0}/q_{v0^*}$  в качестве критерия подобия может быть заменено отношением  $m_v/m_{v0}$ . В значительном большинстве представляющих практический интерес случаев дымовые газы бывают настолько разбавлены воздухом, что практически  $m_v \approx m_{v0}$ . В результате отпадает необходимость выдерживать одинаковыми одновременно отношения  $q_{v0}/q_{v0^*}$  и  $T_{v0}/T_{v0^*}$ , а

<p><b>Основные уравнения:</b></p>	<p><b>Граничные условия:</b></p>	<p><b>Критерии подобия:</b></p>
<p>неразрывности</p>	<p>основной поток перед объектом</p>	$Re_w = \frac{w_0 \delta_0}{\nu_w}, \quad Re_v = \frac{v_0 D_0}{\nu_v};$
<p>движения</p>	$\begin{cases} \vec{w} = \vec{w}(0, x_2, x_3) \\ Q_w = Q_w(0, x_2, x_3) \\ T_w = T_w(0, x_2, x_3) \end{cases},$ <p>у земной поверхности</p>	$Ri_w = \frac{g \delta_0 \Delta Q_{w0}}{w_0^2 Q_{w0}}, \quad Ri_v = \frac{g D_0 \Delta Q_{v0}}{v_0^2 Q_{v0}};$
<p>переноса тепла</p>	$\begin{cases} w = 0 \\ Q_{w*} = Q_{w*}(x_1, x_2) \\ T_{w*} = T_{w*}(x_1, x_2) \end{cases},$ <p>в свободном потоке (вне пограничного слоя)</p>	$Ro_w = \frac{w_0}{\delta_0 \omega_0}, \quad Ro_v = \frac{v_0}{D_0 \omega_0};$
<p>переноса пассивной примеси</p>	$\begin{cases} \vec{w} = \vec{w}_0, \quad Q_w = Q_w, \quad T_w = T_w, \\ \text{дымовой факел в выходном сечении трубы} \\ \vec{v} = \vec{v}(R), \quad Q_v = Q_v(R) \\ T_v = T_v(R), \quad \chi_v = \chi_v(R) \end{cases}.$	$Pr_w = \frac{\nu_w}{a_w}, \quad Pr_v = \frac{\nu_v}{a_v};$
<p>газового состояния</p>	<p><b>Характерные параметры (масштабы):</b></p> <p>для основного потока</p> <p><math>\delta_0, w_0, Q_{w0}, Q_{w0*}, (\Delta Q_{w0}), T_w, T_{w0*}, \Delta p_0;</math></p> <p>для дымового факела</p> <p><math>D_0, v_0, Q_{v0}, (\Delta Q_{v0}), T_{v0}, \chi_{v0};</math></p> <p>внутренние параметры системы:</p> <p><math>\nu_w, \nu_v, a_w, a_v, k_w, k_v, g, w_0.</math></p>	$Sc_w = \frac{\nu_w}{k_w}, \quad Sc_v = \frac{\nu_v}{k_v};$
		$Eu_w = \frac{\Delta p_0}{Q_{w0} w_0^2};$ $\frac{v_0}{w_0}, \frac{Q_{v0}}{Q_{w0}}, \frac{T_{v0}}{T_{w0}}, \frac{Q_{w0}}{Q_{w0*}}, \frac{T_{w0}}{T_{w0*}}, \frac{\delta_0}{D_0}.$
		<p><b>Безразмерные граничные условия:</b></p>
		$\vec{w} \rightarrow \left(0, \frac{x_2}{\delta_0}, \frac{x_3}{\delta_0}\right), \quad \frac{Q_w}{Q_{w0}} \left(0, \frac{x_2}{\delta_0}, \frac{x_3}{\delta_0}\right),$ $\frac{T_w}{T_{w0}} \left(0, \frac{x_2}{\delta_0}, \frac{x_3}{\delta_0}\right), \quad \frac{Q_{w*}}{Q_{w0}} \left(\frac{x_1}{\delta_0}, \frac{x_2}{\delta_0}\right),$
		$\frac{T_{w*}}{T_{w0}} \left(\frac{x_1}{\delta_0}, \frac{x_2}{\delta_0}\right);$
		$\vec{v} \rightarrow \left(\frac{R}{D_0}, \frac{Q_v}{Q_{v0}} \left(\frac{R}{D_0}\right), \frac{T_v}{T_{v0}} \left(\frac{R}{D_0}\right), \frac{\chi_v}{\chi_{v0}} \left(\frac{R}{D_0}\right)\right);$

разность плотностей можно моделировать как за счет изменения температуры рабочей среды (только на воздушных моделях), так и за счет использования для моделирования дымового факела газов или жидкостей, имеющих плотность, отличную от плотности окружающей среды. С технической точки зрения выдержать на модели подобие по критериям  $q_{v0}/q_{w0}$  или  $T_{v0}/T_{w0}$ , а также  $v_0/\omega_0$  не представляет труда.

В лабораторных условиях обеспечить подобие по числам  $Ro_v$  и  $Ro_w$  практически невозможно, так как это потребовало бы наличия вращающихся установок. Поэтому при моделировании влияние кориолисовых сил на рассматриваемый процесс не учитывается. Несложные ориентировочные оценки показывают, что это допустимо при размерах моделируемого объекта порядка  $10^2$ — $10^3$  м. Таким образом, автомодельность по числу  $Ro_v$  обеспечивается всегда, а автомодельность течения по числу  $Ro_w$  возможна, строго говоря, лишь в приземном слое атмосферы. При моделировании же диффузии в планетарном пограничном слое, высота которого составляет обычно несколько сотен метров, следует считаться с отклонением от строгого подобия поля течения. Невозможно выдержать при этом и подобия по числу  $Eu_w$ , однако при размерах моделируемого объекта до  $10^4$  м его влияние ничтожно, так как на таких расстояниях обычно малы перепады давления  $\Delta p_0$ .

Числа  $Ri_v$  и  $Ri_w$  учитывают соответственно стратификацию окружающей среды и начальную плавучесть дымового факела. При безразличной стратификации  $Ri_w = 0$ , то есть в этом случае данный критерий подобия отпадает, что существенно облегчает моделирование. Для дымового факела  $Ri_v = 0$  в случае истечения дымовых газов, имеющих плотность, близкую к плотности окружающей среды, или при небольших размерах поперечника трубы и высоких скоростях истечения. В большинстве же представляющих практический интерес случаев число  $Ri_v$  имеет достаточно большие значения и определяет в первую очередь характер развития дымового факела на стадии его подъема. Поскольку входящие в числа  $Ri_w$  и  $Ri_v$  отношения  $\Delta q_{w0}/q_{w0}$  и  $\Delta q_{v0}/q_{v0}$  получаются одинаковыми при соблюдении одинаковости отношений  $q_{w0}/q_{w0^*}$  и  $q_{v0}/q_{v0^*}$ , то очевидна необходимость низких скоростей течения на модели. При обычно используемых масштабах модели  $1/100$ — $1/1000$  скорости течения должны уменьшаться в  $10$ — $30$  раз, т. е. достигать величины порядка  $10^{-1}$ — $10^{-2}$  м/сек. Наоборот, выполнение подобия по числам  $Re_w$  и  $Re_v$  потребовало бы увеличения скоростей течения в  $100$ — $1000$  раз, т. е. до около- или сверхзвуковых значений, когда в значительной мере сказываются неучтенные в приведенном выше анализе эффекты сжимаемости. Выход из положения здесь — хорошо известная автомодельность по числам  $Re$  в значительных пределах его изменения, когда влияние сил молекулярной вязкости пренебрежимо мало по сравнению с эффектами турбулентного переноса импульса. Если число  $Re_w$  на модели по своему порядку не ниже  $10^5$ , автомодельность по этому критерию можно считать обеспеченной. Если исследуется течение и рассеяние примесей за обтекаемыми препятствиями неплавной конфигурации, то масштаб турбулентности в следе за препятствием определяется его линейным размером  $L_n$ , при этом турбулентность в зоне этого следа значительно выше, чем в невозмущенном потоке. При моделировании обтекания такого препятствия необходимо, чтобы значение соответствующего числа  $Re_L = \frac{\omega_i L_n}{\nu_w} < Re_w$  ( $\omega_i$  характерная скорость набегающего на препятствие потока) не было ниже некоторого критического значения, при котором автомодельность режима нарушается. Отметим,

что число  $Re_L$  не является самостоятельным критерием подобия, так как отношение  $L_n/\delta_0$  входит в условия геометрического подобия, а  $\omega_i/\omega_0$  — в подобие граничных условий. Однако в ряде конкретных случаев местному числу  $Re_L$  следует отдать предпочтение перед  $Re_w$  в качестве основного критерия подобия. Что касается числа  $Re_v$ , то многочисленные экспериментальные исследования струи в поперечном потоке не обнаружили какого-либо заметного влияния этого комплекса. Это объясняется, помимо прочего, и тем, что турбулентность такой струи определяется в большей мере условиями ее взаимодействия с основным потоком, характеризуемым отношениями  $v_0/\omega_0$  и  $Q_{v0}/Q_{w0}$ , нежели условиями истечения. При  $Re_v$  порядка  $10^3$ , то есть при значениях, близких к критическому значению для течений в трубах, влияние  $Re_v$  проявлялось лишь в очень незначительном увеличении длины начального участка струи [13].

Наконец, турбулентный характер течения дымовой струи на модели обеспечивает автомодельность происходящих процессов и по числам  $Pr_w, Pr_v, Sc_w, Sc_v$  в той же мере, что и по  $Re_w$  и  $Re_v$ . Если в качестве рабочей среды при моделировании используется воздух, то равенство этих критериев подобия гарантируется при любом режиме течения.

Обеспечение одинаковости безразмерных распределений основных параметров на границах вызывает определенные технические трудности, но в большинстве случаев они вполне преодолимы.

Резюмируя вышесказанное в целом, можно сформулировать следующие необходимые условия подобия при приближенном моделировании рассеяния вредных примесей от промышленных источников (без учета условий подобия по турбулентности):  $\delta_0/D_0 = idem$  (вместе с остальными условиями геометрического подобия);  $Ri_w = idem, Ri_v = idem, Re_w > Re_{wh}$ ,

$$\begin{aligned} v_0/\omega_0 = idem, \quad Q_{v0}/Q_{w0} = idem, \quad Q_{w0}/Q_{w0^*} = idem, \\ w/\omega_0(0, x_2/\delta_0, x_3/\delta_0) = idem, \quad Q_w/Q_{w0}(0, x_2/\delta_0, x_3/\delta_0) = idem, \\ Q_{w^*}/Q_{w0}(x_1/\delta_0, x_2/\delta_0) = idem. \end{aligned}$$

Если моделируется обтекание крупных препятствий, то число  $Re_w$  заменяется  $Re_L$ . В частных случаях моделирования некоторые из перечисленных выше условий подобия отпадают, например, по  $Ri_w, Q_{w0}/Q_{w0^*}, Q_w/Q_{w0}, Q_{w^*}/Q_{w0}$  — при безразличной стратификации окружающей среды, по  $Ri_v$  — для неплавучих дымовых факелов. Иногда допустимо ослабление требований строгого подобия и по другим характеристикам.

Наибольшую сложность представляет вопрос о подобии течений по турбулентным характеристикам. Этой вполне самостоятельной проблеме посвящен ряд работ [14–18], авторы которых приходят к довольно различным, подчас даже противоречивым выводам. Остановимся на этом вопросе лишь в общих чертах, отсылая читателя за подробностями к указанным источникам.

По мнению авторов работы [14], основными критериями подобия по турбулентным характеристикам служат

$$Ka_w = \frac{E_0}{\omega_0^2} \quad \text{и} \quad N = \frac{\varepsilon_0 \delta_0}{E_0 \omega_0}.$$

В качестве критериев подобия предлагались также [15–17]

$$Re_{wt} = \frac{\omega_0 \delta_0}{\nu_{wt}}, \quad S = \frac{(dw/dx_3) \delta_0}{\omega_0}, \quad T = \frac{\varepsilon_0 \delta_0}{\omega_0^3}.$$

Легко видеть, однако, что  $T = Ka_w N$ , т. е. числа  $N$  и  $T$  взаимозаменяемы. Число  $S$ , как показано в [14], соответствует требованию выпол-

нения подобия по  $Ka_w$  и одинаковости безразмерных профилей  $\omega_0$  в натуре и на модели, выраженных в логарифмической форме. Наконец, и число  $Re_{wt}$  можно при определенном допущении относительно  $v_{wt}$  представить в виде комбинации чисел  $Ka_w$  и  $N$  и принять за основу при анализе подобия по турбулентности, имея в виду, что распределение шероховатостей на земной поверхности входит в условия геометрического подобия.

Если получение необходимого значения числа  $Ka_w$  на моделирующей установке связано лишь с трудностями технического характера, то в отношении  $N$  эти трудности носят более принципиальный характер, так как достигаемая на моделирующей установке величина  $\epsilon_0$  сама зависит от числа  $Ka_w$  [16]. Все же возможность моделирования по турбулентным характеристикам течения, хотя бы и приближенного, признается в настоящее время большинством исследователей, хотя практически она осуществляется пока только для условий безразличной стратификации окружающей среды.

Как уже упоминалось выше, в качестве рабочей среды при моделировании могут служить воздух (и другие газы) и вода (и другие жидкости).

Моделирование в воздушной среде является наиболее естественным и широко распространенным. Здесь накоплен немалый опыт, в частности, относительно подобия по турбулентным характеристикам течения. Сравнительно просто на специализированных для такого рода исследований аэродинамических трубах достигается необходимый профиль скорости перед моделью. Его можно получить как естественным способом — позволив пограничному слою постепенно нарастать до необходимой толщины, так и искусственным путем — с помощью набора соответствующих решеток и перегородок. Аналогичным образом можно достичь необходимого распределения температуры, а следовательно, и плотности потока перед моделью: т. е. либо путем подогрева или охлаждения стенок аэродинамической трубы, либо с помощью решеток с вмонтированными в них нагревательными элементами. Следует отметить, однако, что моделирование стратификации основного потока не выходит пока за пределы первых попыток. Основной недостаток моделирования в воздушной среде заключается в трудности получения достаточно высоких значений чисел  $Ri_w$  и  $Ri_v$  из-за неустойчивости течения в аэродинамических трубах при скоростях ниже 0,1—0,3 м/сек. С другой стороны, при моделировании крупных объектов (например, ТЭЦ) увеличение масштаба модели повлекло бы за собой и постройку установок непомерных габаритов.

С этой точки зрения существенным преимуществом перед аэродинамическими трубами обладают установки, использующие в качестве рабочей среды воду — гидродинамические трубы или гидравлические каналы. В таких установках малые скорости течения порядка  $10^{-2}$  м/сек вполне естественны, что позволяет значительно уменьшить масштаб модели, а следовательно, и габариты всей установки. Как преимущество следует отметить и то, что кинематическая вязкость воды на порядок ниже, чем у воздуха, что позволяет при той же скорости и том же масштабе модели получать значения чисел  $Re$  на порядок выше по сравнению с воздушной средой. К сожалению, определенные недостатки гидравлических установок (необходимость в больших расходах воды и потребляемой мощности, трудность измерений и т. д.) обусловили их малую распространенность. Опыт моделирования на таких установках пока отсутствует, за некоторым, однако, исключением. Это исключение составляют установки с обращенным движением, в которых модель пе-

ремещается относительно неподвижной окружающей среды [19]. Преимущества такого метода заключаются в значительно меньших затратах мощности и в отсутствии необходимости перекачки больших масс воды. Однако при этом методе невозможно достичь подобия по турбулентным характеристикам окружающей среды и, отчасти, по граничным условиям, что ограничивает круг проблем, поддающихся надежному моделированию. Различные преимущества и недостатки тех или иных типов установок обуславливают их выбор для конкретных объектов моделирования. Как нам представляется, уже давно назрела необходимость создания в нашей стране ряда специализированных лабораторий, которые занялись бы исследованием на моделях рассеяния вредных примесей от различных промышленных, бытовых и транспортных источников и были оснащены всем необходимым для этого оборудованием. Такая лаборатория должна иметь, как минимум, следующие установки:

1. Большую аэродинамическую трубу открытого цикла с размерами рабочей части (ориентировочно) 2—3 м в поперечнике и 20—25 м длиной — для моделирования диффузии примесей от средних и крупных промышленных источников с учетом плавучести дымовых газов и стратификации окружающей среды, а также для моделирования диффузии от различных промышленных и бытовых источников в пределах городов, промышленных и сельских районов и т. д.

2. Малую аэродинамическую трубу открытого или замкнутого цикла с размерами рабочей части порядка 0,75—1 м в поперечнике и до 10—15 м длиной — для моделирования диффузии от источников средних и небольших размеров без учета стратификации окружающей среды и эффектов плавучести дымового факела, а также от различных бытовых и транспортных источников.

3. Гидравлический стенд — для моделирования диффузии от источников, дымовые газы которых обладают значительной плавучестью, а также для решения ряда проблем, связанных с рассеянием газовых примесей и тепла в районах городской и промышленной застройки.

Наличие в специализированной лаборатории всех перечисленных установок позволит успешно решать важные проблемы охраны окружающей среды от ее загрязнения.

#### Обозначения:

$x_i$ — $i$ -я пространственная координата ( $i = 1, 2, 3$ );	$\nu$ — молекулярный коэффициент кинематической вязкости;
$R$ — радиальная координата в выходном сечении дымовой трубы;	$a$ — коэффициент молекулярной теплопроводности.
$D_0$ — диаметр выходного сечения дымовой трубы;	$\hat{k}$ — коэффициент молекулярной диффузии;
$\delta$ — толщина пограничного слоя атмосферы;	$\nu_t$ — турбулентный коэффициент кинематической вязкости;
$u_i$ — $i$ -я составляющая средней скорости;	$R_\mu$ — универсальная газовая постоянная;
$w$ — скорость основного потока (ветра) перед объектом;	$m$ — молекулярный вес;
$v$ — скорость дымового факела в выходном сечении трубы;	$\epsilon$ — скорость диссипации турбулентной энергии;
$\omega$ — угловая скорость;	$E$ — энергия турбулентности;
$g$ — ускорение силы тяжести;	$\epsilon_{ijk}$ — перестановочный тензор;
$\rho$ — плотность;	$\delta_{ij}$ — символ Кронекера;
$\Delta\rho$ — избыточная плотность;	$Re$ — число Рейнольдса;
$T$ — абсолютная температура;	$Ri$ — число Ричардсона;
$\Delta T$ — избыточная температура;	$Ro$ — число Россби;
$\chi$ — концентрация примеси;	$Pr$ — число Прандтля;
$p$ — давление;	$Sc$ — число Шмидта;
$\Delta p$ — разность давлений;	$Eu$ — число Эйлера;
	$Ka$ — число Кармана.

## Индексы:

- ( $\bar{}$ ) — для основного потока; среднее по выходному сечению  
 ( $\bar{}$ )<sub>v</sub> — для дымового факела на выходе для дымового факела;  
 из трубы; ( $\bar{}$ )' — пульсационная составляющая;  
 ( $\bar{}$ )<sub>0</sub> — для невозмущенного основного по- ( $\bar{}$ )<sub>0</sub> — у земной поверхности.  
 тока (вне пограничного слоя) или

## ЛИТЕРАТУРА

1. Берлянд М. Е., Оникул Р. И., Тр. ГГО, вып. 234, 3 (1968).
2. Гухман А. А., Введение в теорию подобия, М., 1963.
3. Эльтерман В. М., В сб.: Метеорологические аспекты загрязнения атмосферы, Л., 1971, с. 357.
4. Scherlock R. H., Stalker E. A., Mech. Eng., 63, 147 (1941).
5. Scherlock R. H., Leshner F. J., Trans. ASME, 77, 1 (1955).
6. Strom G. H., Halitsky J., Trans. ASME, 77, 789 (1955).
7. Lord G. R., Leutheusser H. J., Man and his environment, 1, 115 (1970).
8. Ibing R., VDI-Zeitsch., 96, 1085 (1954).
9. Ruscheweyh H., Staub, 32, 202 (1972).
10. Facy L. e. a., La Météorologie, N° 69, 71 (1963).
11. Шандоров Г. С., Истечение в сносящий поток из отверстия в стенке канала и распространение струи в сносящем потоке, М., 1955.
12. Палатник И. Б., Темирбаев Д. Ж., В сб.: Проблемы теплоэнергетики и прикладной теплофизики, вып. 4, 1967, с. 196.
13. Гендриксон В., Эпштейн А., Изв. АН ЭССР, Физ. Матем., 22, 304 (1973).
14. Зражевский И. М., Клинго В. В., Тр. ГГО, вып. 258, 39 (1972).
15. Nemoto S., Papers in Meteorology and Geophysics, 19, 131 (1968).
16. Cermak J. E. a. o., Simulation of atmospheric motions by windtunnel flows. Tech. Rep. Fluid Dynam. and Diff. Lat., Colorado State Univ., 1966.
17. Cermak J. E., AIAA J., 9, 1746 (1971).
18. Sundaram T. R. a. o., AIAA J., 10, 743 (1972).
19. Vadot L., Etude de la diffusion des panaches de fumée dans l'atmosphère, CITEPA, Paris, 1965.

Институт термодинамики и электрофизики  
 Академии наук Эстонской ССР

Поступила в редакцию  
 21/1 1974

A. EPSTEIN

### TÖÖSTUSETTEVÕTETE KAHJULIKE HEITGAASIDE ATMOSFAARIS HAJUTAMISE MODELLEERIMISEST

On tuletatud tööstusettevõtete korstnatest väljuvate heitgaaside atmosfääris hajumise põhilised sarnasuskriteeriumid. Analüüsitakse praktilisi võimalusi vajalike ja piisavate sarnasustingimuste loomiseks modelleerimisel laboratoorsetes tingimustes ning käsitletakse mitmesugust tüüpi katseseadmete eeliseid ja puudusi.

A. EPSTEIN

### ON MODELLING ATMOSPHERIC DISPERSION OF STACK EFFLUENTS FROM INDUSTRIAL

The main criteria of similarity for laboratory modelling of the atmospheric dispersion of industrial stack effluents are derived. The practical possibilities of maintenance of necessary and sufficient similitude requirements are analyzed. Advantages and shortcomings of various types of experimental facilities for modelling are discussed.